RAPADO
Schaffung eines Rahmenwerks und einer Plattform für die authentifizierte, verschlüsselte und validierte Ablage von Dokumentationen von Flugzeugersatzteilen

Schlussbericht der Freien Universität Berlin

Berichtszeitraum:
01.05.2021 – 30.09.2024

Verbundprojekt in Zusammenarbeit mit Opremic trade GmbH

Gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz im Rahmen des Luftfahrtforschungsprogramms (LuFo VI-1)

Förderkennzeichen: 20W1925B

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

I. Kurzdarstellung 3

I.1 Aufgabenstellung 3

I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde 4

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens 5

I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand 7

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 8

II. Eingehende Darstellung 11

II.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses 11

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 26

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 28

II.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit 29

II.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens 31

II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses 33

I. Kurzdarstellung

I.1 Aufgabenstellung

Ziel des Forschungsprojekts RAPADO war die Erforschung und Entwicklung einer lückenlosen, sicheren und manipulationsgeschützten digitalen Dokumentation und Zertifizierung von Aircraft-Surplus-Materialien mithilfe der Distributed-Ledger-Technologie (DLT). Die Ausgangslage, die zur Formulierung dieser Aufgabe führte, ergab sich aus der Dokumentationspraxis in der Luftfahrtindustrie, insbesondere im Bereich Maintenance, Repair and Overhaul (MRO). Dort dominiert eine weitgehend analoge, papierbasierte Verwaltung von Wartungsnachweisen, Reparaturbelegen und Bauteildokumentationen. Diese Dokumente werden physisch erstellt, manuell verwaltet, archiviert und zwischen Fluggesellschaften, Wartungsbetrieben, Zertifizierungsstellen, Behörden sowie Brokern ausgetauscht. Besonders problematisch sind dabei die hohe Fehleranfälligkeit und der immense administrative Aufwand, der insbesondere beim Handel mit komplexen Bauteilen oder ganzen Flugzeugen entsteht. Dokumentationen müssen in großen Mengen physisch transportiert und händisch geprüft werden, was nicht nur kostenintensiv ist, sondern auch erhebliche Risiken in Bezug auf Datenverlust, Manipulation oder inkonsistente Datenbestände mit sich bringt.

Aufgrund der strengen regulatorischen Anforderungen in der Luftfahrtindustrie ist eine zuverlässige, transparente und manipulationssichere Dokumentation unverzichtbar. Fehlende, unvollständige oder inkorrekte Dokumente führen dazu, dass Ersatzteile, obwohl technisch einwandfrei und sicher einsetzbar, oftmals nicht verwendet werden können. Daraus resultierten unnötige wirtschaftliche Belastungen und erhöhte Umweltbelastungen durch überflüssige Neuanschaffungen. Gleichzeitig stellt die zunehmende Internationalisierung und Komplexität der Wartungs- und Lieferketten zusätzliche Herausforderungen an die Dokumentationsqualität und -nachvollziehbarkeit.

Vor diesem Hintergrund verfolgte das Projekt RAPADO die Aufgabe, ein technisches Rahmenwerk und eine zugehörige digitale Plattform zu entwickeln, welche die Anforderungen der Luftfahrtbranche hinsichtlich Authentifizierung, Verschlüsselung, Datenintegrität und Validierung vollständig erfüllen. Kernstück der Aufgabe war dabei die Konzeption und Erforschung einer Blockchain-basierten technischen Lösung, die bestehende papiergebundene Prozesse ersetzen und die Verwaltung sämtlicher Wartungs- und Zertifizierungsdaten transparent, nachvollziehbar und manipulationssicher gestalten sollte.

Ein zentrales Element der Aufgabenstellung bildete zunächst eine detaillierte Analyse des Status quo in der Luftfahrtindustrie. Im Rahmen dieser Analyse sollten bestehende Prozesse, Systeme und regulatorische Vorgaben systematisch erfasst und bewertet werden, um auf dieser Grundlage eine geeignete Zielarchitektur für die digitale Plattform zu definieren. Dabei galt es insbesondere, die speziellen Anforderungen der Branche im Hinblick auf Datenschutz, Interoperabilität mit bestehenden IT-Systemen und regulatorische Akzeptanz zu berücksichtigen.

Darüber hinaus umfasste die Aufgabenstellung die Erforschung und Erprobung geeigneter Methoden zur automatisierten Digitalisierung analoger Wartungsunterlagen mittels OCR-Technologie, sodass eine nahtlose Integration vorhandener analoger Daten in eine digitale Plattform ermöglicht werden kann.

Die praktische Anwendbarkeit der zu entwickelnden Lösungen stand im Mittelpunkt des Projekts. Daher erfolgte die Umsetzung in enger Kooperation mit dem Verbundpartner Opremic trade GmbH. Dieser brachte umfangreiches Praxiswissen und tiefgehende Branchenkenntnisse sowie etablierte Industriekontakte ein. Durch diese Zusammenarbeit sollte gewährleistet werden, dass die entwickelten Konzepte und Technologien nicht nur wissenschaftlich fundiert, sondern auch unmittelbar industriefähig und realistisch umsetzbar sein würden. Langfristig war geplant, aus den Forschungsergebnissen eine Plattform zu implementieren, die zur Standardisierung effizienter, sicherer und transparenter Prozesse im Bereich der Wartung und Dokumentation von Flugzeugersatzteilen beiträgt.

I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Forschungsprojekt RAPADO wurde unter spezifischen wirtschaftlichen, förderpolitischen und organisatorischen Voraussetzungen durchgeführt, die maßgeblichen Einfluss auf den Projektverlauf hatten.
Zu den wichtigen Marktgegebenheiten zählte insbesondere die Tatsache, dass die Luftfahrtindustrie sowohl zum Zeitpunkt des Projektbeginns als auch aktuell einem kontinuierlichen Druck unterliegt, Prozesse effizienter, nachhaltiger und sicherer zu gestalten. Der zunehmende Wettbewerb und die steigenden regulatorischen Anforderungen im Bereich Maintenance, Repair and Overhaul (MRO) erzeugten bei Fluggesellschaften sowie Wartungsunternehmen bereits vor Projektbeginn einen erheblichen Bedarf an digitalen Lösungen zur Optimierung der bestehenden Prozesse. Diese Anforderungen erschienen prädestiniert für den Einsatz moderner technologischer Verfahren wie Distributed-Ledger-Technologien (DLT) oder automatisierter Texterkennung (OCR). Zudem wurde das Fehlen einheitlicher digitaler Dokumentationsstandards ausdrücklich als Chance erkannt, einen neuartigen digitalen Standard zu konzipieren, der langfristig zu einer branchenweiten Akzeptanz und nachhaltigen Etablierung führen könnte.

Aus förderpolitischer Sicht erfolgte das Projekt RAPADO im Rahmen des Luftfahrtforschungsprogramms (LuFo VI-1), welches das erklärte Ziel verfolgt, Innovationen für eine leistungsfähigere und effizientere Luftfahrt zu fördern. Der Förderrahmen legte besonderen Wert auf praxisnahe Ergebnisse und die Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft und Industrie, was sich in der Projektstruktur mit einem starken Verbundpartner widerspiegelte.

Weiterhin stellte das Department für Wirtschaftsinformatik der Freien Universität Berlin eine zentrale Voraussetzung für die erfolgreiche Durchführung des Projekts dar. Die vorhandenen Kompetenzen und Erfahrungen des Departments – insbesondere in den Bereichen quantitative Entscheidungsunterstützung, Distributed-Ledger-Technologien, Datenanalyse und softwaretechnische Umsetzung – bildeten eine

wesentliche Grundlage für die methodische Bearbeitung der komplexen Forschungsfragen im Projekt. Besonders wertvoll waren hierbei die umfangreichen Vorarbeiten aus vorangegangenen Forschungsprojekten zu Themen der Ressourcenplanung, Blockchain-basierten Lösungen und digitalen Transformationsprozessen in der Airline-Branche, die es ermöglichten, unmittelbar an bestehende methodische und technische Erkenntnisse anzuknüpfen.

Ein weiterer prägender Faktor war die COVID-19-Pandemie, die zu Beginn und während der gesamten Laufzeit des Projekts spürbare Auswirkungen auf die Organisation der Projektaktivitäten hatte. Aufgrund pandemiebedingter Einschränkungen mussten physische Treffen und geplante Reisen deutlich reduziert werden. Diese Situation führte jedoch auch dazu, dass digitale Kommunikations- und Kollaborationstools intensiv genutzt wurden. Obwohl dadurch der unmittelbare Austausch mit Branchenvertretern und Projektpartnern erschwert wurde, entstanden durch die verstärkte Nutzung digitaler Formate auch Effizienzgewinne und eine flexiblere Gestaltung der Arbeitsprozesse, was den erfolgreichen Projektverlauf trotz dieser Herausforderungen ermöglichte.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Planung und der Ablauf des Forschungsprojekts RAPADO basierten zu Beginn auf einer detaillierten Aufteilung der Forschungsarbeiten in klar definierte Arbeitspakete (AP), die sich wiederum zu Hauptarbeitspaketen (HAP) zusammenfassten. Diese Struktur sollte gewährleisten, dass die im Antrag formulierten Ziele systematisch und effizient bearbeitet werden konnten. Der initial aufgestellte Ressourcenplan umfasste personelle, zeitliche und finanzielle Ressourcen, die auf die jeweiligen Arbeitspakete verteilt wurden und eine klare zeitliche Strukturierung der Aktivitäten erlaubten. Die inhaltliche Bearbeitung folgte zunächst stringent dieser Arbeitsstruktur, wurde jedoch im Projektverlauf flexibel angepasst, um auf unerwartete Erkenntnisse, veränderte Rahmenbedingungen und neue Prioritäten reagieren zu können.

Das erste Hauptarbeitspaket (HAP 1) umfasste die Erfassung und systematische Analyse des Status quo in der Luftfahrtindustrie. In diesem Arbeitspaket wurde zunächst eine detaillierte Prozessanalyse durchgeführt, bestehende Systemarchitekturen erfasst, der Zielprozess definiert, und sowohl ein Daten- und Zugriffsmodell als auch eine detaillierte Datenflussanalyse erarbeitet. Ergänzend hierzu wurden nicht-funktionale Anforderungen erhoben und auf dieser Grundlage ein initiales Architekturdesign entwickelt, das die Basis für sämtliche folgenden Arbeiten darstellen sollte.

Das zweite Hauptarbeitspaket (HAP 2) widmete sich der Erarbeitung der technischen und methodischen Ansätze, mit denen die zuvor identifizierten Anforderungen umgesetzt werden konnten. Ein besonderer Fokus lag hierbei auf der Dokumentenablage in der Blockchain (Ledger), deren sichere und manipulationsresistente Umsetzung essentiell für den Projekterfolg war. Ziel war es,

grundlegende Methoden und Verfahren zur authentifizierten Speicherung und Validierung zu erproben und in die angestrebte Zielarchitektur zu integrieren.

Das dritte Hauptarbeitspaket (HAP 3) beinhaltete die Entwicklung einer konkreten Plattformlösung, einschließlich einer umfassenden Betrachtung der technischen und fachlichen Governance. Hierbei wurde auch ein initiales Blockchain-Netzwerk konzipiert und aufgebaut, das die Kernanforderungen der Branche hinsichtlich Datensicherheit, Persistenz und regulatorischer Anforderungen erfüllte. Ergänzend dazu beinhaltete dieses Arbeitspaket die Umsetzung konkreter Funktionalitäten, insbesondere die sichere Prüfung und Validierung der digitalen Wartungsdokumentation. Experimentelle Erweiterungen der Plattform wurden im Rahmen des Projekts ebenfalls erprobt, um zusätzliches Innovationspotenzial zu untersuchen.

Das vierte Hauptarbeitspaket (HAP 4) sah ursprünglich eine vertiefte Beschäftigung mit dem Thema Digital Identity vor. Hierbei sollte eine grundlegende Definition von Identitäts- und Zugriffsmanagement entwickelt werden, um eine sichere und regulatorisch konforme Nutzung der Plattform zu gewährleisten. Im Verlauf der Projektbearbeitung stellte sich jedoch heraus, dass das Thema des Identity-Managements im Kontext der praktischen Anforderungen weniger kritisch war als zunächst angenommen. Zwar wurden Rollenverteilungen und Zugriffsrechte definiert, doch einige Aspekte, insbesondere hinsichtlich vertrauenswürdiger Identitäten, erforderten die Einbindung externer Vertrauensdienstleister. Daher erfolgte eine geringere Gewichtung dieses Arbeitspaketes zugunsten anderer, dringender erscheinender Fragestellungen.

Im fünften Hauptarbeitspaket (HAP 5) war ursprünglich geplant, die erarbeiteten Lösungen in eine bestehende kommerzielle Plattformlösung (MRO SmartHub) zu integrieren. Im Zuge der Projektdurchführung wurden zudem konkrete Verfahren zur automatisierten Digitalisierung der vorhandenen analogen Dokumente erarbeitet, sodass auch deren Integration in bestehende Plattformlösungen angestrebt werden konnte. Die OCR-basierten Digitalisierungstechnologien spielten hierbei eine zentrale Rolle.

Im Verlauf des Projektes stellte sich heraus, dass eine Flexibilisierung der ursprünglich geplanten Arbeitspakete notwendig wurde, um die gewonnenen Erkenntnisse und unerwarteten Herausforderungen effizient bewältigen zu können. Diese Flexibilisierung führte zu einer teilweisen Neugewichtung einzelner Arbeitspakete: Insbesondere wurde im Verlauf des Projekts deutlich, dass die Balance zwischen Manipulationssicherheit (Persistenz) und Datenschutz sowie die Validierung sensibler Dokumente mittels Zero-Knowledge-Proofs stärker priorisiert werden mussten, da diese Themen von zentraler Bedeutung für die regulatorische Akzeptanz der geplanten Lösung waren. Daher wurde hier ein deutlich höherer Aufwand investiert, als ursprünglich vorgesehen war. Im Gegenzug wurden Arbeiten zu Identity Management und bestimmte technische Details zu Rollen- und Zugriffsmodellen reduziert, da frühzeitig identifiziert wurde, dass diese Aufgaben teilweise durch die Einbindung eines externen Vertrauensdienstleisters ausgelagert werden könnten.

Weiterhin mussten die geplanten Abläufe zeitlich angepasst werden, da sich der Projektstart aufgrund verzögerter administrativer Prozesse verspätete und personelle Ausfälle auftraten. Diese zeitlichen Verschiebungen wurden im Projektverlauf durch eine kostenneutrale Verlängerung kompensiert. Auch Anpassungen auf Seiten des Verbundpartners Opremic trade GmbH machten eine abgestimmte Verlängerung erforderlich, um die gemeinsame Bearbeitung der Arbeitspakete sicherzustellen.

I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand an den angeknüpft wurde

Zur Durchführung des Forschungsprojektes RAPADO wurde maßgeblich auf umfassende wissenschaftliche Vorarbeiten am Department für Wirtschaftsinformatik der Freien Universität Berlin aufgebaut. Dort bestand bereits zum Projektbeginn ein etablierter und themenübergreifender Forschungsschwerpunkt „Intelligente Planung und Steuerung in Transport und Verkehr“, in dem Fragestellungen untersucht werden, die quantitative Entscheidungsunterstützung, intelligente Datenanalyse sowie softwaretechnische Implementierungen kombinieren. Das Department für Wirtschaftsinformatik verfügt dabei über umfangreiche Erfahrung im Bereich der Ressourceneinsatzplanung im Verkehrssektor und insbesondere im Luftverkehr. Ergebnisse dieser Forschung wurden regelmäßig in internationalen, referierten Fachzeitschriften publiziert sowie auf wissenschaftlichen Konferenzen vorgestellt und diskutiert.

Inhaltlich knüpfte das RAPADO-Vorhaben unmittelbar an die Forschungsergebnisse vorheriger Projekte des Departments an, insbesondere an das bereits erfolgreich abgeschlossene Promotionsprojekt „Decision Analytics and Decentralized Ledger Technologies for Determination and Preservation of Spare Part Value in Aircraft Maintenance“ (Wickboldt, 2019). In dieser Dissertation wurden grundlegende Konzepte erarbeitet, die mithilfe von Entscheidungsanalysen und Distributed-Ledger-Technologien (DLT) die Wertermittlung und -erhaltung von Flugzeugersatzteilen ermöglichen. Die in diesem Rahmen entwickelten Pricing-Konzepte und die vorgeschlagene Systemarchitektur („Fair Market Evaluator“) von Wickboldt und Kliewer (2016, 2018) bildeten wichtige methodische und konzeptionelle Grundlagen für die Entwicklung der RAPADO-Plattform. Ein konzeptionelles Modell zur Nutzung der Distributed-Ledger-Technologie in der MRO Supply Chain sowie erste experimentelle Umgebungen wurden ebenfalls bereits in diesen Vorarbeiten entwickelt (Wickboldt und Kliewer, 2018a, 2019). Darüber hinaus erfolgte im Rahmen dieser vorherigen Forschung eine umfassende Performanzanalyse und ein Benchmarking verteilter experimenteller Implementierungen (Wickboldt, 2019; Wickboldt et al., 2020), welche unmittelbar in das technische und methodische Konzept von RAPADO einflossen.

Darüber hinaus basierte die Arbeit im Projekt RAPADO auf Ergebnissen und Erkenntnissen aus zahlreichen weiteren wissenschaftlichen Projekten und Promotionsarbeiten, die am Department für Wirtschaftsinformatik durchgeführt wurden. Hierzu zählen unter anderem Arbeiten zur Airline-Ressourceneinsatzplanung und zur Analyse und Steuerung der Robustheit und Effizienz von Einsatzplänen, beispielsweise durch die Dissertationen von Dr. Lucian Ionescu (2018), Dr. Viktor Dück

(2010) sowie Dr. Daniel Kadatz (2017). Diese methodischen Grundlagen in der Ressourcenplanung und in der quantitativen Entscheidungsunterstützung bildeten eine solide Basis für die Bearbeitung der komplexen Anforderungen im Rahmen von RAPADO. Weitere zentrale methodische Vorarbeiten lieferten die Forschungen im Bereich Standard-Diffusion und IT-Architekturen, insbesondere zur Untersuchung von Pfadabhängigkeiten bei der Verbreitung neuer Technologien und Standards (Fürstenau, 2014; Obschonka, 2014). Diese Studien ermöglichten ein vertieftes Verständnis der organisatorischen und technologischen Herausforderungen bei der Einführung neuer digitaler Standards in etablierten Organisationen, was für die Luftfahrtindustrie von hoher Relevanz ist.

Ergänzend hierzu wurde in mehreren durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Forschungsprojekten, wie dem Projekt „Robuste Effizienz in Ressourcen-Einsatzplänen im Luftverkehr“ (KL2152/3-1, 2014–2016), umfangreiche Erfahrung im Umgang mit großen Datensätzen aus der Airline-Branche gesammelt. Durch die Kooperation mit der Deutschen Lufthansa konnte eine Datenbasis mit realen Flugdaten und Verspätungsinformationen über mehrere Jahre genutzt werden, die für umfangreiche Analysen sowie für die Entwicklung und Evaluation von Softwarelösungen im Bereich der Ressourceneinsatzplanung und Simulation verwendet wurde. Diese praktischen Erfahrungen mit großen und komplexen Datenbeständen ermöglichten eine gezielte methodische und softwaretechnische Umsetzung im RAPADO-Projekt.

Technologisch griff das RAPADO-Projekt auf bewährte Frameworks, Verfahren und Algorithmen zurück, die sowohl am Department als auch in der breiteren wissenschaftlichen und industriellen Praxis etabliert sind. Hierbei kam insbesondere die Ethereum-Blockchain-Technologie zum Einsatz, ergänzt durch das verteilte Dateisystem Interplanetary File System (IPFS) und die Plattform Infura für Blockchain-Infrastrukturen. Zusätzlich wurden Zero-Knowledge Proofs (zkSNARK-Algorithmen, darunter Groth16 und PLONK) untersucht und eingesetzt, um eine datenschutzkonforme und regulatorisch akzeptierte Validierung sensibler Daten zu gewährleisten. Für die Digitalisierung analoger Dokumente kamen automatisierte Texterkennungs-Frameworks wie Pytesseract und Google Vision OCR zum Einsatz, welche es ermöglichten, vorhandene papierbasierte Dokumentationen in validierungsfähige digitale Datenformate zu überführen.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die erfolgreiche Durchführung des Projekts RAPADO erfolgte in enger Zusammenarbeit und Abstimmung mit verschiedenen externen Stellen, wodurch sowohl die Praxisnähe der entwickelten Lösungen als auch die wissenschaftliche Qualität und Anwendbarkeit der Ergebnisse gewährleistet wurde.

Eine zentrale Rolle spielte dabei die intensive Kooperation mit dem Verbundpartner Opremic trade GmbH. Opremic trade GmbH brachte umfangreiches Know-how sowie langjährige praktische Erfahrung im Bereich Maintenance, Repair and Overhaul (MRO) der Luftfahrtindustrie in das Projekt ein. Durch die enge Zusammenarbeit

konnte sichergestellt werden, dass alle konzeptionellen Überlegungen und technischen Entwicklungen unmittelbar auf die konkreten Anforderungen und Herausforderungen der Branche abgestimmt wurden. Opremic trade GmbH unterstützte insbesondere bei der Identifikation und Bereitstellung relevanter Prozesse und Anwendungsfälle, beim Aufbau der Zielarchitektur und des initialen Blockchain-Netzwerks sowie bei der praxisorientierten Evaluation der entwickelten Proof-of-Concept-Implementierungen. Diese Zusammenarbeit ermöglichte es, bereits in frühen Projektphasen Rückmeldungen zu erhalten und Anpassungen vorzunehmen, die entscheidend zur erfolgreichen Entwicklung einer realitätsnahen Lösung beitrugen. Darüber hinaus konnte der Verbundpartner seine etablierten Kontakte innerhalb der Luftfahrtbranche nutzen, um die entwickelten Lösungen bei wichtigen Stakeholdern zu platzieren und Akzeptanz für das Forschungsvorhaben zu schaffen.

Neben der unmittelbaren Zusammenarbeit mit dem Verbundpartner wurden weitere externe Stellen aktiv in das Projekt eingebunden. Hierzu gehörten insbesondere Unternehmen und Organisationen aus der Luftfahrtbranche, darunter Fluggesellschaften, Wartungsunternehmen, Dachverbände sowie regulatorische Behörden. Diese Zusammenarbeit erfolgte insbesondere im Rahmen von Workshops, Experteninterviews und informellen Abstimmungen. Die Kooperation mit den Branchenexperten war entscheidend, um ein umfassendes Verständnis der bestehenden Prozesse und Herausforderungen zu erlangen, insbesondere bei der Analyse des Status quo und bei der Definition des Zielprozesses für die digitale Dokumentationsplattform. Im Rahmen dieser Aktivitäten konnten detaillierte Anforderungen aufgenommen und wichtige Erkenntnisse gewonnen werden, die anschließend unmittelbar in die Entwicklung der technologischen und konzeptionellen Lösungen eingeflossen sind.

Ein wesentlicher Beitrag kam auch von Service-Providern im Bereich Digitalisierung, insbesondere von spezialisierten Anbietern für Scan-Dienste. Diese Kooperation diente dazu, technologische Lösungsansätze zur Digitalisierung von Dokumenten mithilfe von Optical-Character-Recognition (OCR) zu erarbeiten und zu validieren. Hierbei wurden nicht nur technische Verfahren untersucht, sondern auch praxisbezogene Herausforderungen identifiziert, die bei der Überführung analoger Zertifikate und Wartungsprotokolle in digitale, validierungsfähige Formate auftreten können.

Darüber hinaus erfolgte die Zusammenarbeit mit weiteren wissenschaftlichen Einrichtungen sowie die Teilnahme an wissenschaftlichen Veranstaltungen, Konferenzen und Doktorandenkolloquien. Dabei wurden die Projektergebnisse in der wissenschaftlichen Community vorgestellt, um frühzeitig kritisches Feedback zu erhalten und den methodischen sowie technologischen Ansatz zu validieren. Die Einbindung weiterer wissenschaftlicher Stellen ermöglichte zudem eine fundierte Diskussion der entwickelten Algorithmen und methodischen Vorgehensweisen, insbesondere hinsichtlich der Nutzung von Blockchain-Technologien und Fragen der Netzwerkkonfiguration sowie Governance.

Diese breite und intensive Zusammenarbeit mit Verbundpartnern, externen Branchenexperten, Digitalisierungsspezialisten und wissenschaftlichen Einrichtungen bildete eine zentrale Grundlage für den Erfolg des Projekts RAPADO. Durch das

Zusammenführen von praktischem Branchenwissen, technologischem Know-how und wissenschaftlicher Expertise konnten Synergieeffekte genutzt und eine praxistaugliche Lösung entwickelt werden, die langfristig das Potenzial hat, branchenweit zur Standardisierung von effizienteren und sicheren Prozessen im Bereich der Dokumentation und Zertifizierung von Flugzeugersatzteilen beizutragen.

II. Eingehende Darstellung

II.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses

Die folgende Ergebnisdarstellung orientiert sich an den inhaltlichen Schwerpunkten, wie sie im Verlauf der Hauptarbeitspakete (HAPs) des Forschungsprojekts RAPADO bearbeitet wurden. Die Struktur der HAPs wurde bereits zuvor im Kapitel „Planung und Ablauf des Vorhabens“ beschrieben. Um eine systematische Einordnung der erzielten Erkenntnisse zu ermöglichen, folgt die Darstellung der wichtigsten Ergebnisse nun ebenfalls der Logik dieser Schwerpunkte.

Zunächst werden die Ergebnisse der Analyse des Status quo sowie die daraus abgeleiteten Anforderungen und Handlungsbedarfe dargestellt. Anschließend folgt die Beschreibung der Ergebnisse zur Entwicklung einer Zielarchitektur und zur experimentellen Umsetzung eines ersten Proof-of-Concepts der geplanten Blockchain-basierten Plattform. Weiterhin werden die Erkenntnisse zur Validierung von MRO-Dokumenten mithilfe von Zero-Knowledge-Proofs dargestellt, welche eine zentrale Rolle bei der Gewährleistung von Datenschutz und regulatorischer Akzeptanz spielen. Danach folgen die Ergebnisse der Erforschung eines Algorithmus zur Untersuchung der Auswirkungen unterschiedlicher Netzwerkkonfigurationen auf die Integrität und Persistenz von Daten innerhalb der Blockchain-Lösung. Anschließend werden die Erkenntnisse hinsichtlich des entwickelten Governance-Modells sowie zur Digitalisierung bestehender MRO-Daten mittels OCR-Technologie beschrieben.

Untersuchung des Status quo und Ableitung des Handlungsbedarfs:

Das erste Ziel des Projekts RAPADO bestand darin, die bestehende Dokumentationspraxis in der Luftfahrtbranche detailliert zu untersuchen und die zentralen Herausforderungen zu identifizieren, die eine sichere, manipulationsfreie und standardisierte MRO-Dokumentation bislang verhindern. Dieser erste Schritt war essenziell, um eine belastbare Grundlage für die spätere technische Entwicklung der Plattform zu schaffen. Die Untersuchung des Status quo erfolgte durch eine Kombination verschiedener methodischer Ansätze, darunter qualitative Interviews mit Industriepartnern, technische Analysen bestehender IT-Systeme, Workshops mit MRO-Dienstleistern und Regulierungsbehörden sowie eine umfassende Literatur- und Marktanalyse.

Die Untersuchung ergab, dass die Verwaltung von MRO-Dokumenten nach wie vor weitgehend papierbasiert ist. Trotz bestehender Bemühungen zur Digitalisierung in einigen Bereichen der Luftfahrtindustrie gibt es keine einheitlichen, durchgängigen digitalen Standards für die Speicherung, Verwaltung und Validierung von Wartungs- und Zertifizierungsdokumenten. Die aktuellen Dokumentationsprozesse sind stark fragmentiert, was zu zahlreichen strukturellen und prozessualen Problemen führt. Da Flugzeugersatzteile über ihren gesamten Lebenszyklus hinweg von einer Vielzahl von Akteuren gewartet, repariert und weiterverkauft werden, muss die zugehörige Dokumentation jederzeit vollständig und nachvollziehbar bleiben. In der Praxis zeigt sich jedoch, dass dies nur unzureichend gewährleistet ist.

Ein zentrales Problem besteht darin, dass Zertifikate und Wartungsdokumente oft ausschließlich in physischer Form existieren. Bei jedem Wartungsvorgang oder Teileaustausch wird ein neues Dokument generiert, das in Papierform an das jeweilige Bauteil gekoppelt ist. Während sich diese Vorgehensweise historisch etabliert hat, bringt sie in der heutigen komplexen, globalisierten Luftfahrtindustrie erhebliche Nachteile mit sich. Dokumente gehen auf dem Transportweg verloren, sind beschädigt oder unleserlich oder werden im Laufe der Zeit unvollständig. Besonders gravierend sind Fälle, in denen sicherheitskritische Komponenten nicht weiterverwendet werden können, weil ein einzelnes Dokument fehlt. In vielen Fällen müssen betroffene Airlines oder MRO-Dienstleister dann neue Ersatzteile erwerben, obwohl technisch einwandfreie Bauteile verfügbar wären. Dies führt zu unnötigen wirtschaftlichen Verlusten, steigert die Materialverschwendung und wirkt sich negativ auf die Nachhaltigkeit in der Luftfahrtbranche aus.

Ein weiteres Problem ist die Fehleranfälligkeit der aktuellen Prozesse. Da Dokumente manuell ausgestellt, geprüft und weitergegeben werden, besteht ein hohes Risiko für Übertragungsfehler und fehlerhafte Interpretationen. Zudem sind Papierdokumente manipulationsanfällig, was insbesondere auf dem Markt für gebrauchte Flugzeugteile ein erhebliches Sicherheitsrisiko darstellt. Es besteht die Möglichkeit, dass Zertifikate gefälscht oder manipuliert werden, um Bauteile als zulässig zu kennzeichnen, obwohl sie dies nicht sind. Diese Risiken werden durch die mangelnde Interoperabilität bestehender IT-Systeme zusätzlich verstärkt. Innerhalb der Luftfahrtindustrie existieren zahlreiche isolierte Softwarelösungen, die jeweils auf individuelle Bedürfnisse von Airlines, MRO-Dienstleistern oder Zulieferern zugeschnitten sind. Diese Systeme sind jedoch oft nicht kompatibel, sodass ein effizienter Austausch von MRO-Dokumenten zwischen den verschiedenen Akteuren kaum möglich ist.

Neben diesen technischen und organisatorischen Herausforderungen spielen auch regulatorische Anforderungen eine entscheidende Rolle. Behörden wie die EASA und die FAA verlangen eine vollständige Dokumentation über den gesamten Lebenszyklus eines Bauteils hinweg, die sogenannte Back-to-Birth-Dokumentation. Fehlt auch nur ein einziges Dokument, kann das Bauteil als nicht zertifiziert gelten, was bedeutet, dass es nicht mehr verwendet werden darf. Derzeit gibt es jedoch keine offizielle digitale Standardlösung, die von Aufsichtsbehörden anerkannt ist. Dies führt dazu, dass Airlines und MRO-Dienstleister weiterhin auf papierbasierte Prozesse angewiesen sind, um die regulatorischen Anforderungen zu erfüllen.

Die Untersuchung des Status quo hat gezeigt, dass die aktuellen Dokumentationsprozesse nicht nur ineffizient, sondern auch sicherheitskritisch sind. Ein besonders gravierendes Beispiel für die Risiken dieser Praxis wurde im Fall des Lion-Air-Absturzes der Boeing 737 MAX sichtbar. Nach Untersuchungen stellte sich heraus, dass 31 Seiten des Wartungsprotokolls eines sicherheitskritischen Sensors nicht auffindbar waren. Der Verlust dieser Dokumente führte dazu, dass die Sensorproblematik nicht rechtzeitig erkannt wurde, was letztlich zur Katastrophe beitrug.

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse wurden die zentralen Anforderungen an eine digitale MRO-Dokumentationslösung formuliert. Die geplante Lösung musste garantieren, dass einmal gespeicherte Dokumente nicht unbefugt geändert oder

gelöscht werden können. Gleichzeitig musste sichergestellt werden, dass berechtigte Akteure wie MRO-Dienstleister oder Luftfahrtbehörden jederzeit auf die relevanten Daten zugreifen können, ohne dass dabei Datenschutz- oder Sicherheitsbedenken entstehen. Die Architektur musste außerdem gewährleisten, dass die Integrität der gespeicherten Informationen über Jahrzehnte hinweg erhalten bleibt, da viele Flugzeugteile eine lange Lebensdauer haben.

Ein weiteres zentrales Ziel bestand darin, eine Lösung zu entwickeln, die sich in bestehende Prozesse und Systeme integrieren lässt, ohne dass ein kompletter Wechsel der IT-Infrastruktur erforderlich wäre. Dies sollte durch eine modulare Architektur erreicht werden, die eine schrittweise Implementierung in bestehenden Unternehmen ermöglicht. Eine besondere Herausforderung bestand in der Frage, wie sich eine solche digitale Lösung regulatorisch absichern lässt. Um eine breite Akzeptanz in der Industrie zu erreichen, war es notwendig, eine Plattform zu entwickeln, die sich an bestehenden Normen und Vorschriften orientiert und mit den Anforderungen von EASA, FAA und IATA konform ist.

Die gewonnenen Erkenntnisse aus dieser Analyse wurden in die weitere technische Konzeption der Plattform überführt. Dabei wurden zentrale Fragestellungen definiert, die in den nachfolgenden Arbeitspaketen bearbeitet wurden. Diese umfassten unter anderem die Entwicklung einer sicheren, dezentralen Infrastruktur für MRO-Dokumente, die Erforschung von Validierungsmethoden zur Prüfung der Echtheit und Unveränderbarkeit von Dokumenten sowie die Frage, wie eine langfristige Datenpersistenz sichergestellt werden kann. Darüber hinaus wurden auch Fragen der Governance und der wirtschaftlichen Tragfähigkeit der Plattform untersucht, um eine nachhaltige Umsetzung sicherzustellen.

Die Analyse des Status quo und die Ableitung der technischen Anforderungen bildeten die Grundlage für alle weiteren Forschungsarbeiten im Projekt. In den nachfolgenden Arbeitspaketen wurde darauf aufbauend die technische Zielarchitektur entwickelt, die in einem ersten Proof of Concept umgesetzt wurde. Anschließend wurden verschiedene Verfahren zur Dokumentenvalidierung und zur Sicherstellung der Datenintegrität erforscht, bevor schließlich auch wirtschaftliche und regulatorische Fragestellungen untersucht wurden.

Entwicklung der Zielarchitektur und Implementierung eines ersten Proof of Concept:

Basierend auf den Erkenntnissen aus der Untersuchung des Status quo wurden im nächsten Schritt die technischen Anforderungen und Kernprinzipien der Zielarchitektur für die digitale MRO-Dokumentation entwickelt. Die Architektur musste gewährleisten, dass Wartungsdokumente von Flugzeugersatzteilen manipulationssicher, effizient abrufbar und langfristig verfügbar sind, während gleichzeitig Datenschutzanforderungen und regulatorische Vorgaben erfüllt werden.

Ein wesentliches Problem, das bei der Analyse der bestehenden Systeme festgestellt wurde, war die Tatsache, dass die derzeitige Dokumentationspraxis stark fragmentiert ist. MRO-Dienstleister, Airlines, Ersatzteilhändler und Regulierungsbehörden nutzen jeweils unterschiedliche IT-Systeme, die nicht interoperabel sind. Dies führt dazu, dass Dokumente mehrfach gespeichert und bei jedem Systemwechsel erneut geprüft werden müssen, wodurch sich Fehlerquellen und Verzögerungen häufen.

Ein weiteres Problem war die Tatsache, dass papierbasierte Prozesse nicht nur ineffizient, sondern auch unsicher sind. Der Verlust oder die Fälschung eines einzigen Zertifikats kann dazu führen, dass ein Bauteil nicht mehr verwendet werden darf. Dies zeigte sich in mehreren Fallstudien, in denen Unternehmen erhebliche wirtschaftliche Schäden erlitten, weil sie nicht nachweisen konnten, dass ein Ersatzteil alle regulatorischen Anforderungen erfüllt.

Die technische Zielarchitektur von RAPADO wurde deshalb so konzipiert, dass sie diese Herausforderungen adressiert. Dabei wurden mehrere zentrale Technologien kombiniert, um eine robuste Infrastruktur für die digitale Verwaltung und Validierung von MRO-Dokumenten zu schaffen.

Das erste technologische Kernprinzip der Plattform war die dezentrale Speicherung und Verwaltung von Dokumenten. Eine zentrale Datenbank wäre eine potenzielle Schwachstelle, da sie ein Single Point of Failure sein könnte und Angriffe oder Datenverluste ermöglichen würde. Stattdessen wurde ein hybrides Modell entwickelt, das eine Blockchain-Technologie zur Sicherstellung der Datenintegrität mit einem dezentralen Speichersystem für die tatsächlichen Dokumente kombiniert.

Die Rolle der Blockchain bestand dabei nicht darin, die Dokumente direkt zu speichern, sondern als unveränderbare, fälschungssichere Metadatenstruktur zu dienen, in der die Hash-Werte der Dokumente und relevante Verifizierungsinformationen gespeichert wurden. Diese Struktur stellt sicher, dass Dokumente jederzeit auf ihre Echtheit überprüft werden können, ohne dass die tatsächlichen Dateien in der Blockchain abgelegt werden müssen. Dadurch wird sowohl die Datensicherheit als auch die Skalierbarkeit der Lösung gewährleistet.

Ein weiteres wichtiges Element der Zielarchitektur war die Integration eines verteilten Speichersystems zur Ablage der tatsächlichen Dokumente. Dabei wurde zunächst auf das InterPlanetary File System (IPFS) zurückgegriffen, das eine verteilte Speicherung ermöglicht und gleichzeitig den Zugriff auf Dateien über kryptografische Hashes organisiert. Diese Hashes wurden in der Blockchain gespeichert, sodass Manipulationen an Dokumenten erkannt werden konnten.

Zusätzlich zur Blockchain und zum dezentralen Speicher wurde ein Berechtigungs- und Zugriffskontrollsystem entwickelt, das eine selektive Offenlegung von Dokumenten ermöglicht. Da nicht alle Informationen für alle Akteure in der MRO-Branche zugänglich sein sollten, wurde ein System implementiert, das es ermöglicht, bestimmten Parteien selektiven Zugriff auf bestimmte Dokumente zu gewähren, während gleichzeitig sichergestellt wird, dass keine unbefugten Änderungen vorgenommen werden können.

Nach der theoretischen Entwicklung der Architektur wurde ein erster Proof of Concept (PoC) implementiert, um die Machbarkeit der entwickelten Konzepte in einer realen Umgebung zu testen. In diesem ersten PoC wurden die wichtigsten Kernfunktionen der Plattform umgesetzt, darunter die Erzeugung, Speicherung und Validierung von Zertifikaten, die Dokumentenverwaltung über das dezentrale Dateisystem sowie die Manipulationssicherheit durch Blockchain-basierte Hash-Speicherung.

Technologisch basierte dieser erste PoC auf einer Ethereum Virtual Machine (EVM), die als Smart-Contract-Plattform diente, um die Integrität der gespeicherten Dokumente sicherzustellen. Ergänzt wurde dies durch die Anbindung an ein dezentrales Speichersystem, das eine sichere Ablage der tatsächlichen Dokumente ermöglichte.

Der erste PoC wurde anschließend in einer Testumgebung evaluiert, in der typische Szenarien der MRO-Dokumentation simuliert wurden. Dabei wurden verschiedene Anwendungsfälle durchgespielt, etwa die Erstellung eines neuen Zertifikats nach einer Wartung, die Überprüfung der Echtheit eines bestehenden Dokuments durch einen Regulierer sowie die Manipulationsprüfung eines Zertifikats nach mehreren Speicheroperationen. Folgende Abbildung zeigt schematisch die grundlegenden Funktionen des POCs, „Ersatzteil registrieren“, „Zertifikat hochladen“ und „Zertifikat validieren“, in Form eines Sequenzdiagramms.

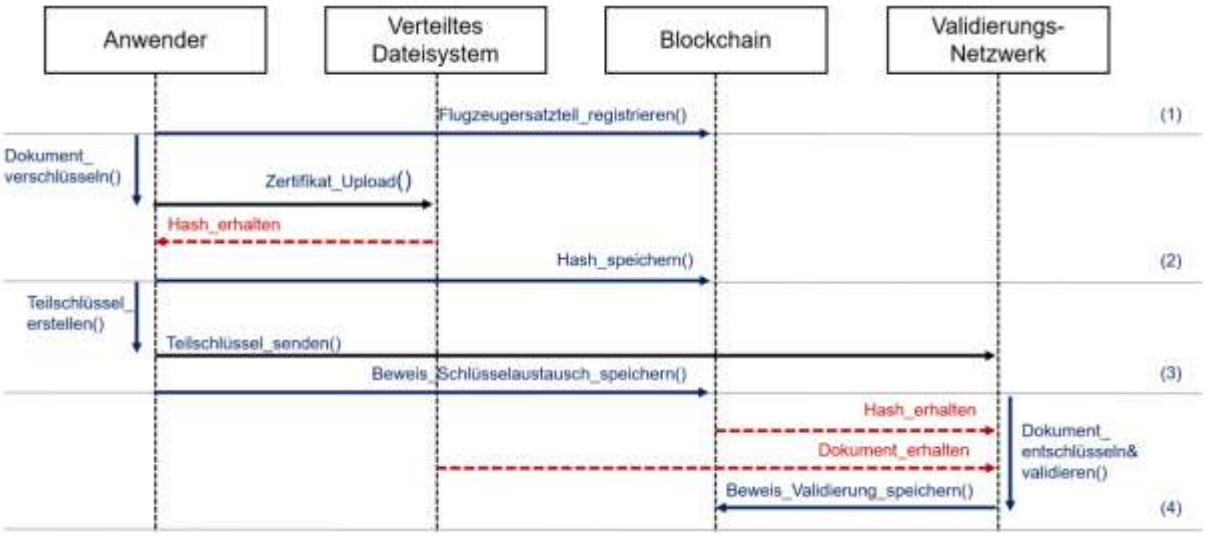

Abbildung: Infrastruktur / Sequenzdiagramm

Die Ergebnisse der Tests zeigten, dass die entwickelte Architektur grundsätzlich funktionsfähig und sicher ist. Es konnten erfolgreich fälschungssichere Zertifikate erstellt und geprüft werden, während gleichzeitig sichergestellt wurde, dass die gespeicherten Daten nicht nachträglich verändert oder manipuliert werden konnten.

Allerdings zeigten die Tests auch, dass eine rein Blockchain-basierte Speicherung nicht effizient wäre, da die Größe der zu speichernden Metadaten exponentiell ansteigen kann, wenn alle Transaktionen auf der Blockchain abgelegt werden. Daher wurde im weiteren Verlauf des Projekts ein hybrides Modell entwickelt, bei dem nur kritische Hash-Werte und Metadaten in der Blockchain gespeichert wurden.

Zusätzlich wurden in dieser Phase verschiedene Herausforderungen hinsichtlich der regulatorischen Anforderungen identifiziert. Eine wichtige Erkenntnis war, dass eine Blockchain-basierte Lösung nur dann eine breite Akzeptanz in der Luftfahrtbranche finden würde, wenn sie den bestehenden Regulierungen entspricht und von

Aufsichtsbehörden offiziell anerkannt wird. Daher wurden bereits in dieser frühen Phase erste Gespräche mit Regulierungsbehörden geführt, um zu prüfen, welche regulatorischen Anpassungen erforderlich sein könnten, damit eine digitale Lösung langfristig erfolgreich implementiert werden kann. Diese Gespräche zeigten, dass ein vollständiger Wechsel von Papierdokumenten zu einer digitalen Plattform auf absehbare Zeit nicht realistisch ist, sodass die Lösung eine Übergangsstrategie beinhalten musste, die sowohl analoge als auch digitale Dokumente verwalten kann.

Basierend auf den Erkenntnissen aus diesem ersten PoC wurden die weiteren Forschungsarbeiten im Projekt ausgerichtet. Die nächsten Schritte umfassten die detaillierte Untersuchung der Validierung von Dokumenten, die Erforschung neuer Algorithmen zur Überprüfung der Echtheit von Zertifikaten, die Optimierung der Datenstruktur für eine effizientere Speicherung und die Entwicklung eines Governance-Modells für eine dezentrale Plattformsteuerung.

Die Ergebnisse dieser Phase bildeten somit die Grundlage für die weiteren Arbeitspakete, insbesondere für die Forschungen zur Validierung von Dokumenten, zur Entwicklung einer skalierbaren Datenstruktur und zur Untersuchung der Auswirkungen verschiedener Netzwerkkonfigurationen auf die Datenpersistenz. Diese Themen wurden im weiteren Projektverlauf vertieft und in zusätzlichen Proof-of-Concept-Implementierungen evaluiert.

Validierung von MRO-Dokumenten und die Verwendung von Zero-Knowledge-Proofs:

Ein zentraler Bestandteil der digitalen MRO-Dokumentation ist die Validierung von Wartungsnachweisen, Zertifikaten und Bauteilhistorien, da in der Luftfahrtbranche höchste Anforderungen an die Authentizität, Integrität und Rückverfolgbarkeit von Dokumenten bestehen. Die bisherigen papierbasierten Verfahren sind nicht nur ineffizient und fehleranfällig, sondern auch manipulationsanfällig. Bestehende digitale Lösungen hingegen sind oft proprietär und nicht interoperabel, was die Zusammenarbeit zwischen MRO-Dienstleistern, Airlines und Regulierungsbehörden erheblich erschwert.

Im Rahmen des Hauptarbeitspakets zur Plattformentwicklung wurde daher die Frage untersucht, wie ein sicherer und effizienter Mechanismus zur Validierung von Dokumenten umgesetzt werden kann. Ziel war es, eine Methode zu entwickeln, mit der die Echtheit eines MRO-Dokuments überprüft werden kann, ohne dass der vollständige Inhalt offengelegt werden muss. Dieser Aspekt erwies sich als besonders relevant, da Wartungsdokumente oft sensible Informationen enthalten, die nicht für alle Beteiligten zugänglich sein sollten. Beispielsweise muss eine Airline nachweisen können, dass ein verbautes Ersatzteil eine lückenlose Wartungshistorie hat, ohne dass dabei sämtliche technischen Spezifikationen und vertraulichen Informationen über den Vorbesitzer offengelegt werden.

Die Herausforderung bestand darin, eine Lösung zu entwickeln, die einerseits Manipulationssicherheit garantiert, andererseits aber auch eine selektive Offenlegung von Informationen ermöglicht und effizient auf große Datenmengen skalierbar ist. Bestehende digitale Signaturen und Hash-basierte Integritätsprüfungen gewährleisten zwar die Echtheit eines Dokuments, bieten aber keine Möglichkeit, nur bestimmte Teile einer Datei zu verifizieren, ohne sie vollständig offenzulegen. In vielen Fällen führt dies

dazu, dass sensible Daten unnötigerweise preisgegeben werden müssen, was insbesondere in stark regulierten Industrien wie der Luftfahrt problematisch ist.

Um diese Herausforderung zu adressieren, wurde im Projekt die Anwendung von Zero-Knowledge-Proofs (ZKPs) erforscht, einer kryptografischen Technik, die es ermöglicht, eine Aussage über ein Dokument zu beweisen, ohne den eigentlichen Inhalt preiszugeben. Nach einer umfassenden Analyse verschiedener Methoden wurden insbesondere zk-SNARKs als geeignete Lösung identifiziert, da sie eine effiziente und kompakte Verifizierung ermöglichen. Ziel war es, zu prüfen, ob zk-SNARKs eine praktikable Lösung für die Validierung von Wartungszertifikaten und MRO-Dokumenten darstellen und wie sie sich in die entwickelte Plattformarchitektur integrieren lassen.

Als Proof of Concept wurden mehrere zentrale Validierungsszenarien implementiert. Einer der wichtigsten war die Validierung der Echtheit eines Zertifikats durch eine Airline oder einen MRO-Dienstleister, ohne dass das gesamte Dokument offengelegt werden muss. Ein weiteres Szenario betraf den Nachweis einer vollständigen Wartungshistorie für ein verkauftes Bauteil, wobei der Käufer nur bestätigt bekommt, dass alle Wartungen ordnungsgemäß durchgeführt wurden, ohne sämtliche Details der einzelnen Wartungsschritte einsehen zu müssen. Zudem wurde untersucht, wie sich die Technologie in behördliche Prüfprozesse integrieren lässt, um sicherzustellen, dass ein Flugzeug oder ein Ersatzteil den regulatorischen Anforderungen entspricht, ohne dass sensible Informationen über die Wartungsprozesse an Dritte weitergegeben werden.

Zusätzlich wurde eine validierungsfähige Datenstruktur entwickelt, die auf Merkle-Trees basiert. In dieser Struktur wird jede Änderung eines Dokuments als neuer Hash in einen Baum integriert, sodass eine kryptografische Bestätigung möglich ist, dass ein bestimmtes Dokument Teil der Baumstruktur ist, ohne dass sein vollständiger Inhalt offengelegt wird. Durch die Nutzung von zk-SNARKs kann ein Teilnehmer der Plattform somit nachweisen, dass ein Dokument authentisch und unverändert ist, ohne das eigentliche Dokument zu offenbaren.

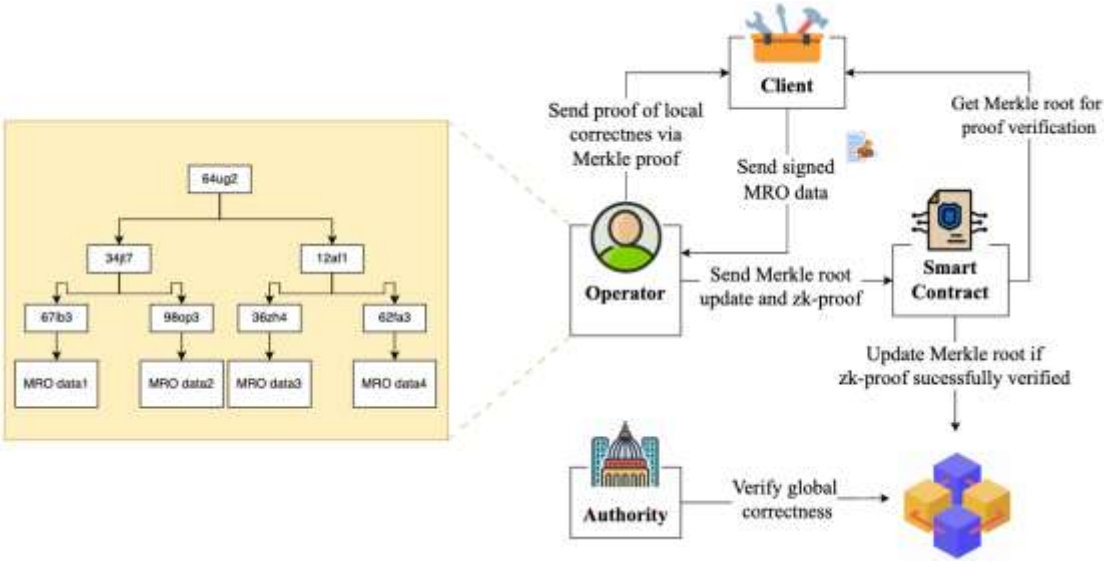

Abbildung: Zero-Knowledge Datenstruktur (li.) und Architektur (re.)

Die experimentellen Ergebnisse des Proof of Concept zeigten, dass Zero-Knowledge-Proofs grundsätzlich eine vielversprechende Möglichkeit darstellen, um die Validierung von MRO-Dokumenten sicher, effizient und datenschutzfreundlich zu gestalten. Insbesondere konnte nachgewiesen werden, dass mit zk-SNARKs eine manipulationssichere Bestätigung eines Zertifikats möglich ist, ohne dass das gesamte Dokument übermittelt oder gespeichert werden muss. Dies hat insbesondere Vorteile für Szenarien, in denen Informationen selektiv offengelegt werden sollen, beispielsweise in Fällen, in denen ein Käufer eines Flugzeugteils nur die Echtheit oder einzelne Attribute der Zertifikate überprüfen, aber nicht die vollständige Wartungshistorie einsehen darf.

Gleichzeitig traten auch Herausforderungen zutage, insbesondere im Hinblick auf die Rechenintensität der zk-SNARKs. Die Berechnung eines Zero-Knowledge-Proofs kann, abhängig von der Komplexität des zugrundeliegenden Dokuments, mehrere Sekunden in Anspruch nehmen, was für großflächige Anwendungen eine erhebliche Skalierungsproblematik darstellt. Zudem erfordert die Speicherung von Proofs zusätzlichen Speicherplatz, insbesondere, wenn umfangreiche Dokumentenhistorien validiert werden müssen. Eine weitere Hürde war die fehlende Interoperabilität mit bestehenden IT-Systemen der MRO-Dienstleister, da Zero-Knowledge-Proofs bisher nicht als gängige Nachweismethode in der Luftfahrt verwendet werden.

Neben den technischen Herausforderungen wurde auch die regulatorische Dimension der Dokumentenvalidierung betrachtet. Die Analyse ergab, dass Zero-Knowledge-Proofs aktuell nicht als offizielles Prüfverfahren in der Luftfahrt anerkannt sind. Zwar bieten sie erhebliche Vorteile hinsichtlich Datenschutz und Sicherheit, jedoch gibt es noch keine regulatorischen Rahmenwerke, die ihre Nutzung für die MRO-Dokumentation standardisieren oder zertifizieren. Damit bleibt die rechtliche Anerkennung eine der größten Hürden für eine breite Anwendung dieser Technologie.

Trotz dieser Herausforderungen zeigen die Ergebnisse, dass Zero-Knowledge-Proofs ein vielversprechender Ansatz für die digitale Validierung von MRO-Dokumenten sind. Langfristig könnten sie den administrativen Aufwand und die Sicherheitsrisiken erheblich reduzieren, indem sie manuelle Prüfprozesse durch eine automatisierte und kryptografisch gesicherte Validierung ersetzen. Dies könnte insbesondere für Airlines und MRO-Dienstleister zu erheblichen Einsparungen führen, da aufwendige Papierprozesse und fehleranfällige manuelle Prüfungen entfallen.

<u>Forschung und Entwicklung eines Algorithmus zur Untersuchung der Auswirkungen verschiedener Netzwerkkonfigurationen auf Datenintegrität und Persistenz:</u>

Nach der erfolgreichen Implementierung der ersten Proof of Concepts richtete sich der Fokus der Forschung auf eine zentrale technische Herausforderung: Die langfristige Sicherheit und Verfügbarkeit von MRO-Dokumenten in einem verteilten System. Die Luftfahrtindustrie verlangt, dass Wartungs- und Zertifizierungsdokumente über Jahrzehnte hinweg sicher gespeichert und abrufbar bleiben, da Flugzeugersatzteile eine lange Nutzungsdauer haben und ihre vollständige Dokumentationshistorie erhalten bleiben muss.

Daher wurde untersucht, wie sich unterschiedliche Netzwerkkonfigurationen auf die Integrität und Persistenz der gespeicherten Daten auswirken. Eine besondere Forschungsfrage war dabei, wie sich der Grad der Dezentralisierung eines Netzwerks auf die langfristige Sicherheit der gespeicherten Daten auswirkt. Während zentralisierte Speicherlösungen häufig mit einer höheren administrativen Kontrolle einhergehen, bieten dezentrale Systeme Vorteile in Bezug auf Manipulationsresistenz und Redundanz. Es war jedoch unklar, welche Form der Dezentralisierung die optimale Balance zwischen Datensicherheit, Performance und Skalierbarkeit für den Anwendungsfall von MRO-Dokumenten bietet.

Da sich bestehende Speicher- und Blockchain-Technologien stark in ihren Ansätzen unterscheiden, wurde im Rahmen der Forschung ein Algorithmus zur Quantifizierung des Dezentralisierungsgrades eines Netzwerks entwickelt. Ziel dieses Algorithmus war es, verschiedene Netzwerkkonfigurationen auf Basis messbarer Parameter zu bewerten und zu vergleichen. Dazu wurden mehrere Schlüsselvariablen definiert, darunter:

- Anzahl und geographische Verteilung der Netzwerkknoten: Ein hoher Grad an Dezentralisierung setzt voraus, dass die Daten nicht nur an wenigen Standorten gespeichert werden, sondern über ein großes Netzwerk verteilt sind.
- Redundanz der gespeicherten Daten: In einem dezentralen System müssen Daten mehrfach repliziert werden, um sicherzustellen, dass sie auch bei einem teilweisen Netzwerkausfall weiterhin verfügbar sind.
- Konsistenzmechanismen zur Sicherstellung der Datenintegrität: In einem verteilten System müssen Mechanismen vorhanden sein, die garantieren, dass eine einmal gespeicherte Datei nicht unbemerkt verändert oder gelöscht werden kann.
- Effizienz der Abfrage- und Verifikationsprozesse: Ein dezentrales System muss nicht nur sicher, sondern auch performant sein. Daher wurde untersucht, wie sich die Verteilung der Knoten auf die Geschwindigkeit von Datenabrufen und Prüfprozesse auswirkt.

Basierend auf diesen Variablen wurde ein Simulationsmodell entwickelt, das verschiedene Netzwerkkonfigurationen analysieren konnte. Dieses Modell ermöglichte es, unterschiedliche Szenarien zu simulieren und zu bewerten, indem es verschiedene Speicherstrategien und Netzwerktopologien miteinander verglich.

Zudem wurden bestehende dezentrale Speicherlösungen analysiert, darunter InterPlanetary File System (IPFS), Arweave und Storj. Jedes dieser Systeme bietet unterschiedliche Vor- und Nachteile hinsichtlich Skalierbarkeit, Sicherheit und Persistenz.

Das IPFS-Protokoll wurde zunächst als primäre Speicherlösung betrachtet, da es eine dezentrale Speicherung ermöglicht, bei der Dateien über ein Peer-to-Peer-Netzwerk abrufbar bleiben. Allerdings zeigte sich, dass die Persistenz von Daten in IPFS stark von der Anzahl der Netzwerkknoten und der freiwilligen Replikation durch Teilnehmer abhängt. Ein Dokument bleibt nur so lange verfügbar, wie mindestens ein Knoten es

speichert. Dies stellte ein erhebliches Risiko für die langfristige Verfügbarkeit von MRO-Dokumenten dar.

Eine alternative Lösung wurde in der Kombination mit permanenten Speichernetzwerken wie Arweave gefunden, die eine ökonomische Incentivierung für Langzeitspeicherung bieten. In diesem Modell werden Dokumente nicht nur über IPFS gespeichert, sondern zusätzlich in einem Blockchain-basierten Langzeitspeicher wie Arweave gesichert, der garantierte Redundanzmechanismen bietet.

Um den Einfluss der Dezentralisierung auf die Datenpersistenz systematisch zu untersuchen, wurde der entwickelte Algorithmus verwendet, um verschiedene Netzwerkarchitekturen in Simulationen zu testen. Dabei wurden insbesondere die folgenden Szenarien durchgespielt:

1. Vollständig zentralisiertes Modell: Ein Szenario, in dem alle Daten auf einem einzigen Server oder in einer Cloud-Lösung gespeichert sind. Dies ermöglichte eine hohe Kontrolle, wies jedoch eine geringe Ausfallsicherheit und hohe Manipulationsanfälligkeit auf.
2. Teilweise dezentrale Speicherung mit begrenzter Knotenzahl: Ein Modell, in dem eine begrenzte Anzahl von Netzwerkknoten Daten repliziert. Hier zeigte sich, dass die Redundanz erhöht wurde, jedoch immer noch ein gewisses Risiko für Datenverlust bestand.
3. Hochgradig dezentrales Netzwerk mit verteilten Knoten: Eine Konfiguration, in der Daten über viele unabhängige Speicherorte repliziert wurden. Dieses Szenario zeigte die höchste Widerstandsfähigkeit gegen Netzwerkausfälle, allerdings mit einem höheren Overhead bei der Synchronisierung von Prüfsummen und Speicherorten.

Die Ergebnisse dieser Simulationen zeigten, dass eine mittelgradige Dezentralisierung mit gezielter Redundanz die beste Balance zwischen Persistenz, Datenintegrität und Abfragegeschwindigkeit bietet. Eine vollständig zentralisierte Lösung wäre zwar administrativ einfacher zu verwalten, birgt aber erhebliche Risiken hinsichtlich Manipulation und Datenverlust. Eine vollständig dezentralisierte Lösung hingegen bietet höchste Sicherheit gegen Ausfälle, geht aber mit höheren Speicher- und Rechenkosten einher.

Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde ein hybrides Modell für die endgültige Architektur der Plattform gewählt, das folgende Eigenschaften kombiniert:

- Primärspeicherung in dezentralem Dateisystem für schnelle Abfragen und einfache Integration
- Zusätzliche Langzeitsicherung in permanentem Dateisystem mit ökonomischer Incentivierung zur Sicherstellung der Persistenz
- Blockchain-basierte Verifikation der gespeicherten Daten zur Sicherstellung der Integrität
- Regelmäßige Validierung der gespeicherten Hash-Werte durch einen automatisierten Mechanismus

Dieser hybride Ansatz gewährleistet, dass MRO-Dokumente sowohl langfristig gesichert als auch effizient abrufbar sind. Der entwickelte Algorithmus wird weiterhin

genutzt, um neue Netzwerkkonfigurationen zu evaluieren und die Infrastruktur der Plattform zu optimieren.

Zusammenfassend konnte in dieser Phase des Projekts gezeigt werden, dass eine dezentrale Speicherung von MRO-Dokumenten technisch machbar ist, wenn eine intelligente Kombination aus Blockchain-basierter Integritätssicherung, redundanter Speicherung und automatisierten Verifikationsmechanismen genutzt wird. Der entwickelte Algorithmus ermöglicht eine gezielte Analyse und Optimierung von Netzwerkkonfigurationen hinsichtlich ihres Dezentralisierungsgrades und ihrer Eignung für die Langzeitsicherung kritischer Daten.

Entwicklung eines Governance-Modells für eine dezentrale MRO-Dokumentationsplattform:

Die Entwicklung einer dezentralen digitalen Plattform für MRO-Dokumente erfordert nicht nur technologische Innovationen, sondern auch ein geeignetes Governance-Modell, das die Steuerung, Verwaltung und langfristige Nutzung des Systems sicherstellt. Die Governance ist dabei ein essenzieller Bestandteil der Plattformarchitektur, da sie festlegt, wer welche Rechte zur Dokumentenerstellung, -validierung und -modifikation hat und wie sichergestellt wird, dass die Plattform effizient und sicher funktioniert.

Ein zentrales Ziel des Governance-Modells war es, eine ausgewogene Balance zwischen Dezentralisierung und regulatorischer Kontrolle zu finden. Während dezentrale Plattformen in der Regel eine hohe Sicherheit gegen Manipulationen und unbefugte Änderungen bieten, müssen in der Luftfahrtindustrie dennoch regulatorische Vorgaben eingehalten und behördliche Prüfprozesse ermöglicht werden. Ein vollständig unkontrolliertes, rein dezentralisiertes Modell wäre daher nicht praktikabel.

Um diese Herausforderung zu adressieren, wurden im Projekt verschiedene Governance-Mechanismen erforscht und bewertet. Ein besonderer Fokus lag auf der Untersuchung von hybriden Governance-Modellen, die dezentrale Entscheidungsprozesse mit zentralisierten Kontrollinstanzen kombinieren.

Eine der vielversprechendsten Ansätze war die Implementierung einer Token Curated Registry (TCR), die als dezentrales Verzeichnis für verifizierte MRO-Dokumente fungiert. In einem TCR-System können Teilnehmer Dokumente zur Plattform hinzufügen, die jedoch erst nach einer Überprüfung durch ein Netzwerk aus verifizierten Prüfern als authentisch anerkannt werden. Dabei werden wirtschaftliche Anreize gesetzt, um sicherzustellen, dass nur vertrauenswürdige Teilnehmer und qualifizierte Prüfer am Netzwerk teilnehmen.

Ein weiteres Konzept, das untersucht wurde, ist die Möglichkeit einer dezentralen Identitätsverwaltung (Decentralized Identity, DID), die es einzelnen Akteuren ermöglicht, sich über eine blockchain-basierte Authentifizierung als verifizierte Teilnehmer des Systems auszuweisen. Dies könnte insbesondere für Regulierungsbehörden, MRO-Dienstleister und Luftfahrtunternehmen eine wichtige Rolle spielen, da sie so sicherstellen können, dass nur autorisierte Akteure Dokumente erstellen oder validieren.

Die Forschung zu Governance-Modellen umfasste auch die Frage, wie Regelwerke innerhalb der Plattform durchgesetzt werden können, insbesondere im Hinblick auf Datenintegrität, Zugangsbeschränkungen und Compliance mit regulatorischen Vorgaben. In diesem Zusammenhang wurden verschiedene Smart-Contract-basierte Mechanismen evaluiert, die die automatische Umsetzung und Überprüfung von Regeln ermöglichen. Die praktische Umsetzung war Teil der implementierten Proof of Concepts.

Ein weiteres zentrales Thema war die Frage, wer langfristig für den Betrieb der Plattform verantwortlich ist und wie eine faire und nachhaltige Finanzierungsstruktur gestaltet werden kann. In diesem Zusammenhang wurde untersucht, ob die Plattform als gemeinsame Initiative der Luftfahrtindustrie betrieben werden könnte oder ob ein konsortiales Modell mit mehreren Stakeholdern (z. B. Airlines, MRO-Dienstleister, Regulierungsbehörden) die beste Lösung wäre.

Die Ergebnisse dieser Forschungsarbeiten führten zu der Erkenntnis, dass ein hybrides Governance-Framework die beste Lösung darstellt. Hinsichtlich des operativen Betriebes der Plattform ist eine konsortiale und damit eher zentralisierte Steuerung zu bevorzugen, um regulatorische Sicherheit und die Wirtschaftlichkeit zu gewährleisten. Dennoch können erforschte dezentrale Governance-Mechanismen Funktionen der Plattform-Governance erfüllen und zur Transparenz, regelkonformen Nutzung und schließlich zur optimierten Akzeptanz sowie Adaption der Plattform beitragen.

Digitalisierung der MRO-Daten und Implementierung einer OCR-Technologie zur automatisierten Verarbeitung:

Weiterhin wurde in RAPADO untersucht, wie MRO-Dokumente effizient digitalisiert werden können, um eine Grundlage für die Nutzung der Plattform zu schaffen. Eine der größten Herausforderungen bestand darin, dass viele Wartungs- und Zertifizierungsdokumente weiterhin in Papierform oder in nicht strukturierten digitalen Formaten (z. B. gescannte PDFs) existieren.

Um dieses Problem zu adressieren, wurde erforscht, inwieweit OCR-Technologien (Optical Character Recognition) eingesetzt werden können, um MRO-Dokumente automatisiert zu digitalisieren und in einem einheitlichen, bearbeitbaren Format zur Verfügung zu stellen.

Im Rahmen der Forschung wurde ein Softwareprogramm entwickelt, das die Transformation von PDF-Rohdaten in strukturierte CSV-Dateien ermöglicht. Der entwickelte Workflow umfasst mehrere Schritte:

- Konvertierung von PDF-Dateien in Bildformate (PNG), um eine bessere Verarbeitung der Dokumente zu ermöglichen.
- Erkennung und Extraktion von relevanten Textbereichen (Regions of Interest, ROIs), sodass nur die tatsächlich benötigten Informationen erfasst werden.
- Texterkennung mittels OCR-Software, wobei unterschiedliche Implementierungen getestet wurden: Open-Source-Software und kommerzielle, cloudbasierte OCR.

- Speicherung der extrahierten MRO-Daten in einem strukturierten, weiterverarbeitbaren Format (CSV), um eine spätere Integration in die RAPADO-Plattform zu ermöglichen.

Zur Validierung der Flexibilität des Programms wurden unterschiedliche Dokumentenlayouts getestet. Die Ergebnisse zeigten, dass alle Dokumentenlayouts grundsätzlich verarbeitet werden konnten, jedoch teilweise individuelle Anpassungen des Codes erforderlich waren, um eine optimale Erkennung und Extraktion zu gewährleisten. Besonders wichtig für den industriellen Einsatz war die Ergebnisqualität der Texterkennung. Die Tests ergaben, dass die beste Open-Source-Software eine durchschnittliche Genauigkeit von 96 % erreichte, während kommerzielle Lösungen eine Genauigkeit von 99,8 % erzielten. In Folgenden Abbildungen sind die zwei gängsteigen Metriken zur Ermittlung der OCR Qualität, Character Error Rate und Word Error Rate, für drei unterschiedliche MRO-Dokumenttypen dargestellt. Verglichen wurde in diesem Fall die Open-Source Software Pytesseract mit der kommerziellen Lösung von Google.

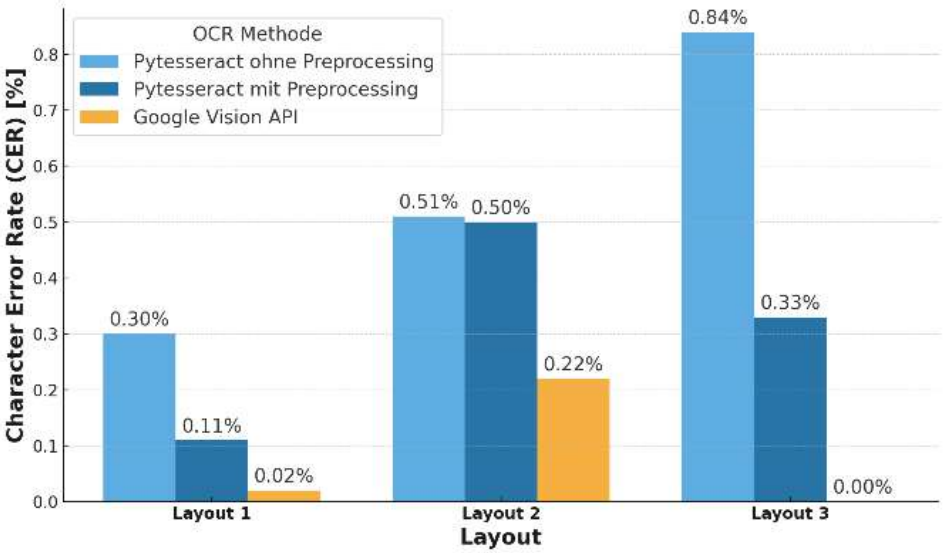

Abbildung: Character Error Rate Benchmark

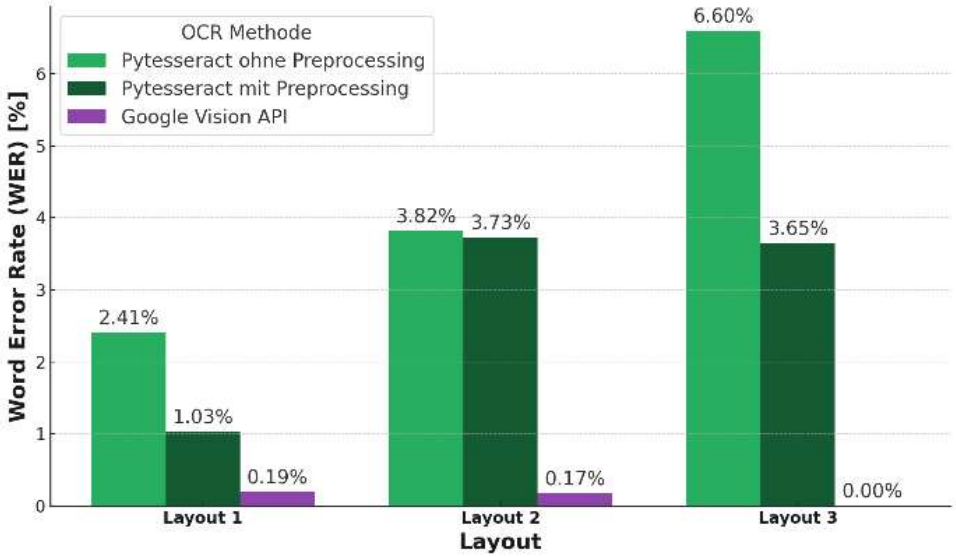

Abbildung: Word Error Rate Benchmark

Die Ergebnisse zeigen, dass kommerzielle OCR-Modelle derzeit eine höhere Präzision bieten, allerdings mit dem Nachteil einer verringerten Verarbeitungsgeschwindigkeit aufgrund der Latenzzeiten beim Cloud-Zugriff.

Ein weiterer entscheidender Faktor war die Bildauflösung bei der Umwandlung von PDF zu PNG. Die Tests ergaben, dass eine Auflösung über 300 dpi keine weitere Verbesserung der Erkennungsgenauigkeit mehr brachte, sondern nur den Speicher- und Rechenaufwand erhöhte. Dies führte zur Empfehlung, für zukünftige Scans oder Pre-Processings eine optimierte Auflösungseinstellung zu wählen, um Speicherplatz zu sparen, ohne die Qualität der OCR-Ergebnisse zu beeinträchtigen.

Die Ergebnisse zeigten zudem, dass für einen produktiven Einsatz der OCR-Digitalisierung in der Luftfahrtindustrie eine nahezu fehlerfreie Erkennung erforderlich ist. Eine durchschnittliche Genauigkeit von 99,8 % ist zwar sehr hoch, reicht jedoch nicht aus, um eine vollständig automatisierte Dokumentenverarbeitung ohne menschliche Nachkontrolle zu ermöglichen.

Um diesem Ziel näherzukommen, wurden mehrere Optimierungsstrategien identifiziert:

1. Erweiterung der OCR-Softwaretests: Neben Pytesseract und Google Vision OCR sollten weitere OCR-Engines evaluiert werden, um potenziell noch bessere Ergebnisse zu erzielen.
2. Automatische Fehlerkorrektur: Es wurden wiederkehrende Fehlerbilder identifiziert, die gezielt durch Algorithmen korrigiert werden könnten. Ein Beispiel hierfür ist die Verwechslung von Zeichen wie „0“ (Null) und „O“ (Buchstabe O).
3. Adaptive Modellanpassung: Es wurde vorgeschlagen, ein maschinelles Lernmodell zu trainieren, das sich an die spezifischen Dokumentenlayouts in der Luftfahrtindustrie anpasst, um die Erkennungsgenauigkeit weiter zu verbessern.

Die Forschung zur Digitalisierung von MRO-Daten zeigte, dass die Automatisierung dieser Prozesse erhebliche Effizienzsteigerungen ermöglichen kann, insbesondere, wenn die OCR-Erkennung weiter optimiert wird. Da der Kostendruck in der Luftfahrtindustrie kontinuierlich steigt, wird die Digitalisierung von Wartungsdokumenten zu einem entscheidenden Faktor für die Wettbewerbsfähigkeit von Airlines und MRO-Dienstleistern.

Erreichung der Projektziele und Bewertung der Arbeitspakete:

Das Forschungsprojekt RAPADO verfolgte das übergeordnete Ziel, eine lückenlose, sichere und standardisierte Dokumentation von Aircraft-Surplus-Materialien mittels Blockchain-Technologie zu erforschen. Die Vorhabensbeschreibung definierte hierfür zentrale technische und organisatorische Herausforderungen, die innerhalb verschiedener Arbeitspakete (APs) bearbeitet wurden. Eine abschließende Analyse zeigt, dass wesentliche Ziele erreicht wurden, wobei einige offene Herausforderungen für eine zukünftige Umsetzung identifiziert wurden.

Im Hinblick auf die Entwicklung einer digitalen Infrastruktur zur MRO-Dokumentation (AP 2, AP 3) konnten bedeutende Fortschritte erzielt werden. Die erarbeitete Architektur kombiniert eine Blockchain-gestützte Metadatenverwaltung mit dezentralem Speicher (IPFS, Arweave) und wurde in einem Proof of Concept erfolgreich implementiert. Damit wurde der in der Vorhabensbeschreibung definierte Anspruch einer sicheren, fälschungssicheren und verifizierbaren Dokumentationsmethode grundsätzlich erfüllt.

Ein weiteres wesentliches Ziel war die Untersuchung der Auswirkungen verschiedener Netzwerkkonfigurationen auf Datenpersistenz und Integrität (AP 4). Hier konnte durch die Entwicklung eines Algorithmus zur Quantifizierung des Dezentralisierungsgrades und die Simulation verschiedener Szenarien nachgewiesen werden, dass ein hybrides Netzwerkmodell die beste Balance zwischen Sicherheit, Skalierbarkeit und Performance bietet. Diese Erkenntnisse fließen in die weitere Optimierung der Plattformarchitektur ein.

Die Validierung von Dokumenten mittels Zero-Knowledge-Proofs (AP 3.5) stellte eine der technisch anspruchsvollsten Aufgaben dar. Es konnte erfolgreich gezeigt werden, dass zk-SNARKs eine sichere und datenschutzfreundliche Methode zur Dokumentenprüfung darstellen. Allerdings wurde auch festgestellt, dass die Rechenaufwände für eine breite Skalierung noch optimiert werden müssen, um eine großflächige industrielle Anwendung zu ermöglichen.

Im Bereich der Digitalisierung bestehender MRO-Dokumente (AP 5) wurden wesentliche Fortschritte erzielt. Die entwickelten OCR-Verfahren ermöglichen eine automatische Extraktion relevanter Informationen aus PDF-Dokumenten und deren Umwandlung in strukturierte Datenformate. Die Testergebnisse zeigten jedoch, dass eine vollständige Fehlerfreiheit derzeit noch nicht erreicht wird und weitere Optimierungen erforderlich sind, um den industriellen Anforderungen gerecht zu werden.

Ein herausfordernder Bereich war die regulatorische Integration und Akzeptanz der entwickelten Technologien. Zwar konnten erste Gespräche mit Regulierungsbehörden

geführt werden, jedoch ist die offizielle Anerkennung blockchain-basierter MRO-Dokumentationen noch nicht gegeben. Dies stellt eine der größten Hürden für die zukünftige Implementierung dar und erfordert eine enge Abstimmung mit Behörden und Industriepartnern.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die wesentlichen technischen Ziele des Projekts erreicht wurden, insbesondere in Bezug auf die Plattformarchitektur, die Dokumentenvalidierung und die Digitalisierung von MRO-Daten. Gleichzeitig wurde erkannt, dass regulatorische und wirtschaftliche Hürden noch überwunden werden müssen, bevor eine vollständige Implementierung in der Luftfahrtbranche erfolgen kann. Die Ergebnisse liefern jedoch eine solide wissenschaftliche Grundlage für die Weiterentwicklung und mögliche Standardisierung der digitalen MRO-Dokumentation.

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Verlauf des Projekts RAPADO ergaben sich Abweichungen zwischen der ursprünglichen Finanzplanung und den tatsächlich entstandenen Ausgaben. Diese Anpassungen waren primär durch eine kostenneutrale Verlängerung des Projekts bis zum 30.09.2024 bedingt, die notwendig wurde, um Verzögerungen beim Projektstart sowie personelle Ausfallzeiten zu kompensieren. Die hierbei vorgenommenen Verschiebungen innerhalb des Budgets führten vor allem zu einer Erhöhung der Personalkosten, die jedoch durch Einsparungen in anderen Ausgabenpositionen ausgeglichen werden konnten, sodass die Gesamtfinanzierung im geplanten Rahmen blieb.

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die wichtigsten finanziellen Positionen:

Position	**Gesamtfinanzierungsplan in EUR**	**Entstandene Ausgaben in EUR**
Personalkosten	232.300	244.542,19
Sonstige allgemeine Verwaltungsaufgaben	1.500	530
Reisekosten	8.300	1.727,81
Gegenstände & andere Investitionen	4.700	0
Summe	246.800	246.800

Die tatsächlichen Personalkosten in Höhe von 244.542,19 EUR lagen über der ursprünglich geplanten Summe von 232.300 EUR. Diese Abweichung entstand nicht durch zusätzliche ungeplante Ausgaben, sondern durch eine interne Umverteilung der Mittel, die durch die kostenneutrale Projektverlängerung erforderlich wurde. Der Projektstart verzögerte sich zunächst, da der Zuwendungsbescheid später als erwartet am 13.04.2021 einging und aufgrund der anschließenden Bewerbungs- und Auswahlprozesse die wissenschaftliche und studentische Mitarbeiterstelle erst zum

01.05.2021 besetzt werden konnten. Da die ursprüngliche Finanzplanung für eine Projektlaufzeit von 36 Monaten ausgelegt war, musste die Bearbeitung der Arbeitspakete durch eine Verlängerung abgesichert werden.

Zusätzlich ergaben sich weitere Verzögerungen durch personelle Ausfallzeiten. Die wissenschaftliche Mitarbeiterstelle war zwischen August und September 2021 krankheitsbedingt acht Wochen unbesetzt, wovon zwei Wochen nicht unmittelbar kompensiert werden konnten. Zudem fiel die Stelle für zwei weitere Monate aufgrund einer Elternzeit aus. Die hierdurch entstandenen ungenutzten Personalmittel wurden zur Finanzierung der kostenneutralen Verlängerung verwendet. Ferner schied der studentische Mitarbeiter einige Monate vor Projektende aufgrund des Studienabschlusses aus. Da eine kurzfristige Neubesetzung und Einarbeitung nicht sinnvoll gewesen wäre, wurden die dadurch freigewordenen Mittel ebenfalls auf die wissenschaftliche Mitarbeiterstelle übertragen, um eine kontinuierliche und hochwertige Bearbeitung der Forschungsaufgaben sicherzustellen.

Weiterhin war aufgrund der engen Zusammenarbeit mit dem Verbundpartner Opremic Solutions GmbH eine Synchronisation der Projektlaufzeit notwendig. Auch der Verbundpartner beantragte eine Verlängerung seiner Projektlaufzeit, sodass beide Projektpartner ihre Arbeiten aufeinander abstimmen und den gemeinsamen Forschungsfortschritt sicherstellen konnten. Diese Anpassungen führten somit insgesamt zu erhöhten Personalkosten, die jedoch innerhalb des Gesamtbudgets blieben.

Die deutliche Einsparung bei den Reisekosten – von ursprünglich geplanten 8.300 EUR auf tatsächlich angefallene 1.727,81 EUR – resultierte primär aus den pandemiebedingten Einschränkungen zu Beginn des Projekts. Physische Treffen und Konferenzen waren zunächst kaum möglich, wodurch sich alternative virtuelle und hybride Veranstaltungsformen etablierten. Da sich diese Formate als effizient und praktikabel erwiesen, wurden sie auch nach der Lockerung der Reisebeschränkungen fortgeführt. Lediglich für zwingend notwendige Abstimmungen mit Stakeholdern sowie ausgewählte wissenschaftliche Veranstaltungen wurden Reisen durchgeführt.

Für geplante Sachinvestitionen und insbesondere IT-Anschaffungen waren ursprünglich 4.700 EUR vorgesehen, die jedoch nicht in Anspruch genommen wurden. Ursprünglich war von zusätzlichem Bedarf an Hardware und Software zur Umsetzung der technischen Testimplementierung ausgegangen worden. Im Projektverlauf stellte sich jedoch heraus, dass die bestehenden IT-Ressourcen der Universität sowie cloudbasierte Entwicklungsumgebungen vollständig ausreichten, um die Projektergebnisse in vollem Umfang zu erarbeiten. Daher entfielen die ursprünglich geplanten Ausgaben für Investitionen vollständig.

Auch im Bereich der allgemeinen Verwaltungsaufgaben konnten Einsparungen erzielt werden. Statt der ursprünglich eingeplanten 1.500 EUR wurden nur 530 EUR ausgegeben. Dies ist darauf zurückzuführen, dass administrative Tätigkeiten, Projektkoordination und Veranstaltungen deutlich effizienter organisiert werden konnten, was insbesondere auf die verstärkte Nutzung digitaler Werkzeuge zur Zusammenarbeit und Kommunikation zurückzuführen ist.

Das Projekt blieb trotz der vorgenommenen Umwidmungen und Anpassungen innerhalb des bewilligten Gesamtbudgets von 246.800 EUR. Die pandemiebedingten Einsparungen im Bereich der Reisekosten sowie die nicht erforderlichen IT-Investitionen ermöglichten es, die entstandenen personellen Verzögerungen kostenneutral zu kompensieren. Somit konnten sämtliche Forschungsschwerpunkte wie geplant bearbeitet und die intensive Zusammenarbeit mit dem Verbundpartner bis zum erfolgreichen Projektabschluss fortgeführt werden.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Notwendigkeit und Angemessenheit der im Projekt RAPADO geleisteten Arbeiten ergeben sich unmittelbar aus den zu Projektbeginn identifizierten Defiziten und Herausforderungen im Bereich der Wartungs-, Reparatur- und Überholungsdokumentation (Maintenance, Repair and Overhaul – MRO) der Luftfahrtindustrie. Die Luftfahrtbranche zeichnet sich durch außergewöhnlich hohe Sicherheitsstandards aus, welche insbesondere die lückenlose Dokumentation und Nachverfolgung aller Wartungs- und Instandhaltungsprozesse zwingend erfordern. Dennoch ist die derzeit weit verbreitete, papierbasierte Dokumentationspraxis hochgradig ineffizient, fehleranfällig und manipulationsanfällig. Zahlreiche Zwischenfälle und Sicherheitsrisiken, etwa dokumentationsbedingte Probleme wie beim Absturz einer Boeing 737 Max der Lion Air, verdeutlichen die Dringlichkeit, bestehende Prozesse tiefgreifend zu optimieren und sicherer zu gestalten.

Während des Projektverlaufs wurden diese initialen Annahmen und Beobachtungen zusätzlich durch intensive Experteninterviews und Workshops mit Branchenvertretern, darunter MRO-Dienstleister, Airlines und Vertreter der Regulierungsbehörden, untermauert. Diese Stakeholder bestätigten eindeutig, dass die mangelnde Digitalisierung und Standardisierung der Dokumentation große Herausforderungen in Bezug auf Nachvollziehbarkeit, Integrität und Zertifizierbarkeit von Wartungsnachweisen mit sich bringen. Besonders kritisch wurde hierbei hervorgehoben, dass viele Unternehmen trotz der Verfügbarkeit zertifizierter gebrauchter Ersatzteile häufig auf Neuteile zurückgreifen, da sie die Dokumentation und Nachvollziehbarkeit von gebrauchten Teilen als unsicher oder nicht ausreichend transparent bewerten. Diese Praxis führt nicht nur zu höheren Kosten, sondern auch zu unnötigem Verbrauch natürlicher Ressourcen und damit verbundenen Umweltbelastungen.

Weiterhin bestätigten Untersuchungen während des Projektverlaufs, dass bestehende digitale Lösungen häufig nur Teilbereiche abdecken oder nicht in der Lage sind, Datenschutz und Manipulationssicherheit effektiv zu vereinen. Zudem mangelte es bisherigen Ansätzen an regulatorischer Anerkennung und industrieller Akzeptanz. Insbesondere die Forschungsfrage des RAPADO-Projektes, welche Faktoren sich konkret auf Datenintegrität und -persistenz auswirken und wie gleichzeitig regulatorische Vorgaben erfüllt werden können, stellte sich als neuartig und bislang unbearbeitet heraus.

Die intensive Zusammenarbeit mit dem Verbundpartner Opremic trade GmbH erwies sich hierbei als besonders wertvoll. Der Verbundpartner brachte sowohl tiefe Branchenkenntnis als auch wertvolle Kontakte zu Akteuren der Luftfahrtindustrie ein. Durch regelmäßigen Austausch konnten Forschungsergebnisse und experimentelle Entwicklungen kontinuierlich mit den praktischen Anforderungen der Branche abgeglichen und frühzeitig validiert werden. Diese enge Kooperation erzeugte erhebliche Synergieeffekte, wodurch gewährleistet wurde, dass die entwickelten Lösungen sowohl praxisnah als auch technisch innovativ ausfielen. Zudem ermöglichten die Industrieerfahrungen und das praktische Know-how des Verbundpartners eine gezielte Ausrichtung der Forschungsarbeiten auf relevante Fragestellungen und Herausforderungen, die in der Praxis tatsächlich bestehen.

Langfristig betrachtet könnte der Verbundpartner, unterstützt durch die im Projekt gewonnenen Ergebnisse und Technologien, eine kommerziell tragfähige Produktlösung bereitstellen, welche auf die im Projekt entstandenen technischen Innovationen aufbaut. Diese kommerzielle Lösung hätte das Potenzial, sich zu einem neuen Industriestandard zu entwickeln, indem sie die derzeit ineffizienten, analogen Prozesse durch eine vollständig digitale, standardisierte und validierbare Dokumentationsinfrastruktur ersetzt. Insbesondere Prozesse wie Zertifizierung, Echtheitsprüfung und lückenlose Bauteilhistorienverwaltung könnten durch diese neue Lösung erheblich effizienter, sicherer und regulatorisch leichter überprüfbar werden.

Die im RAPADO-Projekt eingesetzten personellen, finanziellen und technischen Ressourcen erwiesen sich somit als angemessen und sinnvoll dimensioniert. Der Aufwand entsprach den identifizierten Herausforderungen, und die erarbeiteten Ergebnisse rechtfertigen den geleisteten Ressourceneinsatz in vollem Umfang. Sowohl die theoretischen und methodischen Analysen als auch die Entwicklung konkreter technischer Lösungen wie Blockchain-basierte Datenstrukturen, Validierungsmechanismen mittels Zero-Knowledge-Proofs und OCR-gestützte Digitalisierungsmethoden sind in ihrer Tiefe, Breite und Praxisorientierung angemessen gewählt und effektiv umgesetzt worden.

Langfristig ist zu erwarten, dass die Einführung und Nutzung der Projektergebnisse, innerhalb der Luftfahrt MRO-Branche, zu einer Optimierung der Dokumentationsprozesse führen, und so ein nachhaltiger Beitrag zur Etablierung neuer Industriestandards im MRO-Bereich geleistet wird.

II.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit

Die im Rahmen des Projekts RAPADO entwickelten Konzepte, Methoden und technischen Lösungen bieten sowohl aus kommerzieller als auch aus wissenschaftlicher Perspektive erhebliches Potenzial zur zukünftigen Nutzung und weiteren Verwertung. Im Mittelpunkt steht dabei insbesondere die Möglichkeit, die digitale Verwaltung und Validierung von Wartungsdokumentationen und Aircraft-Surplus-Materialien durch den Einsatz innovativer Technologien effizienter, sicherer und manipulationssicher zu gestalten. Die erzielten Forschungsergebnisse und

entwickelten Softwareartefakte weisen bereits ein hohes Maß an Praxisnähe auf, sodass eine weiterführende kommerzielle Verwertungsperspektive konkret besteht.

Die im RAPADO-Projekt entstandenen Konzepte und technischen Artefakte, insbesondere die entwickelten Softwareartefakte zur OCR-basierten Digitalisierung analoger MRO-Dokumente sowie Validierung von Dokumenten, haben ein hohes Verwertungspotenzial für die Luftfahrtindustrie. Insbesondere die effiziente Integration entwickelter Lösungen in bestehende Prozesse und IT-Systeme könnte mittelfristig dazu führen, dass sich ein neuer Industriestandard etabliert. In Zusammenarbeit mit dem Praxispartner Opremic trade GmbH wurde identifiziert, dass vor allem Prozesse im Bereich der Verwaltung, Zertifizierung und des Handels stark profitieren könnten. Beispielsweise könnten Prozesse der Bauteilhistorienverwaltung, der Echtheitsprüfung und der lückenlosen Dokumentation von Wartungsereignissen durch entwickelte Lösungen weitgehend automatisiert und standardisiert werden. Insbesondere die Standardisierung der digitalen Dokumentation und Validierung von Ersatzteilen könnte zukünftig regulatorisch unterstützt und möglicherweise von Aufsichtsbehörden als akzeptierte, zertifizierte Methode anerkannt werden.

Die kommerzielle Verwertung dieser Ergebnisse liegt vornehmlich bei dem Praxispartner Opremic trade GmbH. Opremic könnte auf Grundlage der Projektergebnisse ein kommerzielles Produkt entwickeln, das spezifische Services rund um digitale Dokumentation, automatische Validierung und Manipulationssicherheit umfasst. Hierbei wären konkrete Produkte denkbar, etwa eine cloudbasierte Plattformlösung, welche die automatische, sichere und verifizierbare Verwaltung von Wartungszertifikaten und Bauteildaten anbietet. Ebenfalls denkbar wäre die Lizenzierung der entwickelten Technologien und Verfahren an MRO-Dienstleister oder Fluggesellschaften, die diese dann in bestehende Systeme integrieren können. Für die Freie Universität selbst besteht hingegen keine direkte kommerzielle Verwertungsperspektive; ihre Rolle bleibt weiterhin in der wissenschaftlichen Begleitung und Weiterentwicklung sowie Unterstützung regulatorischer Prozesse und Standardisierungsinitiativen.

Neben der unmittelbaren kommerziellen Perspektive bietet das RAPADO-Projekt vielfältige Möglichkeiten zur weiterführenden wissenschaftlichen Verwertung. Die durchgeführten Untersuchungen und erzielten Erkenntnisse eröffnen zahlreiche Forschungsfragen, welche über den eigentlichen Projektzeitraum hinausgehen und langfristig akademisch weiterverfolgt werden können. Ein besonders relevantes Forschungsfeld ist die Frage, wie technologische Innovationen in stark regulierten Industrien, wie der Luftfahrt, aufgenommen und in bestehende Prozesse integriert werden. Die Implementierung von Blockchain-Technologien und kryptografischen Verfahren wie Zero-Knowledge-Proofs wirft insbesondere aus Sicht der organisationalen und technologischen Pfadabhängigkeitsforschung vielfältige Fragen auf. Beispielsweise könnte erforscht werden, welche Faktoren die Akzeptanz dieser neuen Technologien in traditionell konservativen Branchen wie der Luftfahrt beeinflussen und welche organisatorischen Widerstände oder institutionellen Rahmenbedingungen überwunden werden müssen, damit eine flächendeckende Einführung erfolgreich ist.

Weiterhin ergibt sich durch die im Projekt entwickelte Methode zur Quantifizierung des Dezentralisierungsgrades von Blockchain-Netzwerken ein großes Potenzial für zukünftige Untersuchungen im Bereich der Netzwerkkonfiguration und -optimierung. Insbesondere die Erforschung, wie sich der Grad der Dezentralisierung konkret auf die Integrität, Persistenz und Performanz von Daten auswirkt, bietet vielfältige Möglichkeiten für vertiefende Studien und Simulationen. So könnten verschiedene Konfigurationsszenarien in unterschiedlichen Branchen untersucht werden, um allgemein gültige Erkenntnisse über die optimale Nutzung der Blockchain-Technologie im Spannungsfeld zwischen Dezentralisierung, Sicherheit und Effizienz zu gewinnen.

Ein weiteres wissenschaftlich relevantes Themenfeld ergibt sich aus der Erforschung und Entwicklung von Zero-Knowledge-Proofs zur Dokumentenvalidierung. Zukünftige Forschungsprojekte könnten insbesondere auf die Optimierung der Rechenintensität dieser kryptografischen Verfahren abzielen und neue Anwendungsgebiete jenseits des Luftfahrtsektors untersuchen. Besonders interessant sind hierbei Fragen der Effizienzsteigerung und der Interoperabilität zwischen Zero-Knowledge-Technologien und bestehenden industriellen Datenbanklösungen.

Auch das Thema OCR-basierte Digitalisierung von komplexen, analogen Dokumenten bietet weiterhin erheblichen Forschungsbedarf. Die im Projekt RAPADO entwickelten Verfahren konnten zwar hohe Erkennungsgenauigkeiten erreichen, jedoch noch nicht vollständig fehlerfrei arbeiten. Zukünftige Forschungsarbeiten könnten sich gezielt auf die Weiterentwicklung dieser Algorithmen konzentrieren, um die letzten verbleibenden Fehlerquellen zu eliminieren und eine vollständige Automatisierung der Digitalisierung zu ermöglichen.

Die Ergebnisse des RAPADO-Projekts sind sowohl aus kommerzieller als auch wissenschaftlicher Perspektive äußerst vielversprechend. Aus Sicht der Freien Universität Berlin liegt der wesentliche Verwertungsfokus auf den oben beschriebenen wissenschaftlichen Fragestellungen. Insbesondere die weitere Erforschung der Akzeptanz neuer Technologien sowie der organisatorischen und technologischen Pfadabhängigkeit bietet eine Reihe vielversprechender wissenschaftlicher Anschlussmöglichkeiten. Somit schafft das Projekt RAPADO nicht nur eine Grundlage für zukünftige Innovationen in der Luftfahrtindustrie, sondern liefert auch wertvolle Impulse für weiterführende akademische Forschung im Bereich Distributed-Ledger-Technologien, Zero-Knowledge-Verfahren, Digitalisierung und datengetriebene Innovationsprozesse.

II.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens

Im Rahmen der kontinuierlichen Markt- und Technologiebeobachtung des Projekts RAPADO wurde fortlaufend überprüft, ob relevante wissenschaftliche oder industrielle Entwicklungen von Dritten bekannt wurden, die für die Durchführung des Projekts bedeutsam sind. Ziel dieser Beobachtung war es sicherzustellen, dass die im Projekt entwickelten Lösungsansätze weiterhin innovativ, relevant und einzigartig bleiben.

Zu Beginn des Projektes war die Forschungs- und Entwicklungslage hinsichtlich des Einsatzes der Distributed-Ledger-Technologie (DLT) und speziell der Blockchain-Technologie im Bereich der Luftfahrtwartung und -dokumentation noch relativ dünn. Zwar existierten vereinzelt theoretische Arbeiten und generelle Studien, die Blockchain als potenziell vielversprechend für sichere Datenverwaltung hervorhoben, jedoch gab es keine Lösungen oder umfassenden Ansätze, die alle kritischen Aspekte wie digitale Zertifizierung, standardisierte Datenablage und manipulationssichere Dokumentation in der Luftfahrt-MRO-Branche integriert hätten. Insbesondere fehlten regulatorisch anerkannte oder industrieübergreifend akzeptierte Lösungen. Diese anfängliche Situation bestätigte das RAPADO-Projekt in seiner Zielsetzung, eine vollständige und regulatorisch anschlussfähige Lösung zu entwickeln, die bestehende Lücken schließen könnte.

Im Laufe des Projektes nahmen sowohl die akademischen als auch die industriellen Aktivitäten in Bezug auf Blockchain-Technologien im Luftfahrtsektor zu. Erste akademische Veröffentlichungen beschäftigten sich konkret mit der Thematik, darunter die Arbeit von Jensen et al. (2022), die das Prototypsystem „AirChain“ beschrieb. Allerdings konzentrierte sich dieses Konzept vor allem auf die allgemeine Machbarkeit einer privaten Blockchain zur Speicherung von Wartungsereignissen. Zentrale Fragestellungen, wie die Gewährleistung von Datenschutz, Datenintegrität und regulatorische Anforderungen, blieben weitgehend unbeantwortet. Weitere akademische Arbeiten, etwa von Efthymiou et al. (2022), unterstrichen das grundsätzliche Potenzial der Blockchain-Technologie in der Luftfahrt-MRO-Branche, blieben jedoch ebenfalls auf konzeptioneller Ebene und adressierten nicht die komplexen Anforderungen, denen sich das RAPADO-Projekt bereits intensiv widmete.

Parallel zur akademischen Forschung wurden im Laufe des Projektes auch mehrere kommerzielle Initiativen bekannt. So startete die ITA bereits 2020 die „MRO Blockchain Alliance“ mit dem Ziel, eine digitale Infrastruktur zur Verwaltung von Wartungsdaten anzubieten. Jedoch verzögerte sich die Einführung ihres Produkts erheblich, da die potenziellen Kunden aus der Luftfahrtindustrie aufgrund ungeklärter Fragen des Datenschutzes und der Hoheit über sensible Daten zurückhaltend reagierten. Ähnliche Schwierigkeiten begegneten Honeywell, dessen ursprünglich angekündigte Blockchain-Lösung trotz anfänglicher Kooperationen nicht erfolgreich etabliert werden konnte. Die Herausforderungen bestanden vor allem darin, dass existierende Lösungen Datenschutzanforderungen nicht umfassend erfüllen konnten und die Integration in bestehende Prozesse unklar blieb. Andere Anbieter wie ProvenAir und SkyThread entwickelten ebenfalls Blockchain-basierte Lösungen zur Digitalisierung von Wartungsdokumentationen, konnten jedoch nur begrenzt überzeugen, da konkrete und effiziente Strategien zur Integration von bestehenden analogen Dokumenten fehlten. Diese Beobachtungen zeigten deutlich, dass der vom RAPADO-Projekt verfolgte Ansatz, der eine umfassende Digitalisierungslösung in Verbindung mit fortschrittlichen Validierungsmechanismen wie Zero-Knowledge-Proofs und automatisierter OCR-Erfassung verfolgte, weiterhin einzigartig und dringend benötigt blieb.

Zum Ende des Projektzeitraums wurden weitere akademische Arbeiten veröffentlicht, die erneut bestätigten, dass das Potenzial der Blockchain-Technologie für die

Luftfahrtindustrie zwar allgemein anerkannt wurde, konkrete Umsetzungskonzepte für spezifische Anforderungen der MRO-Dokumentation jedoch fehlten. Veröffentlichungen von Cooper (2023) sowie Ibrahim und Fernando (2023) stellten Blockchain als relevante Innovation für Transparenz und Sicherheit im Luftfahrtsektor heraus, gingen jedoch kaum über konzeptionelle Aussagen hinaus. Insbesondere fehlten weiterhin detaillierte technische Ansätze zur Umsetzung der regulatorischen Anforderungen und Datenschutzfragen, die das RAPADO-Projekt inzwischen umfassend behandelte und testweise realisierte.

Auch auf kommerzieller Ebene zeichneten sich gegen Ende des Projektzeitraums keine Lösungen ab, die das umfassende Leistungsportfolio der RAPADO-Plattform hätten gefährden können. Anbieter wie ProvenAir und SkyThread erweiterten zwar ihre Markpräsenz, konnten aber nur teilweise Akzeptanz erzielen, da ihre Lösungen entweder zu marketingorientiert blieben oder die kritischen Herausforderungen der MRO-Branche nur ansatzweise adressierten. Eine neu angekündigte Initiative von FPT Software in Zusammenarbeit mit Airbus beschäftigte sich primär mit KI-basierten Analysen und zeigte keine direkte Konkurrenz im Bereich Blockchain-basierter Dokumentation. Insgesamt wurde erneut bestätigt, dass existierende kommerzielle Lösungen zwar einzelne Teilbereiche abdeckten, jedoch keine umfassende, regulatorisch akzeptierte und datenschutzfreundliche Lösung boten.

Im Verlauf des gesamten Projektzeitraums wurden kontinuierlich neue Erkenntnisse und Aktivitäten Dritter beobachtetbitte schr, die jedoch die Relevanz und Innovationskraft des RAPADO-Ansatzes bestätigten, statt ihn in Frage zu stellen. Die umfangreichen Betrachtungen zeigten, dass der entwickelte Lösungsansatz mit integrierter OCR-Digitalisierung, einer verteilten und manipulationssicheren Speicherung der Daten sowie einer datenschutzkonformen Validierung nach wie vor einzigartig und technologisch führend ist. Die identifizierten Herausforderungen und Lücken bei anderen Lösungen bestärkten die ursprüngliche Zielsetzung und unterstrichen zugleich die Bedeutung der im RAPADO-Projekt erzielten Forschungsergebnisse und technischen Entwicklungen.

II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Die im Projekt RAPADO erzielten Ergebnisse wurden in vielfältiger Form wissenschaftlich aufgearbeitet und in Form von Fachartikeln, Präsentationen, Abschlussarbeiten sowie technisch-programmierten Artefakten veröffentlicht bzw. sind zur Veröffentlichung vorgesehen. Die wissenschaftlichen Arbeiten decken ein breites Spektrum ab – von der Erforschung grundlegender theoretischer Konzepte bis hin zur detaillierten Untersuchung spezifischer technischer Lösungen für die Luftfahrtindustrie. Die Veröffentlichung der Projektergebnisse dient nicht nur dem wissenschaftlichen Diskurs, sondern erhöht auch die Sichtbarkeit der erzielten Forschungsergebnisse innerhalb der akademischen Gemeinschaft und der Industrie.

Ein Teil der Ergebnisse wurde bereits erfolgreich veröffentlicht. So erschien der Artikel „Wahrung der Privatsphäre in Blockchain-basierten Anwendungen“ in der Fachzeitschrift „HMD – Praxis der Wirtschaftsinformatik“, der sich mit den

Herausforderungen des Datenschutzes und der Privatsphäre in verteilten Blockchain-Netzwerken befasst und wichtige konzeptionelle Grundlagen liefert, die im RAPADO-Projekt aufgegriffen und weiterentwickelt wurden. Weiterhin wurde der Beitrag „Enabling Sustainability Due Diligence in Value Chains Through DLT-Based Governance“ sowohl als Paper als auch im Rahmen einer Präsentation auf der Konferenz ECEIS 2024 vorgestellt. In diesem Beitrag wird aufgezeigt, wie Distributed-Ledger-Technologien (DLT) und Token Curated Registries (TCRs) zu einer verbesserten Kontrolle in Wertschöpfungsketten führen können, was einen wertvollen Transfer für Herausforderungen im Luftfahrt-MRO-Bereich ermöglicht.

Darüber hinaus wurden drei weitere wissenschaftliche Artikel bereits verfasst und befinden sich im Review-Prozess oder werden in 2025 eingereicht. Der Artikel „Quantifying Blockchain Decentralization“ beschäftigt sich mit der methodischen Messung und Operationalisierung des Dezentralisierungsgrades von Blockchain-Netzwerken. Eine Veröffentlichung erfolgt voraussichtlich im Journal „MDPI – Blockchains“. Der Beitrag „Enabling Data-Protecting Verification of Aviation MRO Data“, der detailliert auf die Anwendung von Zero-Knowledge-Proofs im Luftfahrtkontext eingeht, befindet sich in Begutachtung und soll voraussichtlich bei „The Institution of Engineering and Technology“, im Special Issue – „Blockchain-Assisted Secure Data Sharing and Access Control“ veröffentlicht werden. Weiterhin wird im Artikel „Effects of Blockchain Governance on Network Stability and Growth“ untersucht, wie sich unterschiedliche Governance-Mechanismen auf die Stabilität und das Wachstum von Blockchain-Netzwerken auswirken. Eine Publikation dieses Artikels ist im Fachjournal „Cryptoeconomic Systems, Volume 4, Issue 1: 2025“ vorgesehen. Zusätzlich entstanden aus den Projekterfahrungen zwei weitere Forschungsarbeiten, die insbesondere datenschutzrechtliche Herausforderungen adressieren. Die Arbeit „Synthetic Data as a Tool for Reconciling Privacy with Progress: An EU Regulatory Perspective“, eingereicht für CPCD.ai 2025, analysiert die Potenziale synthetischer Daten zur Verbesserung des Datenschutzes in sensiblen Datensätzen sowie deren regulatorische Einordnung im europäischen Kontext. Die zweite Arbeit mit dem Titel „Beyond Privacy and Utility: Measuring Fairness for Synthetic Data“, eingereicht für ECIS 2025, untersucht Metriken zur Bewertung der Privatsphäre und Nutzbarkeit synthetischer Daten sowie die daraus abgeleiteten Implikationen für Anwender und Datenbereitsteller. Beide Arbeiten erweitern die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse um wichtige Perspektiven hinsichtlich Datenschutz und Datenqualität und liefern somit relevante Beiträge für zukünftige Forschungs- und Anwendungsfelder.

Zusätzlich zu diesen Fachartikeln wurden zahlreiche Ergebnisse im Rahmen akademischer Abschlussarbeiten an der Freien Universität Berlin weiter vertieft und praktisch umgesetzt. Dabei entstanden drei Masterarbeiten: „Zero-Knowledge Proof Algorithms: A Systematic Literature Review and Application in the Aviation Industry“, „Implementation of Zero-Knowledge Proof Protocols for the Validation of Aircraft Part Certificates“ sowie „Operationalizing the Decentralization Degree of Blockchain Networks Using a Statistical Reference Model“. Jede dieser Arbeiten vertieft spezifische Aspekte der RAPADO-Forschung, insbesondere im Bereich der sicheren Validierung und der Operationalisierung von Dezentralisierungsgraden. Darüber hinaus entstand in einem agilen Wirtschaftsinformatik-Projekt mit Masterstudierenden

ein umfassender Projektreport, der neben der Entwicklung wichtiger technischer Artefakte detaillierte Einblicke in deren Implementierung bietet.

Weiterhin wurden drei Bachelorarbeiten im Rahmen des Projekts angefertigt: „Quantifying Decentralization in Public Blockchain Networks: A Continuous Data Scraping Algorithm“ entwickelte einen Algorithmus zur kontinuierlichen Erhebung von Blockchain-Netzwerkdaten, „Blockchain Governance for Industrial Applications“ untersuchte Governance-Modelle speziell für industrielle Anwendungen und „Von analog zu digital: Effiziente Transformation der MRO-Dokumentation mittels Python und Open-Source-OCR-Software“ beschäftigte sich intensiv mit den technischen Details der Digitalisierung analoger Dokumente.

Im Rahmen von Doktorandenkolloquien wurden weitere wissenschaftliche Arbeiten vorgestellt, die zum Forschungsdiskurs beitrugen und auf besonderes Interesse der wissenschaftlichen Gemeinschaft stießen. Dazu zählen die Beiträge „Blockchain in Supply Chain Application – State of the Art Review“, „Zero Knowledge Proofs for Secure Data Verification“ sowie „Parameters and Metrics for Assessing Blockchain Network Properties“.

Neben diesen akademischen Veröffentlichungen wurden auch zahlreiche technisch-programmierte Artefakte geschaffen, die der praktischen Umsetzung der Forschungsergebnisse dienen und der Öffentlichkeit über das GitHub-Repository der Freien Universität Berlin zugänglich gemacht wurden. Zu den wichtigsten Artefakten zählen:

- **RAPADO_MRO_DAPP**: Ein Proof-of-Concept (POC) einer Blockchain-basierten Applikation, die ein verteiltes Dateisystem nutzt und selektiven Zugriff sowie sichere Validierung von Zertifikaten ermöglicht.
- **Decentralization_Model**: Ein Algorithmus, der speziell zur Messung, Quantifizierung und Simulation von Netzwerkkonfigurationen hinsichtlich des Dezentralisierungsgrades entwickelt wurde.
- **Quantifying_Decentralization**: Ein Data-Scraping-Algorithmus, der Netzwerkdaten populärer Blockchains kontinuierlich sammelt, um Benchmarking und vergleichende Analysen zu ermöglichen.
- **MRO_Certificate_Validation**: Ein Softwareartefakt zur Zertifikatsvalidierung auf Basis von zkSNARKs unter Nutzung des Groth16-Algorithmus, mit dessen Hilfe Signaturen und Dokumententypen verifiziert werden können.
- **MRO_DOCS_Verification**: Eine weiterführende Blockchain-basierte Anwendung zur selektiven Validierung von Wartungsdaten, die ebenfalls zkSNARKs verwendet, jedoch den PLONK-Algorithmus nutzt.
- **OCR_MRO_Docs**: Ein entwickelter Workflow und Programm zur Digitalisierung analoger MRO-Dokumente mittels Open-Source-OCR-Software.

Durch diese Kombination aus wissenschaftlichen Publikationen und technischen Artefakten stellt das RAPADO-Projekt eine umfangreiche, sowohl wissenschaftlich als auch praktisch wertvolle Sammlung von Ergebnissen bereit, die als Grundlage für

weitere Forschungen und als Impulsgeber für die industrielle Praxis dienen. Die wissenschaftlichen Arbeiten im Überblick:

Bereits veröffentlicht:

- Zedel & Kliewer (2022). Wahrung der Privatsphäre in Blockchain-basierten Anwendungen. *HMD – Praxis der Wirtschaftsinformatik.*
- Zedel & Eppler (2024). Enabling Sustainability Due Diligence in Value Chains Through DLT-Based Governance. *ECEIS 24 Proceedings.*

Noch nicht veröffentlicht (eingereicht bzw. in Review):

- Zedel & Kliewer (in Review). Quantifying Blockchain Decentralization. Voraussichtlich in: *MDPI - Blockchains.*
- Zedel & Kliewer (in Review). Enabling Data-Protecting Verification of Aviation MRO Data. Voraussichtlich in: *The Institution of Engineering and Technology – Blockchain-Assisted Secure Data Sharing and Access Control.*
- Zedel & Kliewer (in Review). Effects of Blockchain Governance on Network Stability and Growth. Voraussichtlich in: *Cryptoeconomic Systems*, Volume 4, Issue 1: 2025.
- Kämpf, Perez, Rößler-von Saß, Kliewer (in Review). Synthetic Data as a Tool for Reconciling Privacy with Progress: An EU Regulatory Perspective. Eingereicht für CPCD.ai2025.
- Kämpf, Perez, Rößler-von Saß, Conde, Kliewer (in Review). Beyond Privacy and Utility: Measuring Fairness for Synthetic Data. Eingereicht für ECIS 2025.

Studentische Arbeiten (an der Freien Universität Berlin)

- Project on Analytical Information Systems (WS 2021/2022): Creation of a Framework for the Authenticated, Encrypted and Validated Storage of Aircraft Spare Parts Documentation.
- Master Thesis (2022): Implementation of Zero-Knowledge Proof Protocols for the Validation of Aircraft Part Certificates.
- Master Thesis (2023): Zero-Knowledge Proof Algorithms: A Systematic Literature Review and Application in the Aviation Industry.
- Master Thesis (2023): Operationalizing the Decentralization Degree of Blockchain Networks Using a Statistical Reference Model.
- Bachelor Thesis (2024): Quantifying Decentralization in Public Blockchain Networks: A Continuous Data Scraping Algorithm.
- Bachelor Thesis (2024): Blockchain Governance for Industrial Applications.
- Bachelor Thesis (2024): Von analog zu digital: Effiziente Transformation der MRO-Dokumentation mittels Python und Open-Source-OCR-Software.