

Runway independent automatic launch and landing system

PB-Nr.: FST-PB-2021-302

Abschlussbericht

ZE: Technische Universität Hamburg Ansprechpartner: Prof. Dr.-Ing. Frank Thielecke	Förderkennzeichen: 03VNE1017F
Vorhabenbezeichnung: Landebahn-unabhängiges automatisches Start- und Landesystem für unbemannte Luftfahrzeuge – REALISE	
Laufzeit des Vorhabens: 1.10.2017–31.12.2020	
Berichtszeitraum: 1.1.2017–31.12.2020	

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	3
2	Aufgabenstellung, Voraussetzungen, Planung und Stand der Wissenschaft/Technik	6
2.1	Aufgabenstellung und Gesamtziel des Teilvorhabens.....	6
2.2	Planung	7
2.3	Stand der Wissenschaft und Technik (einschließlich alternative Lösungen, der Ergebnisverwertung entgegenstehende Rechte, Informationsrecherchen)	7
3	Wissenschaftliche / technische Ergebnisse.....	8
3.1	Entwicklungsplattform (AP0.2).....	8
3.2	Systeme/Sensorik (AP1.3).....	14
3.3	Flugversuchsträger (AP1.4).....	16
3.4	Simulation (AP2.1).....	17
3.5	Automatisierung (AP2.2)	20
3.6	Laborversuche (AP3.1).....	20
3.7	Flugversuche (AP3.2).....	22
3.8	Zertifizierung (AP4.1).....	29
3.9	Geschäftsmodellentwicklung, Analyse, Bewertung, CBA (AP4.2 mit AP4.3).....	31
3.10	Andere wesentliche Ereignisse	40
3.11	Relevante F&E Ergebnisse Dritter.....	40

1 Zusammenfassung

Die TUHH hat ihre Projektziele nahezu vollumfänglich erfüllt. Lediglich für das Ziel 4.) „Demonstration und Validierung des Konzepts in realen Flugversuchen zusammen mit den Verbundpartnern.“ konnte ein Teilziel knapp nicht erreicht werden: Eine finale Landung mit den UAV der TUHH konnte aufgrund der zeitverzögernden Auswirkungen der Coronavirus-Pandemie knapp nicht mehr realisiert werden.

Abgesehen hiervon wurden alle Ziele vollumfänglich erreicht. Es sind dabei folgende Ergebnisse seitens der TUHH erzielt worden:

- AP0.2: Entwicklungsplattform
Das Arbeitspaket 0.2 wurde im Rahmen von Unterbeauftragungen der Thelsys GmbH durch die TUHH umgesetzt. Die Ziele des AP0.2 wurden vollumfänglich erreicht.
 - Ziel 1: Es wurde eine Entwicklungsplattform für die integrierte Projektarbeit in REALISE erstellt. Die Plattform erzielte dabei folgende Ergebnisse:
 - Es erfolgte eine abgestimmte Berechnung und technische Auslegung des REALISE-Systems.
 - Die Arbeiten am Geschäftskonzept, insbesondere die Abschätzung und Variation der Kostensituation, wurden unterstützt.
 - Die auf REALISE zugeschnittene Entwicklungsplattform wurde erweitert und ist in generalisierter Form auch für weitere F+E-Projekte, insbesondere im Rahmen von Verbundvorhaben von oder mit KMU, verfügbar (siehe auch.
 - Ziel 2: Die einzelnen Arbeitsergebnisse der Projektpartner konnten durch die in AP0.2 geleisteten Tätigkeiten in einer engen Abstimmung zueinander erfolgen. Auf diese Weise wurde die Integration der Partnerbeiträge in das Gesamtsystem und dessen Funktions- und Leistungsfähigkeit erleichtert.
 - Ziel 3: Die technische Projektarbeit wurde durch regelmäßige Integrations- und Abstimmungsinitiativen unterstützt. Insbesondere wurden insgesamt acht moderierte Workshops zur Entwicklung und Optimierung des REALISE-Systems durchgeführt. Hierbei wurden erfolgreich Verfahren und Ansätze der hochintegrierten Projektarbeit eingesetzt.

Mit der Erfüllung aller drei AP-Ziele wurde das Projekt-Gesamtziel „Etablieren einer virtuellen, digitalen Entwicklungsplattform zur effizienten, barrierefreien und multidisziplinären Zusammenarbeit zwischen den heterogenen Akteuren“ vollumfänglich erreicht.

- 1.) Für die Erarbeitung eines Geschäftsplans wurde die Kostenseite mithilfe des in AP0.2 erstellten Kostenmoduls unterfüttert. Die Projektarbeiten wurden am Ende des Projekts in Form von „Lessons learned“ analysiert. Dabei wurden zum einen das technische Verbesserungspotential analysiert und dokumentiert, zum anderen die Erkenntnisse auf Projektebene zusammengetragen. Die einzelnen Punkte dieser Analyse werden im Zuge der weiter stattfindenden Entwicklungsarbeit konsequent adressiert und umgesetzt.
- Die TUHH hat das Gesamtziel 1.) „Aufbau und Betrieb eines HAPS-ähnlichen Flugversuchsträgers“ vollumfänglich erfüllt:
 - AP1.3: Systeme/Sensorik:

- Die verwendeten Systeme und die Sensorik erfüllen alle gestellten Anforderungen.
 - Die entwickelte „Distributor“-Software erweitert vorhandene Werkzeugketten zur Vorbereitung, Durchführung und Auswertung von virtuellen und realen Flugversuchen für das konkrete Anwendungsszenario „Landung auf einem bodengebundenen Start- und Landesystem“.
- AP1.4: Flugversuchsträger
 - Die HAPS-ähnlichen Flugversuchsträger sind betriebsbereit und in Versuchen eingesetzt worden
- Die TUHH hat die Gesamtziele 2.) „Aufbau einer entwicklungsbegleitenden Gesamtsystemsimulation“ und 3.) „Demonstration des Konzepts in virtuellen Flugversuchen“ vollumfänglich erfüllt:
 - AP2.1: Simulation
 - Methoden und Werkzeugketten wurden durch Monte-Carlo-Simulation und Worst-Case-Optimierung erweitert.
 - Flexible Flugzeugstrukturen können in der Kontaktmodellierung berücksichtigt werden.
 - Die Anforderungen an die Flugbahnregelung und -führung konnten in virtuellen Flugversuchen untersucht werden
 - AP2.2: Systemautomation
 - Ein entwickelter Zustandsautomat ermöglicht neben vollautomatischen Landungen die Erkennung und Einleitung von Notfallprozeduren
- Die TUHH hat die Gesamtziel 4.) „Demonstration des Konzepts in realen Flugversuchen“ nahezu vollumfänglich erfüllt:
 - AP3.1: Laborversuch
 - Hardware-In-The-Loop Versuche mit Motorprüfstand erfolgreich
 - AP3.2: Flugversuche
 - Wiederholte sichere UAV-Starts vom Bodensystem
 - Telemetrie zwischen UAV und Bodensystem im Flugversuch validiert
 - Synchronisation mit Bodensystem in Vielzahl an tiefen manuellen An- & Überflügen
 - Finale Landung aufgrund Coronavirus-Pandemie knapp nicht erreicht
 - Wahrscheinliche Realisierbarkeit einer Landung für manuelle Anflüge durch erzielte Ergebnisse demonstriert.
- Die TUHH hat das Gesamtziel 5) Roadmap für die land- und luftseitige Zertifizierung/Zulassung erfüllt, indem mit den Partnerunternehmen AviaCert GmbH und TÜV Rheinland GmbH entsprechende Dokumente erarbeitet wurden (AP4.1).
 - Zulassung und Zertifizierung: Rechtliche Bewertung im Rahmen des Vorhabens REALISE
 - Sicherheitsbetrachtungen zu unbemannten Luftfahrzeugen mit bodengebundenem Fahrwerk im Rahmen des Forschungsprojektes REALISE
 - Zeitstrahl UAS Regulations Stand 2020
 - Betrachtung der Systeme und Sicherheitsarchitektur für den Fernbetrieb eines Landesystems mit UAV bis 25 kg

- Review der System- und Sicherheitsarchitektur, Gefährdungs- und Risikoanalyse
- Zusammenstellung der relevanten normativen und gesetzlichen Anforderungen des Schienensystems
- Die Gesamtziel 6) Kosten-Nutzen-Analyse für das Bodenfahrwerkssystem sowie 7) Bewertung der Ergebnisse und des gesellschaftlichen Nutzens wurde erfüllt, indem der Nutzwert im Kontext unterschiedlicher Anwendungsfälle individuell bewertet wurde. (AP4.2 und AP 4.3)
 - Studie: UAV Bodenfahrwerkssystem - Marktpotenzial, Anforderungen an System und Umfeld, Wettbewerbsanalyse
 - Use Case Sammlung für mehr als 100 prinzipiell geeignete Subanwendungsfälle
 - Use Case Bewertungen für den Einsatz schienenbasierter Start-/Landesysteme für Fixed Wing UAVs
 - Airborne Wind Energy
 - Cargo-Transport
 - Fire Spotting und andere Katastrophenschutzfernerkundung
 - High Altitude Pseudo Satellites
 - Surveillance
 - Communications
 - Ausgedehnte, lineare Energieinfrastrukturen
 - Pipelines
 - Stromnetz
 - Bahnnetz inkl. Oberleitungen
 - Maritime Surveillance
 - Grenzschutz
 - Emissionsgrenzwerte
 - Fischereiüberwachung
 - Analyse von alternativen wettbewerblichen UAS-Technologien
 - Detaillierte Kosten-Nutzen Analyse am Beispiel von Energieinfrastrukturanlagen wurde erstellt
 - Missionsplanung
 - Routenführung
 - Konfigurationsoptimierung des multi-UAS Systems
 - Automatisierungskonzept
 - Kostenmodellierung
 - Ausarbeitung einer Empfehlung zur Unternehmenstruktur und Wertschöpfungskette
- Die TUHH hat das Gesamtziel 8.) „Veröffentlichung im Rahmen wissenschaftlicher Konferenzen“ vollumfänglich erfüllt:
 - Veröffentlichung auf internationaler Konferenz „CEAS EuroGNC 2019“
 - Geplante Veröffentlichung auf internationaler Konferenz „2022 AIAA AVIATION Forum“

2 Aufgabenstellung, Voraussetzungen, Planung und Stand der Wissenschaft/Technik

2.1 Aufgabenstellung und Gesamtziel des Teilvorhabens

Im Hinblick auf eine effiziente und umweltfreundliche Luftfahrt, die den ambitionierten Emissionszielen des „Flightpath 2050“ gerecht werden kann, werden radikal neue Konzepte und disruptive Technologien benötigt. Ein bodengebundenes Start- und Landesystem „GroLaS“ (Ground-based Landing Gear System) birgt durch das emissionsfreie Taxiing, die Unterstützung beim Start und die Bremsenergierückgewinnung bei der Landung sowie mittelbar durch die flugzeugseitigen Gewichtseinsparungen ein erhebliches Potential zum Erreichen der gesteckten Umweltziele. Neben der kurz- und mittelfristigen Verwertungsperspektive im UAV-Markt (Schritt 1, Abbildung 1), stellt das KMU-Verbundprojekt REALISE einen bedeutenden Entwicklungsschritt dieser disruptiven Technologie auf dem Weg zur Anwendung in der Verkehrsluftfahrt dar.

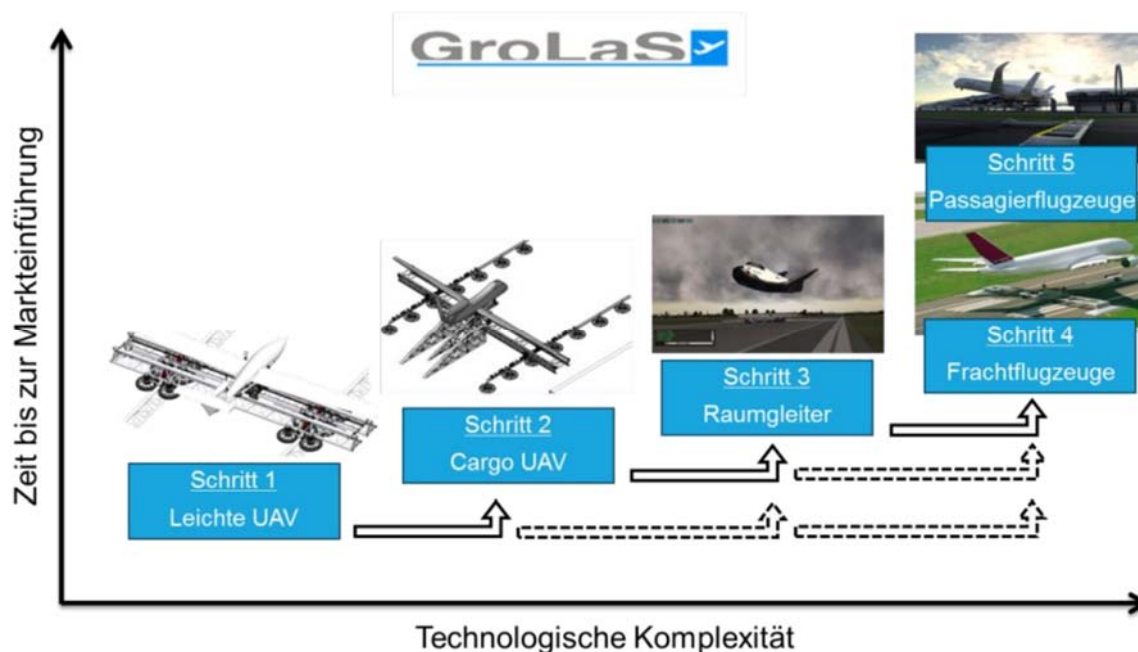


Abbildung 1: Verwertungsperspektive für das GroLaS Technologiekonzept

Forschungsschwerpunkte des TUHH-Instituts für Flugzeug-Systemtechnik waren der Aufbau einer echtzeitfähigen Gesamtsystemsimulation und die virtuelle Flugversuchsdurchführung (Software-in-the-Loop) sowie das Einbinden von Hardwarekomponenten für die Regelung/Steuerung und Aktuatorik. Weiterhin wurde ein großes UAV (7-10m Spannweite) mit HAPS-ähnlichen Flugeigenschaften für eine marktrelevante Erprobung aufgebaut. Das Institut führte iterative Optimierungen durch und unterstützt bei der Systemauslegung. Die Arbeiten stellten einen entscheidenden Beitrag zum Nachweis der Funktionsfähigkeit und zur abschließenden flugzeugseitigen Gesamtsystembewertung des Technologiekonzeptes dar. Aufgaben des TUHH-Instituts für Lufttransportsysteme war das Aufstellen einer konkreten Roadmap zur luft- und landseitigen Zulassung/Zertifizierung (luftseitig unterstützt vom DLR und landseitig vom TÜV), die objektive/unabhängige Geschäftsmodellplanung (Unteraufträge zur Marktanalyse an Dronell und für die Öffentlichkeitsarbeit an Hamburg Aviation) sowie die Bewertung der Ergebnisse des REALISE-Vorhabens. Die TUHH sollte damit einen wesentlichen Beitrag zum ersten Schritt der Technologie-Realisierungsphase leisten.

Die Ziele des Teilvorhabens der TUHH im Einzelnen waren:

- 1) Aufbau und Betrieb eines HAPS-ähnlichen Flugversuchsträgers (7-10m Spannweite, Gewicht unter 25kg)
- 2) Aufbau einer entwicklungsbegleitenden Gesamtsystemsimulation: Entwicklung eines Streckenmodells des Versuchsträgers (Modellierung der Aerodynamik, des Antriebs und der Masseeigenschaften sowie Aufbau einer flugmechanischen Simulation mit Schnittstellen zu Modellkomponenten der Verbundpartner) und die Integration von Modellkomponenten der Verbundpartner zur echtzeitfähigen Gesamtsimulation.
- 3) Die Demonstration und Validierung des Konzepts auf Basis der Gesamtsystemsimulation in virtuellen Flugversuchen (MITL, SITL, Mixed-Reality/HITL Echtzeit-Simulationen) zusammen mit den Verbundpartnern.
- 4) Die Demonstration und Validierung des Konzepts in realen Flugversuchen zusammen mit den Verbundpartnern.
- 5) Die Erarbeitung und Abstimmung einer Roadmap für die land- und luftseitige Zertifizierung/Zulassung.
- 6) Das Aufstellen einer Kosten-Nutzen-Analyse für das Bodenfahrwerkssystem vom UAV.
- 7) Die Bewertung der Ergebnisse und des gesellschaftlichen Nutzens eines Bodenfahrwerkssystems für die Verkehrsluffahrt im Lufttransportgesamtkontext.

Die Veröffentlichung der Ergebnisse im Rahmen wissenschaftlicher Konferenzen und Zeitschriften.

2.2 Planung

Auf Grund von durch die Corona Pandemie hervorgerufenen Verzögerungen wurde die Projektlaufzeit bis Ende 2020 verlängert.

2.3 Stand der Wissenschaft und Technik (einschließlich alternative Lösungen, der Ergebnisverwertung entgegenstehende Rechte, Informationsrecherchen)

In der Luftfahrtgeschichte gab es mehrere Flugzeuge, die ohne Fahrwerk betrieben wurden. Grundsätzlich können die gefundenen Lösungen in zwei Gruppen untergliedert werden: Die flugzeugseitig und die bodenseitig installierten Lösungen. Flugzeugseitige Lösungen enthalten z.B. die Messerschmitt Me 163 "Komet" und the Arado Ar 234 "Blitz" aus dem zweiten Weltkrieg sowie Boeing's „PhantomEye“ (derzeit in Entwicklung). Die genannten Flugzeuge starten von einem Wagen und landen auf einer Kufe. Bodenseitig installierte Lösungen enthalten z.B. das Electromagnetic Aircraft Launch System (EMALS) der US Navy für den Start von Flugzeugen auf Flugzeugträgern oder Startrampen für UAV (z.B. KZO Raketenstartrampe, EMT's Luna Katapultstartrampe usw.). Diese und ähnliche Lösungen konzentrieren sich auf den Start und hauptsächlich auf militärische Anwendungen, während GroLaS Start und Landung für zivile UAVs (REALISE-Vorhaben), Wiedereintritts-Raumgleiter und Verkehrsflugzeuge adressiert. Aufgrund des technologischen Fortschrittes (insbesondere im Antrieb, der Sensorik und Regelungstechnik) kann GroLaS eine einzigartige Lösung für eine wesentlich nahtlosere Integration in den modernen Flugbetrieb heutiger LFZ bieten und repräsentiert – dokumentiert durch die Patentsituation – einen signifikanten Vorsprung auf den bisherigen Stand der Technik.

Dem Verbundpartner mb+Partner wurden bereits für das technische Konzept des Bodenfahrwerkssystems GroLaS diverse Patente erteilt (Europa: 2 282 938; USA: 8,485,468; China: ZL 200980116651.4).

3 Wissenschaftliche / technische Ergebnisse

3.1 Entwicklungsplattform (AP0.2)

Zum Projektbeginn wurden die wichtigsten Werkzeuge, die auf der Basis bereits absolvierter Forschungsprojekte und durch die Kopplung der Verfahren der beteiligten Partner, in erster Linie MBP und TUHH-FST, bereits verfügbar waren, miteinander zu einem Entwicklungsprozess verknüpft (Abbildung 1).

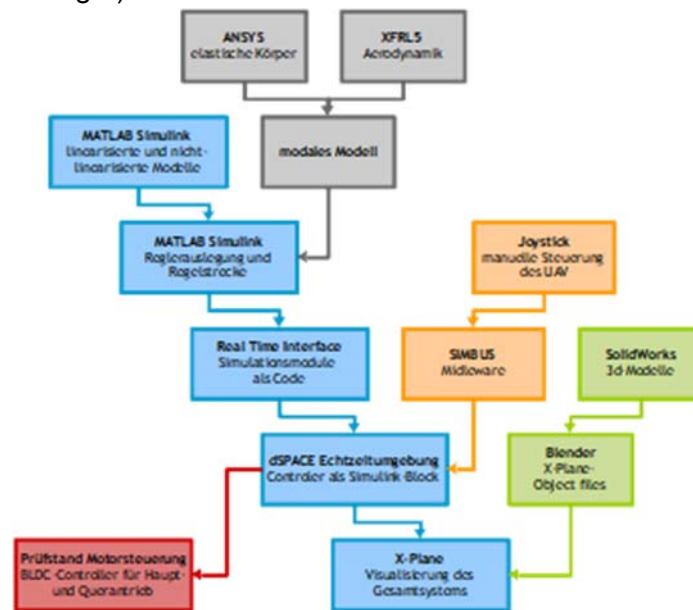


Abbildung 1: Schematischer Entwurfsprozess von REALISE

Bei REALISE musste die integrierte Zusammenarbeit und die Entwicklungsplattform parallel zu den jeweiligen laufenden Projektarbeiten aufgebaut und weiterentwickelt werden. Gleichzeitig durfte das Zusatzziel der Verwertungsperspektive über die Laufzeit des Projekts REALISE erfüllt werden.

Für REALISE wurde daher ein zweiteiliger strategischer Ansatz gewählt. Zum einen erfolgte der bedarfsgetriebene Aufbau der Entwicklungsplattform für das Projekt selber sowie für die generalisierte, allgemein einsetzbare Plattform, zum anderen dienen Entwicklungs- und Optimierungsworkshops für die notwendige Abstimmung unter den Partnern.

Der Auf- und Ausbau der Entwicklungsplattform selbst erfolgte in drei Stufen (Abbildung 2):

- 1.) Die bereits vorhandenen Kompetenzen und Werkzeuge werden genutzt und möglichst schnell verknüpft, um die Arbeiten in REALISE von Anfang an zu unterstützen.
- 2.) Zusätzliche Module, die für REALISE die Integration, Optimierung und Bewertung unterstützen, werden im Laufe des Projekts entwickelt, so dass sie für HAP 4 zur Verfügung stehen.
- 3.) Die Erfahrungen aus REALISE werden analysiert und auf die Anforderungen einer generischen (allgemein einsetzbaren) KMU-Plattform übertragen. Der erreichte Stand wird dokumentiert und für andere KMU-Verbundvorhaben vorgehalten.

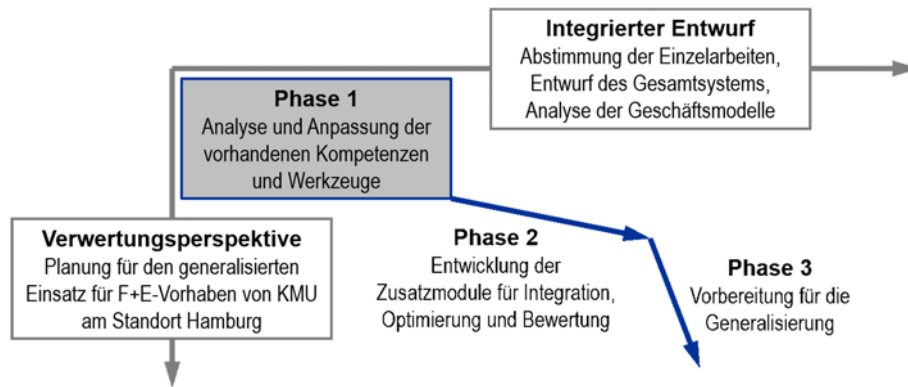


Abbildung 2: Schematischer Entwurfsprozess von REALISE

Ausgehend von einem generischen Modell einer umfassenden KMU-Entwicklungsplattform, so wie sie zu Projektstart skizziert war, wurde im Laufe der allgemeinen Entwicklungsarbeiten zum REALISE-System herausgearbeitet, welche Funktionalitäten im Projekt erforderlich sind, welche Module hierzu entwickelt werden müssen und welche Bestandteile der generischen KMU-Entwicklungsplattform damit verbunden sind (Abbildung 3).

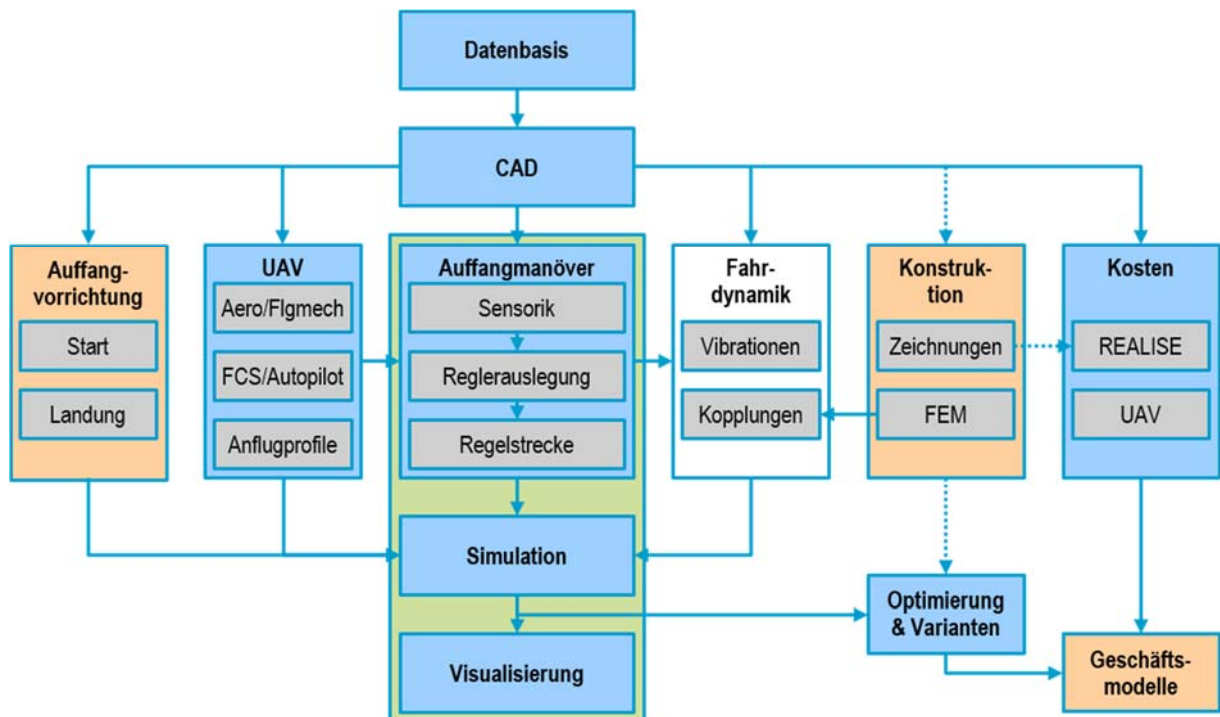


Abbildung 3: Modularer Aufbau der REALISE-Entwicklungsplattform

Letztendlich besteht die REALISE-Entwicklungsplattform aus folgenden rechnergestützten Modulen (in Abbildung 3 blau hinterlegt):

- Datenbasis: ermöglicht eine einheitliche und konsistente Datenhaltung. Projektpartner können hier aktuelle technische Projektdaten abholen und hier ihre eigenen Ergebnisse ablegen. Das REALISE-Datenmodul wird eine auf KMU-Belange angepasste Umsetzung des CPACS-Formats2 sein.

- CAD-Modul: stellt Modelle von Komponenten und Baugruppen für die Simulation und Visualisierung bereit und ist die Schnittstelle zur weiteren Konstruktion (diese ist nicht interaktiv rechnergestützt eingebunden).
- UAV-Modul: liefert die Daten, die zur Berechnung des UAVs und seinem Verhalten in der Simulation erforderlich sind. Das beinhaltet die flugmechanischen Werte (z.B. Derivativa) und Anflugprofile.
- Auffangmanöver: simuliert das Regelungsverhalten des REALISE-Systems, insbesondere die Ansteuerung der Motoren von Schlitten, Wagen und Azimut-einrichtung.
- Simulation: berechnet das Verhalten des Gesamtsystems in Abhängigkeiten von den Entwicklungsparametern und simuliert den Zeitverlauf eines Start- oder Landevorgangs.
- Visualisierung: stellt die Simulation graphisch dar und zeichnet den Zeitverlauf in Form eines „Films“ sowie alle relevanten Messwerte auf.
- Kostenmodul: ermöglicht die Abschätzung der Kostenauswirkung bei Änderungen von Systemparametern und bedient damit die Analyse und Bewertung von Geschäftsmodellen.
- Optimierung: unterstützt die Harmonisierung der REALISE-Systemkomponenten und die Anpassung des REALISE-Systems an geänderte Entwurfsvorgaben in der .

Weitere Arbeitsbereiche werden von der REALISE-Entwicklungsplattform mit Daten und/oder Ergebnissen unterstützt, wurden aber nicht interaktiv oder bi-direktional eingebunden (in Abbildung 3 rot hinterlegt):

- Auffangvorrichtung: berücksichtigt den dynamischen Start- und Auffangvorgang zwischen UAV und REALISE-System (Kontaktdynamik) und die entsprechende konstruktive Gestaltung der Auffangvorrichtung.
- Konstruktion: erstellt die Detailauslegungen und Fertigungszeichnungen, die zur Produktion von Komponenten bzw. Bestellung von Zulieferbauteilen erforderlich sind.
- Geschäftsmodelle: untersucht sinnvolle Anwendungs- und Einsatzbereiche für ein bodengestütztes Start- und Landesystem für UAV unter Berücksichtigung der entsprechenden Auslegungsparameter.

Das ursprünglich geplante Fahrdynamik zur Simulation des dynamischen Verhalten des Schlittensystems auf seiner Schienenbahn erwies sich als nicht erforderlich.

Neben der Anpassung und Einbindung der vorhandenen Module musste das Kostenmodul komplett neu und auf REALISE angepasst erstellt werden. Dabei waren zwei Arbeitsschritte erforderlich. Der erste Schritt war die Definition einer standardisierten Kostenstruktur auf der Basis des CPACS¹-Datenstandards, mit der das REALISE-Bodenfahrwerk, hier mit der allgemeinen Bezeichnung GroLaS für „Ground-based Landing gear System“, parametrisiert modelliert werden kann. Dies betrifft sowohl die technischen als auch die kostenspezifischen Parameter, die jeweils in zwei eigenen, neu definierten Zweigen der somit erweiterten CPACS-Struktur abgelegt werden (Beispiel für die technische Parameterstruktur in Abbildung 4)

¹ CPACS, das Common Parametric Aircraft Configuration Schema, ist ein Datenstandard für Luftfahrtsysteme, der vom DLR verwaltet wird und in der europäischen Forschung und Entwicklung weit verbreitet ist.

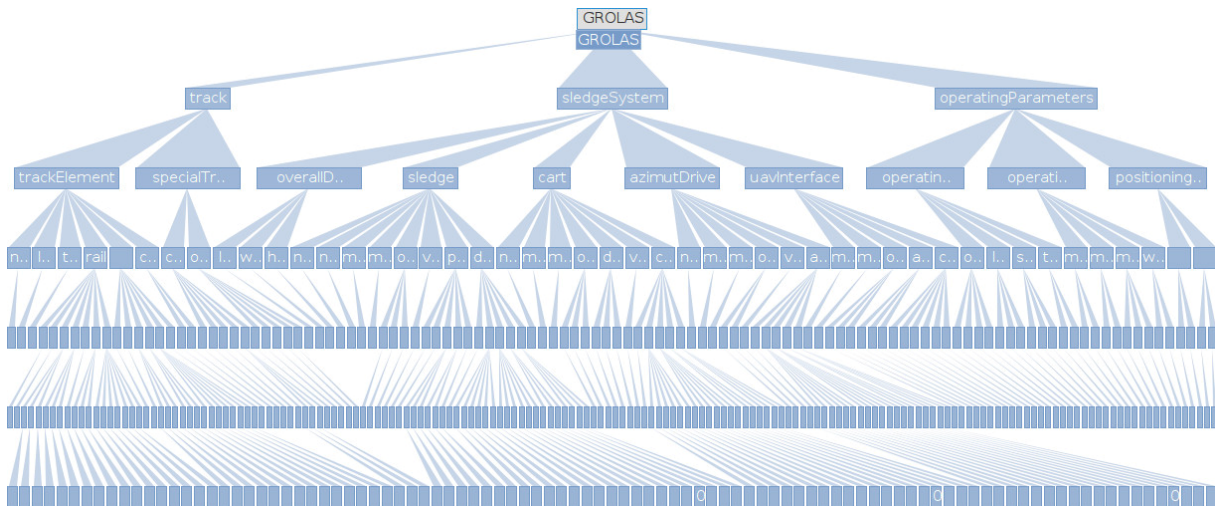


Abbildung 4: Technischer Parameterbaum des REALISE-Bodenfahrwerks in CPACS

Der zweite Schritt war das Erstellen eines Excel-basierten Kostentools, das die Abschätzung der Produktionskosten eines REALISE-Systems, also Schlitten, Schienenstrang und die weiteren Zubehörkomponenten, abhängig von der gewünschten Auslegung ermöglicht (Abbildung 5). Das Kostenmodul beinhaltet vertrauliche Daten der Produzenten, insbesondere mb+Partner und Nordwig). Es ist daher in der offenen und editierbaren Version nur diesen Firmen sowie Thelsys als Ersteller des Moduls zugänglich. Die REALISE-Partner können auf das Modul in abgesicherter Form zugreifen; die Verwaltung der Berechtigung liegt dabei bei mb+Partner.

GrolaS-Kostentool

Konfiguration

Kenndaten

Parameter	Größe	Wert	Einheit
UAV	max. Abfluggewicht	120	[kg]
Schienenbahn	Streckenlänge	140	[m]
	Streckenbreite	3	[m]
Leistung	installierte Leistung am Schlitten	120	[kW]
Drehmoment	verfügbares Drehmoment	200	[Nm]
Geschwindigkeit	max. Schlittenfahrgeschw.	18	[m/s]

-

-

-

-

Abschätzungen

Parameter	Kommentar	Wert	Einheit
Systemgewicht	bewegte Masse abh. vom MTOW	360	[kg]
Beschleunigung	Anfahren & Bremsen + 50m Sync.	3,60	[m/s ²]
Leistung Hauptantrieb	min. erforderliche Leistung	72,0	[kW]
Wirkungsgrad Hauptantrieb	effektiver Gesamtwirkungsgrad	50%	[%]

Systemkonfiguration

Schiennentyp	2-Punkt-Traverse
Untergrund	unbearbeitet
Crashelemente	ja - an beiden Enden
Antrieb	am Schlitten
Energieversorgung	Ladestation für Schlitten
Mobilität	Anhänger plus Zugfahrzeug

Auswahlmenüs

Schiennentyp	2-Punkt-Traverse
Untergrund	unbearbeitet
Crashelemente	ja - an beiden Enden
Antrieb	am Schlitten
Energieversorgung	Ladestation für Schlitten
Mobilität	Anhänger plus Zugfahrzeug

Kosten

Schiienenstrecke	Gesamt	2.012.000 €
	Schienensystem	1.800.000 €
	Untergrundvorbereitung	212.000 €
Schlittensystem	Gesamt	1.410.000 €
	Struktur	210.000 €
	Laufwerk	300.000 €
	Energiesystem	300.000 €
	Antriebssystem	400.000 €
	Sensorik und Regelung	200.000 €
Bodenequipment	Gesamt	1.000.000 €
	MMS	1.000.000 €
	Transport / mobile Bodenstation	1.000.000 €

Systempreis

2.012.000 €

Abbildung 5: Kostenmodul der REALISE-Entwicklungsplattform
(Kostenzusammenstellung aus Vertraulichkeitsgründen verpixelt)

Parallel zu dem Aufbau der für REALISE erforderlichen Funktionalitäten wurde das Projekt-Teilziel in Angriff genommen, die Grundlagen für eine generische Entwicklungsplattform für KMU in Hamburg zu schaffen. Im Gegensatz zu den Plattformen der Großforschung und der industriellen Schwergewichte in der Luftfahrt einerseits, und den teuren, hochspezialisierten Programmumgebungen kommerzieller Software-Firmen andererseits, sollte diese Plattform flexibel und kostengünstig sein, ohne signifikanten Trainings-/Schulungseinsatz für eine möglichst große Bandbreite an Anwendungen eingesetzt werden können und den Fokus auf eine möglichst pragmatische Unterstützung der Arbeiten legen.

Um ein tragfähiges Anforderungskonzept zu erstellen, das eine breite Einsatzfähigkeit ermöglicht und auf die speziellen Bedürfnisse von KMU abgestimmt ist, wurden von Mai 2019 bis November 2019 auf verschiedenen Ebenen etwa 60 Vertreter von mehr als 25 Unternehmen aus der Metropolregion Hamburg befragt. Insbesondere wurden in strukturierten Telefoninterviews bei 19 Unternehmen die Meinungen von Geschäftsführern, Niederlassungsleitern, Bereichs- oder Entwicklungsleitern und vergleichbare Positionen mit Verantwortung für die Zukunftsentwicklung des Unternehmens eingeholt. Die Ergebnisse der Befragung sind im Bericht „Anforderungsprofil einer generischen Entwicklungsplattform“ dargestellt. Kurz zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Erwartungen der KMU bezüglich der Analysefähigkeiten stark heterogen sind, viele KMU aber vor allem an Fähigkeiten interessiert sind, die in den späteren Phasen des Entwicklungsprozesses unterstützen (TRL² 5/6-9), wie Kostenschätzung, Referenzdaten und allgemeine Prozessunterstützung.

Die Befragung erfolgte kurz von dem Auftreten des Covid-19-Virus und der resultierenden Corona-Pandemie. Deren Auswirkungen haben das industrielle Umfeld, und insbesondere die Luftfahrt, schwer getroffen und die Rahmenbedingungen, unter denen auch Forschung und Entwicklung stattfinden, signifikant geändert. Deshalb wurde eine Auswahl der Gesprächspartner der oben skizzierten Befragung im Zeitraum Juni bis Oktober 2020 erneut kontaktiert und zu den Auswirkungen der Corona-bedingten Einschränkungen und Entwicklungen interviewt. (Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass zu diesem Zeitpunkt schon viele Faktoren und Trends ersichtlich waren, aber sich die Situation dynamisch weiterentwickelt und daher etliche der Resultate der zweiten Befragung vor diesem Hintergrund gesehen werden müssen.)

Kernaussagen seitens der KMU zu den Corona-Auswirkungen waren, werden hier kurz skizziert:

- Das grundlegende Interesse, das vor Covid-19 bei KMUs für F&E-Projekte und Innovationsvorhaben vorlag, ist durch die Krise durch andere Prioritäten verdrängt worden. Falls überhaupt sind Förderprogramme zu Forschung und Innovation in erster Linie noch interessant, weil sie als Finanzierungsmöglichkeit gesehen werden, wertvolle Mitarbeiter zu "parken" und damit zu halten.
- Nach dem Überwinden der Krise sehen die meisten KMUs über einen kurz- und mittelfristigen Zeitraum erst einmal keinen Bedarf nach neuen und verbesserten Produkten und Dienstleistungen. Stattdessen erwarten sie die Forderung nach zuverlässiger und günstiger Lieferung des bisherigen Produkts oder der gewohnten Leistung, sobald die Weltwirtschaft

² TRL: Technology Readiness Level. Hier wurde die TRL-Skala der Europäischen Union, Stand Rahmenprogramm „Horizon 2020“, zugrunde gelegt.

(https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2014_2015/annexes/h2020-wp1415-annex-g-trl_en.pdf)

und insbesondere der Luftverkehr wieder anspringen. Dementsprechend gering ist die aktuelle Bereitschaft, sich auf Forschungs-, Entwicklungs- und Innovationsvorhaben einzulassen, die nicht direkt und unmittelbar neue Einnahmequellen erschließen

- Es konnten zwei Ausnahmen von diesem Trend gefunden werden:
 - Etliche Unternehmen, die eine etablierte und aktive Mitwirkung in der geförderten Luftfahrtforschung haben, werden auch 2021 F&E-Projekte planen und Förderungen beantragen. Hierbei handelt es sich meist um größere Unternehmen mit eigenen Forschungsabteilungen, die regelmäßig von öffentlicher Förderung profitieren. Diese sind nicht die Zielgruppe für die Entwicklungsplattform.
 - Zumindest von zwei KMU ist bekannt, daß sie trotz der aktuellen Lage substantielle Innovationsvorhaben verfolgen. Eine Initiative plante dabei die Einreichung einer Projektskizze für den aktuellen Lufo-VI-2-Call, die nicht erfolgreich war. Die andere wird zur Zeit durch eigenes Geld finanziert und hat Mittel aus dem Zentralen Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) beantragt. Für beide Vorhaben (bei Förderung bzw. Neueinreichung) kann sich die KMU-Entwicklungsplattform als vorteilhaft erweisen.
- Das Interesse an der Entwicklung von V/STOL-fähigen Fluggeräten, mit denen (hybrid-) elektrisch 2 bis 8 Passagiere über kurze Strecken transportiert werden können, ist stark gewachsen. Hierbei handelt es sich in erster Linie um Potentialanalysen und Konzeptstudien auf unterschiedlichen Systemebenen - von der Komponentenentwicklung bis zu abstrakten Mobilitätsuntersuchungen. Damit wird der Bedarf an Lösungen zur Netzwerkanalyse und -planung, speziellen Werkzeugen zur Analyse von elektrischen Antrieben und Möglichkeiten zur Visualisierung von technischen und architektonischen Konzepten steigen.
- Das ursprüngliche Konzept setzte auf regelmäßige kollaborative Treffen des verteilten Entwurfsteams, wie sie sich auch in REALISE bewährt haben. Die Entwicklungsplattform sollte dafür in entsprechenden Projekträumen bei Forschungspartnern verfügbar gemacht, aber auch mobil zu anderen Einsatzorten transportiert werden können. Unter den Corona-Einschränkungen ist diese Art des Einsatzes zur Zeit nicht möglich. Eingeschränkt können webgestützte Kommunikationslösungen eingesetzt werden. Allerdings ist dieser Trend bislang nicht problemlos: die Klagen reichen von mangelnder Effizienz bis zur schleichenden Desintegration (fachlich/technisch und soziologisch/emotional) von bislang eingespielten Teams.
- Als Folgerung auf die Corona-Krise wurde das Geschäfts- und Betriebskonzept für die generische KMU-Entwicklungsplattform überarbeitet. Soweit im Rahmen der verfügbaren Zeit und Mittel möglich wurde die Plattform auf virtuelle Verfügbarkeit und die Benutzung durch dislozierte Projektteams umgebaut. Dabei wurden zwei Zielsetzungen berücksichtigt:
 - Das geringe aktuelle Interesse der KMU an F&E erfordert, dass die KMU-Entwicklungsplattform die aktuelle Krise überdauern kann, bis sich wirtschaftliche und gesellschaftliche Lage wieder stabilisiert haben und bei KMUs wieder Bedarf an Entwicklungs- und Innovationsaktivitäten besteht.
 - Parallel dazu soll es möglich sein, die Plattform für Interessenten stetig verfügbar zu halten und schnell in Pilotprojekten einsetzen und weiterentwickeln zu können.

Nachdem nach dem Projektende von REALISE keine Finanzierung, mit der ein Betrieb und die Weiterentwicklung gesichert werden kann, vorliegt und in der aktuellen Situation auch nicht mit einem substantiellen Beitrag seitens KMU zu rechnen ist, wurde das Betriebskonzept entsprechend angepasst:

- Die KMU-Entwicklungsplattform wird auf eine remote zugängliche virtuelle Maschine portiert, so dass Interessenten jederzeit einen Zugang beantragen und die Entwicklungsplattform einsetzen können. Dies wird von der Thelsys GmbH finanziert und betrieben. Es werden vorerst nur Funktionalitäten angeboten, bei denen keine hohen Lizenz- oder Wartungsgebühren anfallen.
- Pilotprojekte sollen helfen, die erste Optimierungsstufe abzudecken. Thelsys wird dabei die Projektarbeiten begleiten und entsprechende Anpassungen vornehmen. Über die kostenfreie grundlegende Bereitstellung anfallenden Aufwendungen werden auf Selbstkostenbasis abgerechnet.
- Es ist geplant, eine grundsätzliche Bereitstellung der virtuellen, remote zugänglichen Maschine bis 12/2022 zu unterstützen. Zugesichert wird die Bereitstellung bis 12/2021; danach behält sich die Thelsys GmbH vor, das kostenlose Angebot bei zu hoher oder zu geringer Auslastung einzustellen oder in ein anderes Modell zu überführen.
- Für aufwändigere oder geförderte Projektarbeiten, die über Test- und Pilotstudien hinausgehen, müssen individuelle Konditionen vereinbart werden.

Das Ziel, für kleine und mittelständische Unternehmen aus der Metropolregion Hamburg eine KMU-Entwicklungsplattform für gemeinschaftliche Forschungs- und Entwicklungsvorhaben bereitstellen zu können, konnte damit trotz der Beeinträchtigungen durch die Corona-Krise, die sich vor allem auf der Seite der Luftfahrt-KMU niedergeschlagen haben, realisiert werden.

3.2 Systeme/Sensorik (AP1.3)

Basierend auf der Anforderungsanalyse wurden gemeinsam mit den Verbundpartnern Detailanforderungen an die Flugzeugsystemkomponenten, die Sensorik und den Datenlink abgeleitet. Als zu übertragende Daten wurden die aktuelle Position des Flugzeugs, seine Fluggeschwindigkeit und der Gierwinkel festgelegt. Die hierfür erforderliche Messausrüstung wurde beschafft und installiert. Die für die Übertragung benötigte Bandbreite ließ sich mit Standard-Komponenten realisieren, allerdings stellte der Aufbau einer Multipoint-Verbindung zwischen UAV, Bodenstation zur Pilotierung des UAV und bodengebundenem Landesystem eine Herausforderung dar. Hierfür wurden zwei Konzepte erarbeitet: Entweder werden zwei dedizierte Funkstrecken zur Übertragung der Daten zum einen an die UAV-Bodenstation und zum anderen an das Bodensystem genutzt. Alternativ wird bodenseitig ein Software-Proxy zwischen Empfänger und weiterverarbeitende Systeme gesetzt werden. Letzteres Konzept wurde für die UAVs der TUHH umgesetzt, getestet und im Flugversuch eingesetzt. Der Schematische Aufbau des Konzepts ist in Abbildung 6 dargestellt.

Die im UAV durch Navigationsfilter ermittelten Navigationslösungen inkl. Positions- und Geschwindigkeitsdaten sowie der aktuelle Gierwinkel werden über eine 868MHz-Telemetriestrecke in Form von Datenpaketen im MAVLink-Protokoll an die UAV-Bodenstation übertragen. Die Raten dieser MAVLink-Nachrichten können im UAV innerhalb hardware- und softwarespezifischer Grenzen frei definiert werden. Dieser Umstand ermöglicht es, dass bspw. die durch die Navigationsfilter ermittelte UAV-Position mit höherer Rate übermittelt werden kann, als dies durch ein direktes Abgreifen der reinen GPS-Empfängerdaten möglich wäre. Gleichzeitig besitzen die im Navigationsfilter berechneten Signale eine höhere Genauigkeit als für eine rein GPS-gestützte Positionsbestimmung. Auf der UAV-Bodenstation werden die eingehenden MAVLink-Signale dupliziert. Zum einen wird die Bodenstationssoftware des UAV versorgt, um eine Überwachung des UAV vom Boden zu gewährleisten. Gleichzeitig werden die empfangenen Daten für das Bodensystem aufbereitet. Hierzu werden die eingehenden MAVLink-Nachrichten durch eine an der TUHH entwickelten Software namens „Distributor“ eingelesen und die benötigten Messdaten und Informationen extrahiert (siehe Abbildung 6).

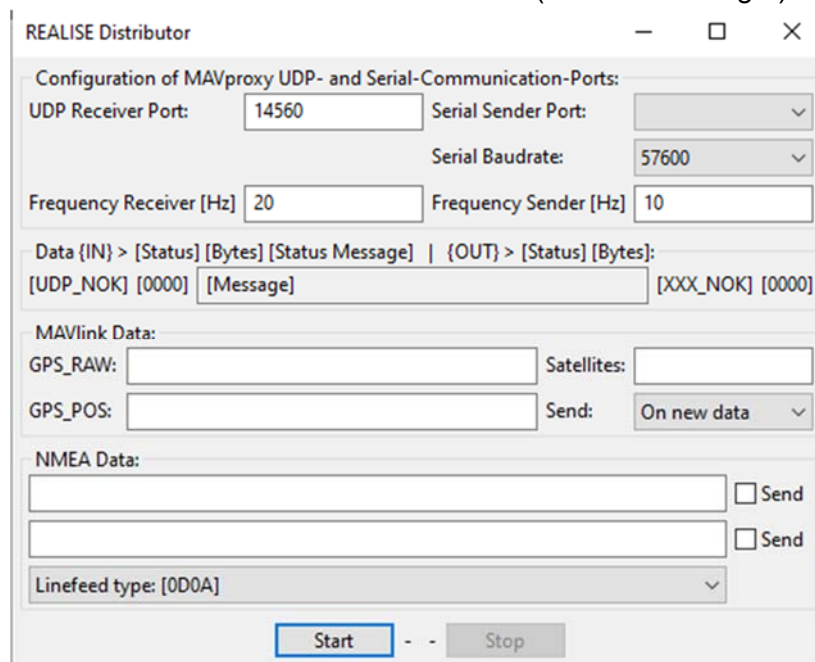


Abbildung 6: "Distributor"-Software Oberfläche

Da das Bodensystem Nachrichten im NMEA-Format erwartet, werden die extrahierten Messdaten und Informationen anschließend in neue, synthetische Nachrichten im NMEA-Format verpackt. Die erzeugten synthetischen NMEA-Nachrichten enthalten alle erforderlichen Informationen mit der gewünschten Genauigkeit. Anschließend erfolgt die Übertragung der synthetisierten NMEA-Nachrichten mittels einer Hochleistungsfunkstrecke an das Landesystem. Der „Distributor“ bieten zudem weitere Funktionalitäten: Neben der aktuell vom UAV sichtbaren GPS Sattelitenanzahl werden die erzeugten NMEA-Nachrichten als auch die empfangenen MAV-Link Nachrichten live angezeigt, sodass eine laufende Überprüfung der Datenintegrität möglich ist. Außerdem kann die Abtastrate für die ankommenden MAVLink-Nachrichten, als auch die Ausgaberate der erzeugten NMEA-Nachrichten beliebig angepasst werden. Diese Funktionalität ist notwendig, sollte die MAVLink-Datenrate UAV-seitig erhöht werden, da gemäß Shannontheorem eine Mindestabtastrate beim Einlesen notwendig ist, um eine korrekte Signalübertragung sicherzustellen. Diese Abtastrate wird ggf. im „Distributor“ entsprechend der Gegebenheiten festgelegt. Eine korrekte Signalübertragung kann damit für beliebige Raten sichergestellt werden. Weiterhin können die verschiedenen NMEA-Nachrichten, welche an

das Bodensystem übertragen werden sollen, im „Distributor“ gezielt zu- oder abgeschaltet werden.

Die Hochleistungsfunkstrecke zwischen UAV-Bodenstation und Bodensystem wurde derart konfiguriert, dass eine Point-to-Point Verbindung alleinig zwischen den zwei Funkmodems aufgebaut wird. Die Festlegung einer spezifischen ID verhindert damit, dass weitere Sender in die Funkstrecke eingreifen und die Verbindung kompromittieren. Weiterhin ist das Frequenzband, in dem die Hochleistungsfunkstrecke arbeitet, innerhalb hardware-spezifischer Grenzen beliebig einstellbar, sodass ggf. auf örtliche Einschränkungen reagiert werden kann. Der von der TUHH gewählte Ansatz erfüllt damit alle Anforderungen an die Telemetrie und bietet weitere Vorteile gegenüber einer reinen GSP-Empfänger basierten Lösung.

Bei der Auslegung und Integration des Antriebs- und Energiesystems des Landesystems übernahm die TUHH eine beratende Funktion, ebenso wie bei der Auslegung und Integration der Hardwarekomponenten für die elektrische Verteilung und elektronische Steuerung. Unterstützungstätigkeiten in diesem Kontext umfassten u. a. eine Systemidentifikation der Antriebsmotoren, die Einstellung der Motorsteuergeräte und die Auslegung der Drehzahlregelung am Antriebseinheit-Prüfstand.

3.3 Flugversuchsträger (AP1.4)

Rahmen einer Risikominimierungsstrategie wurde abweichend vom ursprünglichen Projektplan zuerst ein Low-Cost Entwurf für einen neuen HAPS-ähnlichen Flugversuchsträger durchgeführt. Hierbei entstand der Versuchsträger TriHeron mit 4kg Masse und einer Spannweite von 4,5m. Er wurde vollständig entwickelt, aufgebaut, mit einem Sensorsystem (DGNSS/RTK/INS und Luftdatensensorik) ausgestattet und in Betrieb genommen. Eine Flugmesskampagne zur Modellbildung wurde erfolgreich absolviert und aus den Versuchsdaten ein mathematisches Simulationsmodell des dynamischen Verhaltens des Flugzeugs abgeleitet. Durch die Entwicklung der TriHeron konnten frühzeitig wichtige Erkenntnisse hinsichtlich der angedachten Sensorik und Hardware gewonnen werden. Zudem ermöglichte das Simulationsmodell frühe rechnergestützte Studien, die für anstehende Entwicklungsschritte eingesetzt werden konnten. Es trug maßgeblich zur Eigenschaftsabsicherung sowie zur simulationsgestützten Bewertungs- und Analysefähigkeit des Projektes bei. Basierend auf den mit der TriHeron gewonnenen Erkenntnissen wurde der zweite, größere Flugversuchsträger mit dem Namen LARA (Large Aspect Ratio Aircraft) aufgebaut. LARA hat eine Spannweite von 7,5m und eine Masse von rund 7kg, siehe Abbildung 7. Im Gegensatz zur TriHeron wurde für LARA eine Funkverbindung im 868MHz-Band eingesetzt um eine höhere Reichweite für die Flugversuchskampagne zu erhalten. Die in TriHeron verwendete Sensorik hat sich als geeignet erwiesen: Die Positionsgenauigkeit sowie die Geschwindigkeitsmessung erfüllten die erforderlichen Genauigkeiten sodass dieses System ebenfalls in LARA zum Einsatz kam. Außerdem wurde LARA mit den für das Kamera-System sowie die Infrarotsensoren des Bodensystems notwendigen Marker ausgestattet. Die Positionierung der Marker erfolgte hierbei in Absprache mit den Projektpartnern der RWTH und unter Berücksichtigung von Sichtfeldeinschränkungen der Systeme. Die Steuerflächenallokation für LARA wurde derart implementiert, dass ausgesprochen langsame Anflüge mit ca. 12 m/s über Grund durchgeführt werden konnten. Diese Fähigkeit hat sich für eine erfolgreiche Synchronisation mit dem Bodensystem als sehr wertvoll erwiesen.

Die TUHH hat, durch die Arbeiten in AP 1.3 und AP 1.4, das Gesamtziel 1.) „Aufbau und Betrieb eines HAPS-ähnlichen Flugversuchsträgers“ des Teilvorhabens der TUHH sowie das gleichnamige Arbeitsziel 1 vollumfänglich erfüllt. Durch die entwickelte „Distributor“-Software wurden zudem vorhandene Werkzeugketten zur Vorbereitung, Durchführung und Auswertung von virtuellen und realen Flugversuchen für das konkrete Anwendungsszenario „Landing auf einem bodengebundenen Start- und Landesystem“ erweitert.



Abbildung 7: Flugversuchsträger LARA

3.4 Simulation (AP2.1)

Die TUHH hat eine Gesamtsimulation zur Untersuchung des Rendezvous Manövers entwickelt und stellte diese den Verbundpartnern zur Verfügung. Die Gesamtsimulation wurde als modulares Modell mit referenzierten Teilmodellen konzeptioniert und implementiert (Abbildung 4). Dieses Konzept erleichterte durch definierte Implementierungsstandards und Schnittstellen einen einfachen Austausch und eine asynchrone Weiterentwicklung der Teilmodule.

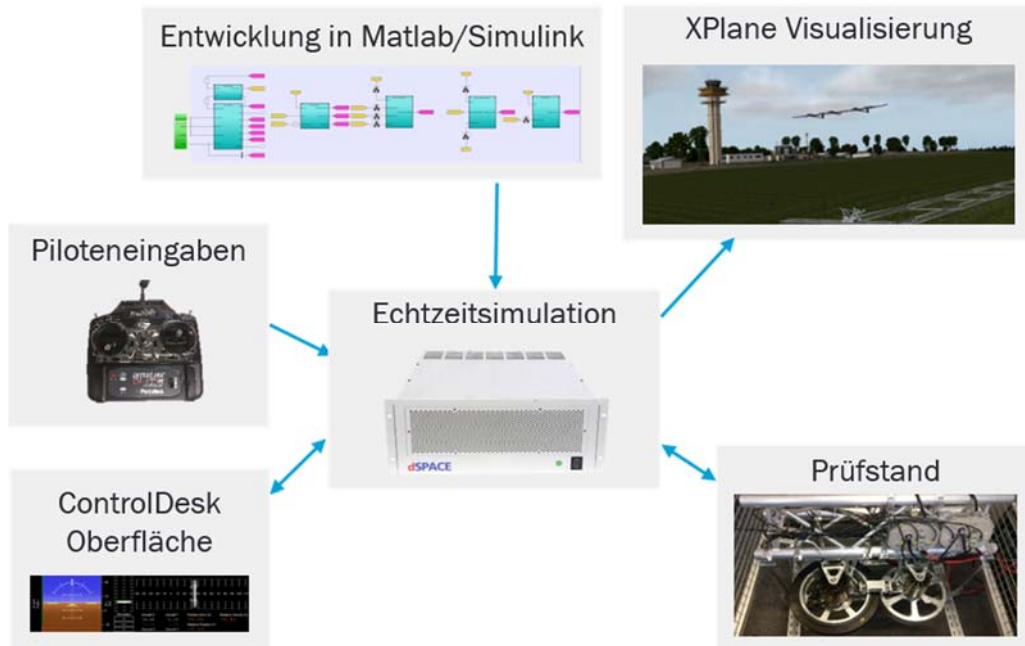


Abbildung 8: Peripherie der Simulationsumgebung

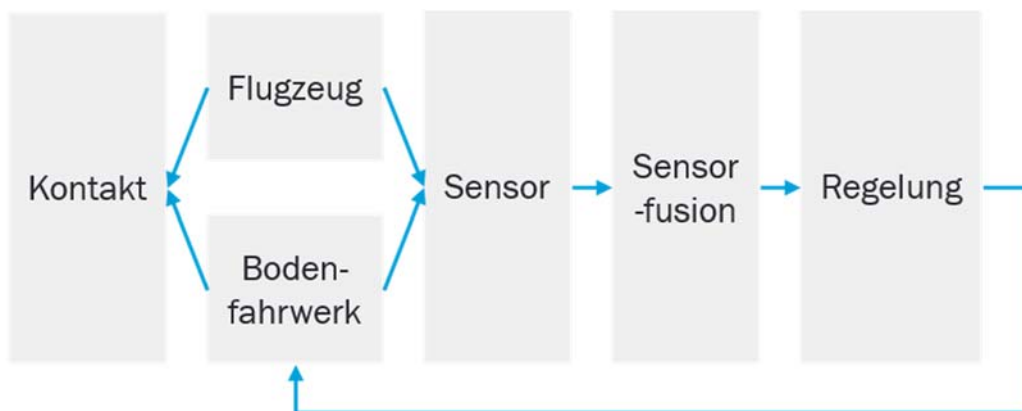


Abbildung 9: Modulare Gesamtsimulation zur Entwicklungsbegleitung

Neben der Konzepterstellung und Wartung des Modells, hat die TUHH insbesondere das Simulationsmodul „Flugzeug“, basierend auf den Ergebnissen aus Arbeitspaket AP 1.4 mit Tri-Heron, entwickelt. Die erzielte hohe Modellgüte wurde bereits im Jahresbericht 2018 dargestellt. Zusätzlich erfolgte eine detaillierte Kontaktmodellierung für eine flexibel skalierbare Anzahl an möglichen Kontaktpunkten am Flugzeug, siehe Jahresbericht 2019. Neben dem Modell des Flugzeugs und dessen Kontakt mit dem Bodensystem wurden die finalen Bodenfahrwerks- und Regelungsmodule von MB+P sowie die durch die RTWH erstellten Sensor- und Sensorfusionsmodule erfolgreich integriert und die Gesamtsimulation mit realitätsnahen Anflugszenarien verifiziert. Die Gesamtsimulation kann auf einem Echtzeitrechner ausgeführt werden und ist an eine Flugsimulation zur 3D-Visualisierung angebunden, siehe Abbildung 9. Das Gesamtmodell wurde für detaillierte Untersuchungen und Optimierungen der Teilkomponenten des Systems eingesetzt. Dabei sind sowohl Untersuchungen und Optimierungen einzelner Teilmodule, wie z.B. Sensoren und Reglern, als auch Überprüfungen der Schnittstellen zwischen den Systemkomponenten möglich gewesen. Außerdem konnten durch tiefgehende Analysen des Gesamtsystems Erkenntnisse hinsichtlich der Erfolgswahrscheinlichkeit eines automatisierten Landevorgangs unter Berücksichtigung von Umwelteinflüssen, Störungen und Unsicherheiten von Systemparametern gewonnen werden. In verschiedenen Simulationsstudien wurden Monte-Carlo-Simulationsläufe und Worst-Case Optimierung unter Zuhilfenahme genetischer Algorithmen genutzt. Zur erleichterten Bedienung wurde ein Software-Tool in Matlab entwickelt.

Exemplarische Ergebnisse sind in Abbildung 10 dargestellt. Dargestellt ist die kumulative Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung des Synchronisationsfehlers e in Längsrichtung für 9200 Anflüge mit variierendem Gleitpfadwinkel und Anfluggeschwindigkeit. Das definierte Rendezvousfenster für das REALISE System ist mit ± 10 cm spezifiziert. Die Auswertung dieser Untersuchung zeigt, dass der Synchronisationsfehler in 98% der untersuchten Anflüge innerhalb der geforderten Grenzen liegt und die Synchronisation die geforderte Genauigkeit erzielt.

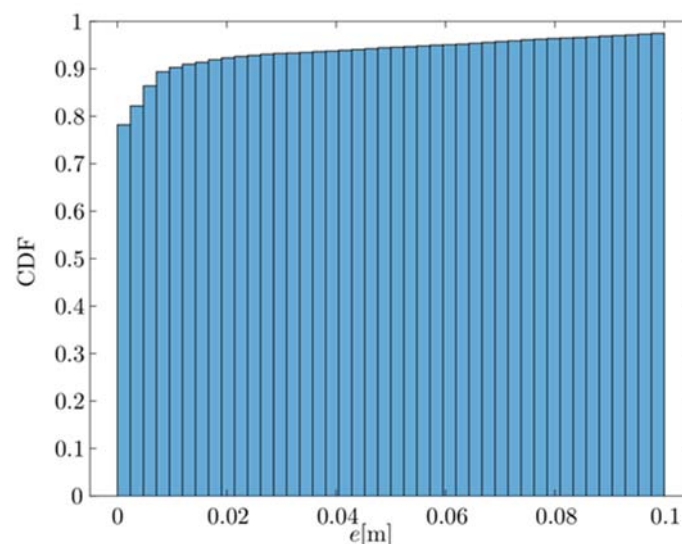


Abbildung 10: Kumulative Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung des Synchronisationsfehlers in Längsrichtung

3.5 Automatisierung (AP2.2)

Die TUHH hat die flugzeugseitigen Auswirkungen eines bodengebunden Fahrwerkssystems auf die Flugregelung von UAVs und die Automation entsprechender Landemanöver grundlegend untersucht. Für das Modell der TriHeron wurde ein generisches Flugregelungs- und Autopiloten-System entworfen und in der Gesamtsimulation implementiert, siehe Jahresbericht 2018. Dieses System ermöglicht sowohl vollautomatische Anflüge auf definierten Bahnen als auch eine vereinfachte, da reglerunterstützte, Steuerung durch einen Piloten.

Im Rahmen des Projekts wurden eine flugzeugseitige Entscheidungslogik entwickelt und im Flugzeugmodul der Simulationsumgebung implementiert. Die Automatisierung ist dabei als Zustandsautomat ausgelegt, der kriterienbasiert Sollwerte für das Flugregelungsmodell, bereitstellt. In Simulationen wurde exemplarisch gezeigt, dass eine flugzeugseitige Entscheidungslogik ein geregeltes UAV zielgenau zum sicheren Rendezvous mit dem Bodensystem führen kann. Außerdem greift diese Logik gezielt in Fehlerfällen ein um einen begonnenen Anflug abubrechen und ggf. neu zu beginnen. Eine detailliertere Beschreibung erfolgte im Jahresbericht 2019. Gezeigt wird somit, dass ein vollautomatischer Anflug mit flugzeugseitiger Entscheidungslogik perspektivisch realisierbar ist.

Die TUHH hat, durch die Arbeiten in AP 2.1 und AP 2.2, die Gesamtziele 2.) „Aufbau einer entwicklungsbegleitenden Gesamtsystemsimulation“ und 3.) „Demonstration des Konzepts in virtuellen Flugversuchen“ des Teilvorhabens der TUHH vollumfänglich erfüllt. Zusätzlich können flexible Flugzeugstrukturen in der Kontaktmodellierung berücksichtigt werden. Methoden und Werkzeugketten wurden durch die Fähigkeiten der Monte-Carlo-Simulation und Worst-Case-Optimierung erweitert. Durch die Gesamtsimulation, inklusive der entwickelten Flugregelung sowie der von den Partnern zur Verfügung gestellten Algorithmen und Regler der weiteren Systemkomponenten, konnten die Anforderungen an die Flugbahnregelung und -führung in virtuellen Flugversuchen untersucht werden. Es zeigt sich, dass mit der im Projektverlauf entwickelten Flugregelung eine automatische Landung auf bodengebundenen Landesystem möglich ist. Der entwickelte Zustandsautomat ermöglicht neben vollautomatischen Landungen die Erkennung und Einleitung von Notfallprozeduren, wie das Durchstarten bei unwahrscheinlicher Synchronisation. Er wurde in virtuellen Flugversuchen getestet.

3.6 Laborversuche (AP3.1)

Für Laborversuche wurde unter anderem der reale Motor-Prüfstand von MB+P (siehe Abbildung 11) mit dem simulierten Flugversuchsträger in der Simulationsinfrastruktur der TUHH (Mixed-Reality/HITL) gekoppelt. Diese Kopplung ermöglichte Messungen zur Ermittlung der Dynamik der kombinierten Antriebseinheit des Bodensystems und gezielte Optimierungen der Parameter der Steuereinheit. Abbildung 12 zeigt die reale Messung und den vom Modell vorhergesagten Motorstrom beim Anlauf der Antriebseinheit.



Abbildung 11: Motorprüfstand (MB+P) mit Steuergeräten für Antriebs- (A) und Lastseite (L)

Außerdem wurde der von MB+P entwickelte Regelungsalgorithmus für das Bodensystem in der Hardware-In-The-Loop Simulation mittels typischer Rendezvous-Szenarien getestet. Die simulierte Position des anfliegenden UAV wurde vom entwickelten Regelalgorithmus verarbeitet und das ermittelte Stellsignal per CAN-Bus an das Motorsteuergerät übertragen. Gleichzeitig wurden Statusinformationen der Motorsteuergeräte sowie die durch einen am Prüfstand angebrachten Inkrementaldrehgeber gemessene virtuelle Position des Bodensystems in die Simulation zurückgespielt. Die Funktionsfähigkeit der MB+P Algorithmen konnte so im Zusammenhang mit dem realen Motorantrieb nachgewiesen und optimiert werden.

Weitere Laborversuche wurden zum Test der Datenübertragung zwischen realem UAV und dem Bodensystem durchgeführt. Der Testaufbau umfasste dabei das Bodensystem von MB+P (ohne das Schienensystem), der Hard- und Softwarekomponenten inkl. der Sensorfusionsalgorithmen der RWTH sowie die UAVs der TUHH inkl. der installierten Sensorik und Telemetrie. Im Zusammenwirken der Partner wurde die für die TUHH-UAV gewählte Telemetrielösung funktional getestet und optimiert. Die UAV sendeten dabei DGPS-Korrigierte Positions- und Geschwindigkeitsdaten in verschiedenen MAVLink-Datenraten an die UAV-Bodenstation. Der „Distributor“ wandelte diese Nachrichten in das benötigte NMEA-Format und sendete diese in unterschiedlicher Rate und bei verschiedenen Funkmodemkonfigurationen an das Bodensystem. Hierdurch konnte das korrekte Einlesen der NMEA-Daten im Bodensystem sowie die korrekte Übertragung an die Sensorfusion getestet und optimiert werden. Die gewählte Architektur hat ihre Funktionalität im Laborversuch bewiesen und konnte damit für die anstehenden Flugversuche genutzt werden.

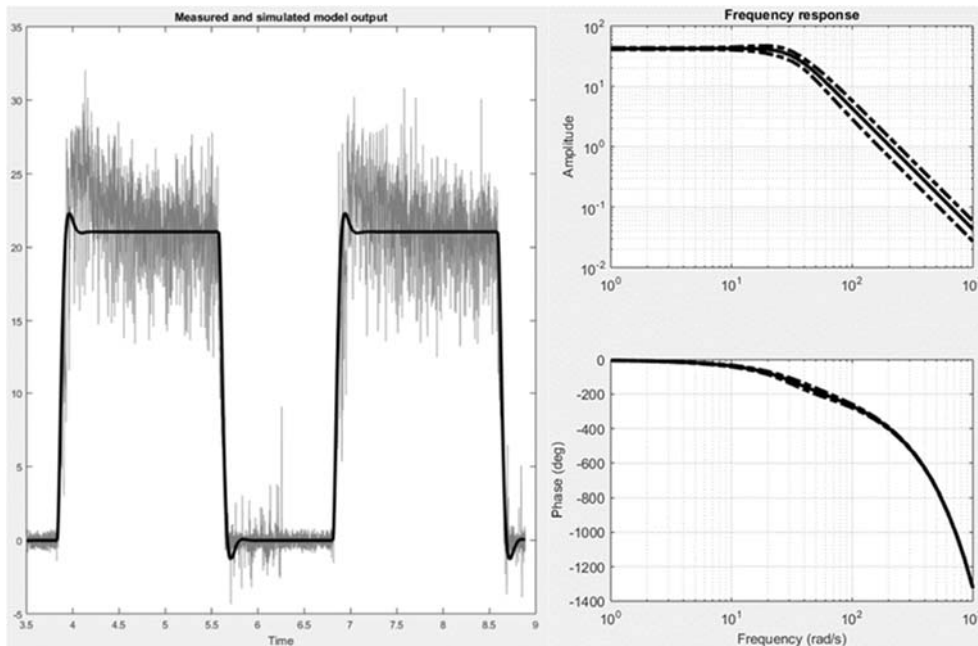


Abbildung 12: Identifikation der Stromaufbaudynamik des Antriebmotors

3.7 Flugversuche (AP3.2)

Vor der Durchführung realer Anflüge auf das Bodensystem wurden zur Risikominimierung zunächst mehrere Zwischenschritte durchgeführt. In einem ersten Schritt erfolgten Flugversuche ohne Bodensystem mit beiden UAV der TUHH. Diese Versuche dienten zum einen der Überprüfung der UAV-Systeme sowie der installierten Sensorik und Telemetrie. Hierbei konnte festgestellt werden, dass die gewählte Strategie der TUHH die funktionalen Anforderungen hinsichtlich der geforderten Messsignale und deren Raten einhalten kann. Es wurde lediglich festgestellt, dass die in der TriHeron gewählte 433MHz Telemetriefunkstrecke bei größeren Entfernungen zu schwach war, sodass auf eine 868MHz Funkverbindung umgerüstet wurde.

Ein weiteres Ziel der Vorversuche waren erste Anflüge auf ein vordefiniertes 5x25m Landefenster. Diese Anflüge erfolgten bewusst manuell durch einen Piloten, da diese Variante explizit für die UAV der TUHH vorgesehen wurde. Die Abgrenzung zu einem vollautomatischen Anflug wurde bewusst gewählt, um mögliche Grenzen manuellen Anflüge und anschließender Synchronisation mit dem Bodensystem identifizieren zu können. Die exemplarischen Ergebnisse für 10 solcher Landungen sind im Jahresbericht 2019 analysiert worden. Es zeigte sich, dass bei manuellen Landeanflügen der gedachte Synchronisationspunkt in Längsrichtung weniger streut, als quer zur gedachten Schienenrichtung. Die Versuche ließen vermuten, dass für manuelle Anflüge eine erfolgreiche Synchronisation mit dem Bodensystem maßgeblich durch die Präzision in der Seitenbewegung bestimmt wird. Basierend auf den Messdaten der Versuche konnte eine Erfolgswahrscheinlichkeit für eine gelungene Synchronisation mit dem Bodensystem auf 60-70% abgeschätzt werden.

Weitere Integrationsversuche wurden in 2020 in Rotenburg/Wümme mit dem vollständig aufgebauten Bodensystem durchgeführt. Hierzu wurde eine Kommunikation zwischen LARA und dem Bodensystem aufgebaut sowie eine Initialisierungsroutine der flugzeugseitigen Sensorik entwickelt und zusammen mit den Projektpartnern getestet. Anstatt manuelle Anflüge auf das System durchzuführen, wurde der die Sensorik des UAV beinhaltende Mittelrumpf von LARA auf dem Dach eines Fahrzeugs befestigt.



Abbildung 13: Versuchsaufbau mit LARA-Rumpf auf Fahrzeugdach

Die Positions- und Geschwindigkeitsmessung sowie die Telemetrie zwischen UAV, UAV-Bodenstation und Bodensystem wurde hierdurch nicht beeinträchtigt, sodass realitätsnahe Untersuchungen ohne einen Piloten und unabhängig von der aktuellen Wetterlage durchgeführt werden konnten. Da in einem solchen Versuchsaufbau die tatsächliche UAV-Position einen seitlichen Versatz zum Schienensystem hat, wurden die seitliche Positionierung des Schienensystems in der internen Berechnung der Sensorfusionsalgorithmen adaptiert. Das Schienensystem wurde hierdurch virtuell verlegt, sodass im Idealfall keine seitliche Ablage entsteht. Ziel der Versuche war die Synchronisation des Bodensystems mit der übermittelten UAV-Position auf dem Dach des Fahrzeugs. Es zeigte sich, dass die Datenrate der UAV-Position wie erwartet eine kritische Größe für eine erfolgreiche Synchronisation ist. In frühen Abschnitten der Synchronisationsphase trägt das Kamera/Marker-System noch nicht zur Synchronisation bei. Das heißt, dass das Bodensystem lediglich basierend auf den GPS-Daten des UAV angesteuert wird. Erfolgt deren Update in niedriger Rate, sind größere Positionierungsfehler zu erwarten, als für eine hohe Updaterate. Außerdem zeigte sich, dass die nicht vermeidbare Latenz in der Datenübertragung zwischen UAV und Bodenstation problematisch sein kann. Sie führt zu einer vergleichsweise konstanten Positionsabweichung zwischen UAV und Bodensystem. Bei genauer Kenntnis der Zeitverzögerung können jedoch Korrekturterme eingeführt werden, die den Fehler verkleinern. Festgestellt werden konnte, dass eine Synchronisation mittels lediglich übermittelter GPS-Position denkbar, wenn auch erschwert, ist. Weiterhin dienten die Versuche der Optimierung der Ausrichtung des Kamera/Marker-Systems. Ziel war es, den aktiven Bereich dieses Systems zu testen und ggf. zu vergrößern. Es zeigte sich, dass das Kamera/Marker-System zu einer verbesserten Synchronisation zwischen UAV und Bodensystem führt, sofern das UAV in den Sichtbereich eintritt. Letztlich stellte diese zweite Stufe an Vorversuchen einen weiteren wichtigen Integrationsschritt dar, der zu einer optimierten Synchronisationsfähigkeit führte. Aufgrund der durch die Corona-Pandemie verursachten Einschränkungen waren diese Vorversuche jedoch gestört, sodass für die Zukunft weiteres Optimierungspotential in diesem Versuchsaufbau besteht.



Abbildung 14: Vergleich von An- und Überflügen zwischen TriHeron (grün) und LARA (rot)

Nach Abschluss der Vorversuche wurden aktive Flugversuche mit beiden HAPS-ähnlichen UAV der TUHH durchgeführt. Diese erfolgten aufgrund der Coronavirus-Pandemie zeitlich verzögert zwischen August und November 2020. Die realen Flugversuche mit dem HAPS-ähnlichen Flugversuchsträgern wurden in zwei aufeinander folgenden Stufen durchgeführt. Zunächst wurden An- und Überflüge auf das Bodensystem erprobt. Alle An- und Überflüge wurden dabei manuell durch einen Modellpiloten durchgeführt. Exemplarische Flugpfade sind in Abbildung 14 dargestellt. Es zeigte sich, dass das Low-Cost-HAPS-UAV TriHeron (grüne Trajektorien in Abbildung 14) anfälliger für Wind ist als der optimierte Entwurf LARA (rote Pfade in Abbildung 14). Klar ersichtlich ist, dass TriHeron größere seitliche Schwankungen im Anflugpfad zeigt als LARA. Plötzlich auftretende seitliche Abweichungen stellen eine große Herausforderung für das Bodensystem dar und sollten daher schon UAV-seitig minimiert werden. Die Pfade von LARA sind deutlich geradliniger, insbesondere in der letzten Anflugphase bereits über dem Bodensystem. Hier bestätigt sich die Vermutung aus den Vorversuchen, dass die Langsamflugeigenschaften von LARA sehr von Vorteil für ein Synchronisierungsvorhaben sind. Ein langsamer und vor allem stabiler Anflug führt zu einer Vergrößerung des Landdefensers. Mit LARA treten auch im extremen Langsamflug kurz vor Strömungsabriss keine sehr großen seitlichen Schwankungen auf. Aufgrund dieser beiden Umstände, der geringeren Störungsanfälligkeit gegenüber Wind sowie die besseren Flugeigenschaften bei geringen Geschwindigkeiten, wurde nach mehreren Versuchen auf weitere Flüge mit TriHeron verzichtet, und ausschließlich LARA eingesetzt.

Insgesamt wurden alleine mit LARA 28 vollständige Überflüge durchgeführt. Abbildung 15 zeigt einen tiefen Überflug von LARA über dem fahrenden Bodensystem. In dieser Situation erfolgt die Positionierung des Bodensystems lediglich basierend auf GPS-Daten, da das UAV außerhalb des Sichtfensters des Kamera/Marker-Systems ist. Gut zu sehen ist dennoch die gute Synchronisation des Schlittens unterhalb des UAV, sodass mit einer weiteren Verbesserung im Zusammenspiel mit den weiteren Sensoren zu rechnen war.



Abbildung 15: LARA im tiefen Überflug

Die Messdatenauswertung zeigt, dass die Position des UAV mit der geforderten, sehr hohen Genauigkeit gemessen wird, siehe Abbildung 16. So treten über die gesamte Flugdauer von hier ca.15 Minuten nur singulär Abweichungen von mehr als 10cm in vertikaler Richtung auf. Ansonsten liegt die Positionsgenauigkeit in vertikaler Richtung im Mittel bei lediglich ca. 2cm. Für die horizontale Position wird eine noch höhere Genauigkeit erzielt, die die Anforderungen für das Synchronisationsvorhaben sogar deutlich übererfüllen.

Weitere Messdaten eines exemplarischen tiefen Überflugs sind in Abbildung 17 dargestellt. Im Bild oben links ist die gemessene GPS-Höhe über der Zeit aufgetragen. Mit einer GPS-Höhe des Bodensystems von 25m, ergibt sich in diesem Anflug eine vertikale Annäherung an das Bodensystem von knapp 5m. Während des Anflugs treten geringe Schwankungen in der Geschwindigkeit über Grund und in der Sinkgeschwindigkeit auf (siehe Abbildung 17, oben rechts).

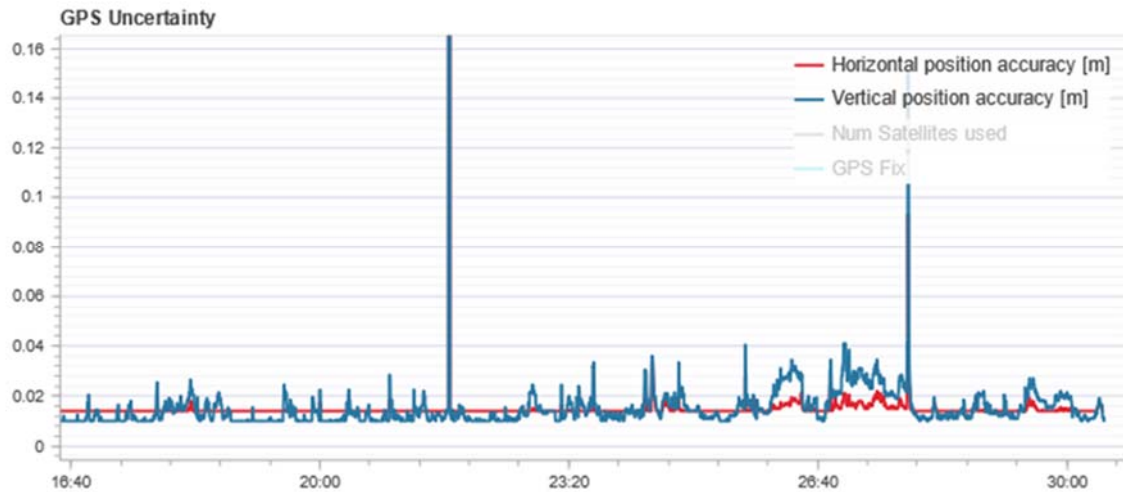


Abbildung 16: Horizontale und vertikale Genauigkeit der UAV-Position im Flug mit der verwendeten Sensorik

Diese Schwankungen sind jedoch gering und können durch das Bodensystem ausgeglichen werden. Die sehr geringe Geschwindigkeit über Grund von lediglich ca. 7m/s ist für das Bodensystem realisierbar und gibt dem System Spielraum für Korrekturen. Erneut zeigt sich hier der Vorteil der Langsamflugeigenschaften von LARA. Auch aufgrund des manuellen Anflugs treten, neben kleineren Schwankungen im Hängewinkel (siehe Abbildung 17, unten rechts), vergleichsweise starke Bewegungen um die Hochachse auf (siehe Abbildung 17, unten links). Da das Bodensystem jedoch über eine Drehbare Auffangvorrichtung verfügt, sind die auftretenden Abweichungen kompensierbar. Die größte Herausforderung stellt somit die seitliche Ausrichtung des UAV zum Landesystem dar. Diese im zulässigen Bereich für ein erfolgreiches Synchronisationsmanöver zu halten, ist im manuellen Anflug herausfordernd für den Piloten. Abbildung 18 zeigt die Lage des Bodensystems sowie die Pfade aller tiefen Überflüge mit LARA. Dabei wurden sowohl Anflüge von Osten nach Westen als auch von Westen nach Osten durchgeführt. Bei genauerer Betrachtung wird deutlich, dass die Bodensystemschwelle in den allermeisten Fällen direkt überflogen wurde. Ein geübter UAV-Pilot ist demnach, auch im manuellen Flug, in der Lage, das Bodensystem anzuvisieren. Anschließend verbleibt LARA in ca 80% der Fälle und über nahezu die gesamte Schienenlänge innerhalb der seitlichen Grenzen des Bodensystems. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn die Schwelle bereits in günstiger Weise überflogen wurde. In ca. 20% der Fälle verlässt das UAV die seitliche Systemgrenzen entweder dauerhaft oder zumindest zeitweilig. Die besten Ergebnisse wurden dabei bei idealen, d.h. nahezu windstillen Verhältnissen erzielt. Insgesamt kann somit festgestellt werden, dass unter günstiger Bedingungen auch praktisch ein ausreichend großes Synchronisationsfenster zur Verfügung stehen kann.

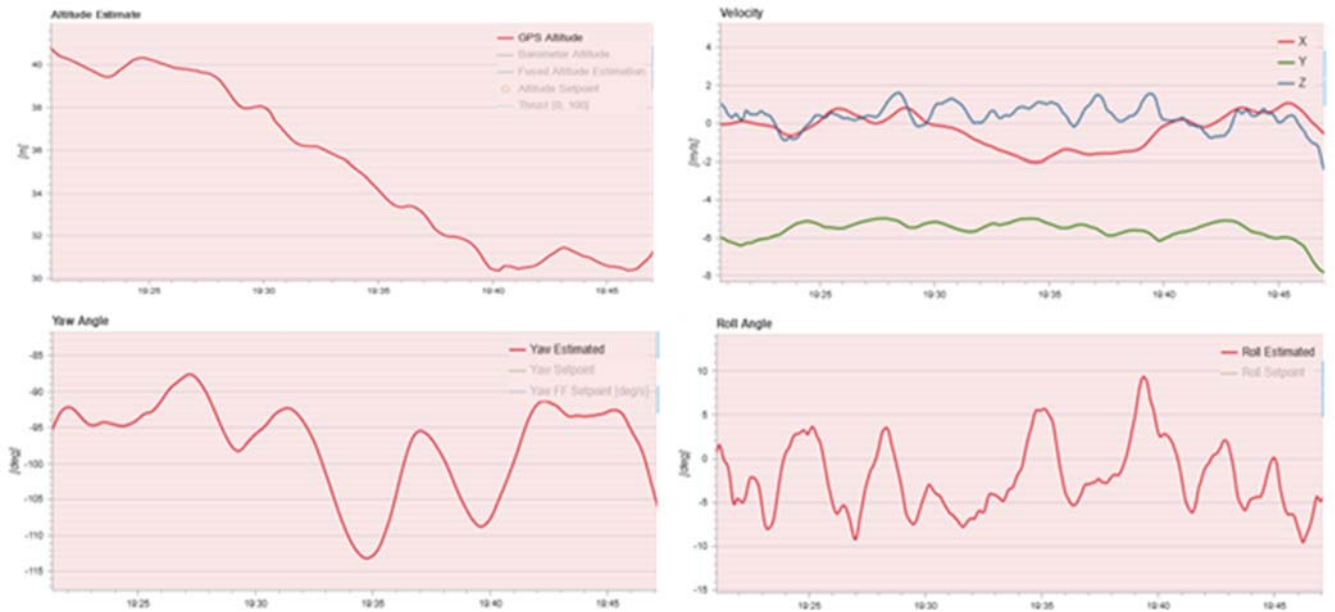


Abbildung 17: Messdaten eines exemplarischen Endanflugs auf das Bodensystem mit LARA

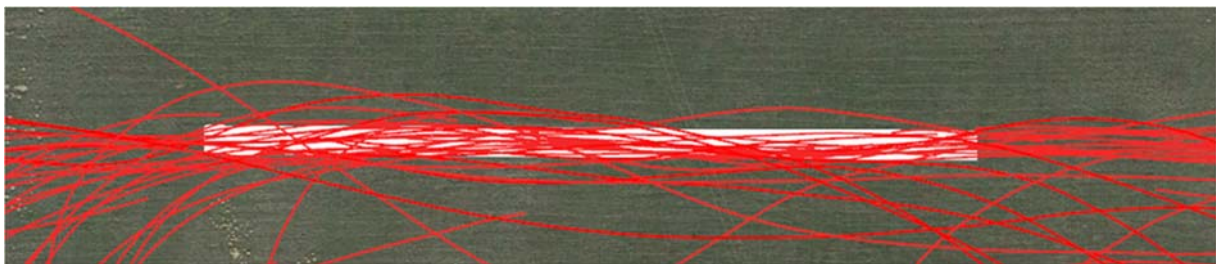


Abbildung 18: Lage des Bodensystems sowie Überflugpfade mit LARA

In der zweiten Stufe der realen Flugversuche wurden Starts vom Bodensystem durchgeführt. Diese wurden zunächst mit dem Low-Cost-UAV TriHeron erprobt. Hier zeigte sich, dass bei geringem Seitenwind, Starts vom Bodensystem auf sehr kurzer Strecke möglich sind. In ersten Versuchen verließ TriHeron, bei moderater Beschleunigung seitens des Bodensystems, nach ca. 4 Sekunden und einer Fahrstrecke von knapp 27 Metern, mit einer Geschwindigkeit von etwa 11 m/s die Startvorrichtung. Dies wurde mehrfach erfolgreich wiederholt. Spätere Versuche mit LARA (siehe Abbildung 19) benötigten sogar lediglich ca. 2,5 Sekunden und 9 Meter Fahrstrecke um bei günstigen Windbedingungen mit einer Geschwindigkeit von ca. 7m/s abzuheben. Auch diese Versuche wurden erfolgreich wiederholt.



Abbildung 19: LARA auf Bodensystem kurz vor dem automatischen Start

Der Projektplan für die zweite Stufe der realen Flugversuche umfasste ebenfalls manuelle Landungen auf dem bodengestützten Landesystem. Aufgrund zeitlicher Verzögerungen, verursacht durch die Auswirkungen der Coronavirus-Pandemie, wurden die Wetterbedingungen im Verlauf der Versuchskampagne zunehmend schlechter und die Zeitfenster für reale Versuche kürzer. Dennoch konnten weitere manuelle An- und Überflüge unter erschwerten Windbedingungen mit LARA durchgeführt werden. Mit zunehmender Annäherung an das Bodensystem zeigte sich, dass das Zusammenspiel des Kamera/Marker-Systems mit der GPS-Messung weiter optimiert werden muss. So ist der Zeitraum, in dem alle Sensorsysteme für die Fusionsalgorithmen zur Positionsbestimmung zur Verfügung stehen, kurz. Hinzu kamen die bereits angesprochenen Auswirkungen der im System vorhandenen Latenz. Beide Umstände führten im Zusammenwirken zu kleinen, aber bleibenden Positionsabweichungen zwischen UAV und Bodensystem. Die für hochpräzise Synchronisationen ausgelegte Auffangvorrichtung auf dem Schlitten des Bodensystems erwies sich für diese Positionsabweichungen als zu klein um eine Landung im manuellen Anflug bei vertretbarem Risiko zu ermöglichen. Eine Anpassung der Auffangvorrichtung war im Projektzeitraum nicht mehr durchführbar, sodass ein finaler Landeversuch mit den UAV der TUHH nicht realisiert werden konnte.

Die TUHH hat, durch die Arbeiten in den AP 3.1 und 3.2, wesentlich zu den Fortschritten für die Realisierung eines bodengestützten Start- und Landesystems beigetragen. Zusammen mit den Verbundpartnern konnte das gesetzte Gesamtziel 4.) „Demonstration des Konzepts in realen Flugversuchen“ fast vollständig erfüllt werden. So wurden, wiederholt und mit beiden HAPS-ähnlichen UAV der TUHH, sichere Starts vom Bodensystem durchgeführt. Die erzielten Startleistungen erwiesen sich dabei als sehr zufriedenstellend. Eine Vielzahl an tiefen Überflügen mittels manueller Steuerung des UAV zeigte, dass bei weiterer, geringfügiger Optimierung des Gesamtsystems, und bei geeigneten Umweltbedingungen, ein ausreichend großes Synchronisationsfenster für eine sichere Landung entstehen kann. Für manuelle Anflüge stellt die seitliche Ausrichtung des UAV zum Bodensystem die größere Herausforderung dar. Festgestellt wurde, dass bei manueller Steuerung, eine hohe seitliche Stabilität des anfliegenden UAV im langsamen Flug die Erfolgsaussichten deutlich verbessert. Auch wenn die Demonst-

ration einer realen Landung für die UAV der TUHH im Projektzeitraum knapp nicht mehr gelang, zeigen die erzielten Ergebnisse, dass auch die verbliebenen Projektziele erfüllt werden können. Die realen Flugversuche sowie die mit der entwickelten Gesamtsimulation gewonnenen Ergebnisse zeigen, dass sowohl manuelle als auch automatische Starts und Landungen auf und von einem bodengestützten System realisierbar sind. Die Vorteile eines automatischen Anflugs gegenüber einem manuellen Landeversuch werden durch die Ergebnisse der Simulation deutlich.

3.8 Zertifizierung (AP4.1)

Die Untersuchungen zum Bereich Zertifizierung wurden unterteilt in zwei Teilbereiche: Einerseits die sichere Durchführung der Versuche und Flugversuche im Rahmen der Systementwicklung und des Prototypenbau's durch eine Gefahren und Risikoanalyse. Andererseits die zum Projektverlauf gerade und nach Projektabschluss immer noch in Entwicklung befindlichen Entwicklungen zur Regulatorik des Drohnenbetriebes und ggf. der luftfahrtrechtlichen Zertifizierung ebendieser. Zusätzlich zur ursprünglich beschriebenen Aufgabenstellung wurden noch die Voraussetzungen für einen sicheren Remote-Betrieb von voll-automatisierten Start-/Landesystemen untersucht. Im Folgenden erfolgt eine Kurzdarstellung der Ergebnisse:

Auf Basis des Systementwurfes wurde in Kooperation mit dem TÜV Rheinland eine Gefahrenanalyse hinsichtlich Betriebssicherheit des Schienenstart-/Landesystems durchgeführt. Daraus abgeleitet wurden relevante Normen und Richtlinien auf Anwendbarkeit hin geprüft. Festgestellt wurde hierbei, dass die Betriebssicherheit für den Testbetrieb sowie ein späteres kommerzielles Produkt durch eine CE-Konformitätsprüfung und -kennzeichnung sowie durch ausreichende Abspermaßnahmen (Hindernisfreiheit) sichergestellt werden kann. Argumentativ kann sich diese Einschätzung auf die Analogie zu herkömmlichen Landebahnen stützen, für welche ähnliche Anforderungen bestehen.

Wenngleich Personenschäden dadurch bereits ausgeschlossen werden können, wurde innerhalb der Projektkonsortiums aus Gründen der unternehmerischen Risikominimierung bezüglich etwaiger Sachschäden die Entscheidung getroffen, vorerst mit Endlagenstoßdämpfern zu verfahren (siehe Abbildung). Diese sollen den Schlitten als zusätzliche kalte Redundanz im Falle eines Mehrfachversagens des ohnehin diversitär redundant ausgelegten „Kernsystems“ abbremsen und so ein Überschießen verhindern. Vorgesehen sind diese Endlagenstoßdämpfer jedoch nur für die erste Phase des Testbetriebes. Für den kommerziellen Regelbetrieb sollten die Kombination aus regelhafter 8-facher rekuperativer Bremsung und 8-facher mechanischer Scheibennotbremsung hinreichend sein. Ein detaillierter Bericht hierzu wurde angefertigt.



Abbildung 20: Produktion der Endlagenstoßdämpfungselemente

Des Weiteren wurde in Zusammenarbeit mit dem TÜV eine Funk-Notaus Auslegung definiert, welche eine sogenannte Stoppkategorie 1 vorsieht. Diese beinhaltet eine Trennung der Energiezufuhr erst nach einer Systemüberführung in einen sicheren Zustand. Dies bezieht sich vor allem auf die sicherheitskritischen Phasen des Landeanfluges.

Darüber hinaus erarbeitete der TÜV eine Liste von eventuell zu berücksichtigenden Normen, sollte das System einmal für den Personentransport bzw. den Betrieb an nicht absperrbarem Orten stattfinden.

Die Arbeiten zum ferngesteuerten Betrieb ergaben im Kern die Notwendigkeit einer baulichen Absperrung und Zutrittskontrolle des Betriebsbereiches, sowie eine Kameraüberwachung desselben, um die Personenfreiheit im Gefahrenbereich sicherstellen zu können. Ein detaillierter Bericht hierzu wurde angefertigt.

In Zusammenarbeit mit der AviaCert GmbH wurde die sich entwickelnde Regulierung im Bereich autonomer Flugsysteme verfolgt und analysiert. Die für REALISE in Frage kommenden UAVs und Missionen dürften mit größter Wahrscheinlichkeit in Bereich der specific und certified category fallen. Die besonders relevante Fragestellung nach der Art der Zertifizierung des Start-/Landesystems (Teil des Flugzeuges oder Bodenequipment) kann nach heutigem Regulierungsstand noch nicht abschließend beurteilt werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass für unbemannte Missionen eine Einstufung als Bodenequipment denkbar wäre, womit keine Luftfahrtrechtliche Zertifizierung notwendig werden würde. Für perspektive personentragende Anwendungen erscheint es jedoch eine unabdingbare Notwendigkeit zu sein, das Start-/Landesystem einem vollständigen Zulassungsprozess zu unterziehen. Dieser hätte dann in Kooperation mit den zuständigen Stellen zu erfolgen. Ein detaillierter Bericht hierzu angefertigt.

3.9 Geschäftsmodellentwicklung, Analyse, Bewertung, CBA (AP4.2 mit AP4.3)

Da die Arbeitspakete Analyse, Bewertung, CBA und Geschäftsmodelleentwicklung große Interaktionen aufweisen, werden die Tätigkeiten im Folgenden gemeinsam dargestellt.

Bei der Geschäftsmodellentwicklung wurde ein Fokus auf ein strukturiertes, methodisches Vorgehen gelegt. Besondere Bedeutung gewinnt dies durch den hohen Innovationsgrad der REALISE Technologie, innerhalb des ohnehin sehr dynamischen UAV-Sektors. Je disruptiver eine Technologie und je diverser deren Anwendungspotentiale, desto breiter sollte das Suchfeld für mögliche Anwendungsfälle und dafür passende Geschäftsmodelle gefasst werden, da andernfalls große Chancen auf Grund der hohen branchenübergreifenden Transferleistung leicht übersehen werden könnten. Das Konzept des „innovation funnel“ („fuzzy front end of innovation“), bei welchem klassischerweise die bestmögliche Lösung für ein bekanntes zu lösendes Problem selektiert wird, wird in diesem Ansatz dahingehend angewendet, dass für ein bekanntes Technologiespektrum die marktwirtschaftlich interessantesten Problemstellungen selektiert werden.³ Deshalb wurde das methodische Vorgehen wie folgt definiert:

1. Recherche und Entwicklung tatsächlich in Betrieb befindlicher bzw. potentieller UAV Anwendungsfälle mit Starrflügel UAV Bezug
2. Missionsprofilbezogene Vorselektion von Anwendungsfällen, welche in besonderem Maße für Starrflügelkonzepte geeignet sind
3. Problembezogene Bewertung der REALISE-Technologie im Vergleich zu sämtlichen anderen zur Verfügung stehenden Technologiekonzepten
 - Kostenvorteile
 - Operationelle Vorteile
 - Umsatzvorteile
4. Bewertung der Marktattraktivität
 - Marktgröße
 - Marktwachstum
 - Geographische Marktfragmentierung
 - Regulatorische Marktfragmentierung
5. Anwendungsfallselektion für REALISE an Hand der zuvor ermittelten
 - Technologiewettbewerblichen Vorteile
 - Marktattraktivitätsbewertung
6. Definition der end-to-end Wertschöpfungskette
7. Erarbeitung eines Kosten- und Umsatzmodells

Inhaltlich wurden für Schritt 1 diverse Experteninterviews und -Gespräche geführt (u.a. Deutsche Bahn, Airbus Strategie, Airbus Airborne Solutions, TU Delft, AmpyxPower, BP, ITLOS,

1 ³ Vgl. dazu auch Brem, Voigt (2009): Integration of market pull and technology push in the corporate front end and innovation management—Insights from the German software industry

2 Van den Ende et al. (2014): The Front End of Innovation: Organizing Search for Ideas

UN, Laserpas, Austrian Power Grid, etc.). Darüber hinaus erfolgte eine Recherche durch Teilnahme mehrerer industrierelevanter Messen (Commercial UAV Expo, Wind Energy Hamburg, Interaerial Solutions) sowie eine intensive Eigenrecherche und Kreativitätssessions. Unterstützt wurde dies vom Technologieberatungsunternehmen Drone Industry Insights. So wurden an die 100 unterschiedliche Anwendungsfälle gesammelt.

Für Schritt 2 wurden im Rahmen einer Marktstudie mit Drone Industry Insights grundlegende anwendungsfallbezogene Missionsprofile definiert, welche für die Anwendung der Starrflügel-REALISE Kombination besonders vorteilhaft sind. Diese lassen sich in den Missionsprofilkategorien „linear long“ und „area large“ eingruppierten. So konnten ca. 30 Anwendungsfälle als besonders geeignet vorselektiert werden, welche unterschiedliche technologische Komplexitäten und Anforderungsprofile an Mission Performance und Payload aufweisen und somit entlang einer Technology Roadmap auf unterschiedlichen Entwicklungsstufen anzusiedeln sind.

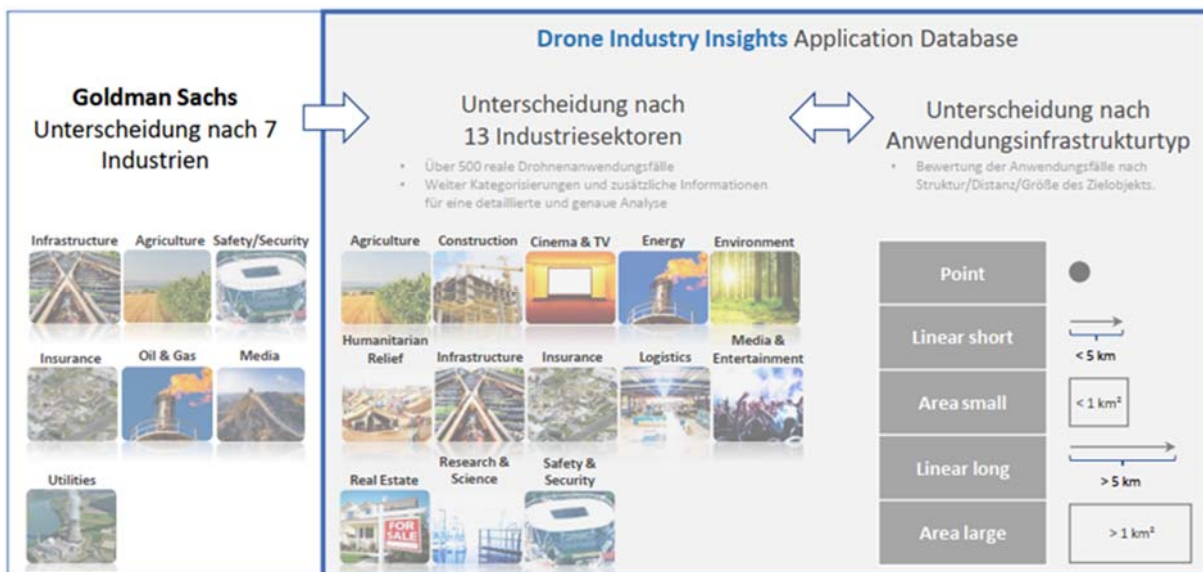


Abbildung 21: Anwendungsfallbezogene Missionsprofile

	Top6 Sektoren für REALISE						7 weitere Industrien
	Landwirtschaft	Energie	Infrastruktur	Sicherheit	Hoch- und Tiefbau	Umwelt	
Point ¹	0%	52%	26%	9%	29%	11%	17%
Linear Short ²	4%	4%	14%	5%	0%	0%	19%
Area Small ¹	78%	29%	26%	59%	57%	44%	52%
Linear Long ¹	0%	5%	23%	0%	7%	0%	6%
Area Large ¹	19%	9%	11%	27%	7%	44%	33%
Sektorumsatz der Drohnenindustrie 2018	\$1.400 Mio.	\$2.410 Mio.	\$1.040 Mio.	\$690 Mio.	\$370 Mio.	\$290 Mio.	\$1.730 Mio.
davon Umsatz durch REALISE-geeignete Plattformen ²	\$590 Mio.	\$520 Mio.	\$360 Mio.	\$280 Mio.	\$120 Mio.	\$120 Mio.	\$810 Mio.
Wachstumsprognose 2025	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑

Relevanz/Potential³ für REALISE

¹ Point: lokale/vertikale Strukturen, Linear Short: 0-5km Distanz, Linear Long: >5km Distanz, Area Small: 0-1km², Area Large: >1km²
² Hypothetischer Marktanteil errechnet sich wie folgt: Umsatz der Drohnenindustrie 2018 * (Starrflügel-Drohnenanteil (Folie 22) Area Small (x39%) + Anwendungsinfrastruktur Area Small + Starrflügel-Drohnenanteil Linear Long (x75%) + Anwendungsinfrastruktur Linear Long + Starrflügel-Drohnenanteil Area Large (x75%) + Anwendungsinfrastruktur Area Large)

Abbildung 22: Sektorrelevanzbewertung für REALISE

Im darauffolgenden 3. Schritt wurde die problemstellungsbezogene Bewertung der REALISE Technologie im konkreten Anwendungskontext und Vergleich mit komplementären oder alternativen Technologien begonnen. Zugleich wird hier bereits die grundlegende System-of-Systems- und Nutzlastkonfiguration für den Endkunden vordefiniert. Dies stellt einen arbeitsintensiven und für die jeweilige wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit hochsensitiven Schritt dar und legt die erzielbaren Monopolrenten⁴ der Innovation bereits weitgehend fest. Die Konfigurationserarbeitung erfolgt je nach Relevanz der vorselektierten Anwendungsfälle in unterschiedlichen Detailgraden. Abschließend kann für jeden Fall ein Problem-Solution-Fit Score vergeben werden.

Im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit fand zudem bereits im April 2018 ein Messestandauftritt des REALISE Projektes auf der Commercial UAV Expo Europe statt. Die Messteilnehmer zeigten überaus großes Interesse und es konnten eine große Zahl neuer Kontakte geknüpft werden. Des Weiteren hat die TUHH intensiv am Internetauftritt der realise.aero Webseite mitgewirkt.

Im Rahmen der Geschäftsmodellentwicklung wurde anschließend der Kreis der attraktivsten kommerziellen/zivilen Anwendungsfälle eingegrenzt und bewertet. Methodisch war hierbei notwendig die Arbeiten auf eine Wertschöpfungskettenebene oberhalb von Start-/Landesystemen für Starrflügel UAV zu verlagern, da sich wie im Folgenden begründet wird dieses Segment des Drohnenmarktes regulierungsbedingt noch in den Anfängen befindet.

Starrflügel UAV bestechen gegenüber Multikoptern und Hybriden Konfigurationen durch ihre besonders hohe Reichweiten-/Nutzlast Kombination. Um diese Reichweitenfähigkeit in einen kommerziellen Wettbewerbsvorteil umwandeln zu können, ist es zwingend notwendig, Mission fliegen zu können, welche sich weit vom Steuerer und/oder der Startbasis entfernen. Dies ist technisch-regulatorisch jedoch erst möglich, wenn der sogenannte BVLOS-Flug (beyond visual line of sight – Flug außerhalb des Sichtfeldes) ermöglicht wird. Noch größer werden die durch die Reichweitenfähigkeiten gewonnen Wettbewerbsvorteile mit ansteigendem Autonomiegrad der Missionsdurchführung selbst. Dies hätte insbesondere im reichweitenstarken Starrflügelsegment zur Folge, dass die Personalkosten je geflogener Strecke deutlich sinken. Im Rahmen der technologischen Entwicklung ist zu erwarten, dass durch die Ermöglichung von BVLOS und höheren Autonomiegraden das Marktvolumen von Starrflügel UAV mit einer hohen CAGR (compound annual growth rate) deutlich ansteigen könnte. Gegenwärtig ist das Starrflügelsegment im zivil-kommerziellen Bereich jedoch noch sehr überschaubar und die meisten Aktivitäten mit Starrflügel-UAV spielen sich noch im Bereich von (Transfer-) Forschung ab. Dies kann einerseits als Chance verstanden werden, disruptive Konzepte wie das Start-/Landesystem des REALISE Projektes frühzeitig zu etablieren. Andererseits würde der momentan adressierbare TAM (total addressable market) von Starrflügel Start-/Landesystemen deutlich unterschätzt werden, würde man als Zielmarkt lediglich den aktuellen Starrflügel-UAV Markt heranziehen.

Um das tatsächliche Marktpotential des REALISE Konzeptes zu ermitteln, ist es deshalb notwendig, die künftig zu erwartende Marktentwicklung des Starrflügel-UAV Marktes als Ganzes

3 ⁴ Vgl. hierzu Knieps (2008): Wettbewerbsökonomie

zu antizipieren und REALISE als ein UAV-Gesamtsystem für Langstreckenmissionen zu denken. Aus der anfänglichen Sammlung von über 100 denkbaren künftigen Anwendungsfällen wurden folgende Anwendungsfälle als besonders attraktiv selektiert:

- Katastrophenschutzfernerkundung: Waldbranderkennung, Überflutungen, Erdbeben
- Infrastrukturmanagement: Bahnstrecken, Pipelines, Stromtrassen (Fernerkundung)
- Maritime Fernerkundung: Illegaler/unregulierter Fischfang, Umweltverschmutzung
- Hoheitliche Aufgaben der Grenzsicherung und Polizei
- Personenfernverkehr auf Routen mit geringer Kapazität
- Airborne Wind Energy Harvesting (Systemintegration in AmpyxPower Konzept)

Die selektierten Anwendungsfälle weisen unterschiedliche technologische Komplexität sowie unterschiedliche Marktgrößen und Rahmenbedingungen auf. Für jeden Anwendungsfall muss das REALISE Systemkonzept gegenüber denkbaren Alternativtechnologien verglichen werden. Alternativtechnologien gruppieren sich hierbei in insgesamt in vier unterschiedliche Technologiesegmente, welche jeweils auf einen Teil der Anwendungsfälle anwendbar sind:

- Anderweitig luftgestützte Plattformen zur Fernerkundung und/oder Transport
- Satellitengestützte Plattformen zur Fernerkundung
- Bodentransporttechnologien
- Energy Harvesting Technologien im Verhältnis zu Airborne Wind Energy

Beispielhaft für die Kategorie anderweitig luftgestützte Plattformen wurde unter anderem eine UAV-Datenbank aufgebaut, mit Hilfe derer sich analysieren lässt, welche Leistungsbereiche von UAV's sich mit welchen Systemkonzepten für Start und Landung abdecken lassen. Die UAV Lösungskonzepte wurden ergänzt um klassische Luftfahrtkonzepte wie bemannte Flugzeuge und Helikopter anschließend miteinander verglichen und bewertet.

Technical Project Form

General Information	General Data and Performance Data	Payload Data	Price and Quantity in Service						
Project ID: <input type="text" value="27"/> Project Name: <input type="text" value="Bramor ppK"/> Market Segment: <input type="text" value="Professional"/> Applications: <input type="text" value="Surveillance; Animal monit"/> Autonomy Level: <input type="text" value="Automated System"/> Manufacturing: <input type="text" value="Mass Production"/> Release Date: <input type="text"/>	Dimensions (LxWxH): <input type="text" value="1,0"/> x <input type="text" value="2,3"/> x <input type="text" value="0,3"/> m OEW: <input type="text"/> kg MTOW: <input type="text" value="4,7"/> kg Climb Rate: <input type="text"/> m/s Wind Resistance: <input type="text"/> m/s Max Altitude MSL: <input type="text" value="5.000"/> m Min Operating Temperature: <input type="text" value="-25"/> °C Max Operating Temperature: <input type="text" value="45"/> °C Endurance: <input type="text" value="210"/> min Operational Radius: <input type="text" value="40,0"/> km Cruise Speed: <input type="text" value="16"/> m/s Max Airspeed: <input type="text" value="30"/> m/s Max Range: <input type="text" value="150,0"/> km Range (km): <input type="text" value="150"/> Speed (m/s): <input type="text"/> Payload (kg): <input type="text"/> <small>Datensatz: 1 von 1 Kein Filter Suchen</small>	Payload Dimensions (<input type="text"/> x <input type="text"/> x <input type="text"/> m) Min Load Capacity: <input type="text"/> kg Max Payload Mass: <input type="text" value="1,0"/> kg Payload Connection: <input type="text" value="manual"/> Payload Features: <input type="text" value="Camera Sensor"/> Other Data Prop Technology: <input type="text" value="Battery"/> Number of Engines: <input type="text" value="1"/> System Power: <input type="text"/> kW Energy Capacity: <input type="text"/> kWh Takeoff Mode: <input type="text" value="Horizontal"/> Lift Concept: <input type="text" value="Fixed-Wing"/> Passenger Capacity: <input type="text" value="0"/>	Date: <input type="text"/> Price: <input type="text"/> <small>Datensatz: 1 von 1 Kein Filter</small> Related Sources C-Astral - UAS Website C-Astral - Enduring-Precision! <small>Datensatz: 1 von 2 Kein Filter</small> Related Stakeholders <table border="1"> <thead> <tr> <th>STKH_ID</th> <th>STKH_Role</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>C-Astral</td> <td>Manufacturer</td> </tr> <tr> <td>Lockheed</td> <td>Supplier</td> </tr> </tbody> </table> <small>Datensatz: 1 von 2 Kein Filter</small> Remarks 1-2 person operation	STKH_ID	STKH_Role	C-Astral	Manufacturer	Lockheed	Supplier
STKH_ID	STKH_Role								
C-Astral	Manufacturer								
Lockheed	Supplier								

Abbildung 23: Beispielhafter Datensatz der UAV-Datenbank

Vorteile	Starrflügelrohnen mit Landebahninfrastruktur	Helikopter	Flugzeug	Drehflügelrohnen	UAV mit Hybridkonfiguration	Starrflügelrohnen mit Seil-, Fallschirm- oder Netzfangvorrichtung
Starrflügel UAV mit Schienenlandesystem gegenüber:						
Maritime Aufklärung (z.B. illegaler Fischfang)	++	++	++	0	0	0
Grenzschutz	++	0	+	0	+	0
Search & Rescue	++	++	++	0	0	++
Kostenreduktion (CapEx)	++ (neue Infrastruktur) / - (Bestandslandebahn)	++	++	0	-	0
Erweiterte Einsatzbedingungen (Seitenwinde, Witterung)	++	0	+	0	+	0
Automatisierung (Kostenreduktion OpEx)	++	++	++	0	0	++
Treibstoff/Energie (Kostenreduktion OpEx)	+	++	++	+	+	+
Schadenfreiheit (Verfügbarkeit und Kostenreduktion OpEx)	0 bei Vergleich mit Elektra	++	0	0	0	++
Flexibilität des Einsatzortes	++	-	++	-	-	0
Höhere Nutzlast	+	0 (skalierbar)	0 (skalierbar)	++	++	+
Größere Ausdauer und Reichweite	+	++	+	++	+	+
Missionskapazität (Geschwindigkeit / beobachtbare Fläche / Tonnenkilometer)	0 / +	++	0 (skalierbar)	++	+	0
Leiser Betrieb im Missionsgebiet u. bei Start und Landung	+	++	++	+	+	+

Abbildung 24: Vergleichende Vorteilhaftigkeitsübersicht luftgestützter Plattformen

Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeiten bildeten lag auf der Analyse des Zusammenspiels von Langstrecken UAVs und satellitengestützten Plattformen. Dies ist einerseits unter einem kompetitiven Blickwinkel zu betrachten im Sinne einer Alternativtechnologieplattform zu UAVs für Fernerkundungsaufgaben. Andererseits ergeben sich auch gewisse komplementäre Perspektiven, welche einen erheblichen Einfluss auf die Auswahl des Typs luftgestützter Plattformen haben.

Die Fähigkeit ortsunabhängig und mit hoher Verfügbarkeit in Echtzeit große Datenmengen übertragen zu können, ist für UAVs in gewissen Anwendungsfällen wie IUU Fishing und hoheitlichen Aufgaben essentiell. Nicht immer besteht im Missionsgebiet die Möglichkeit auf bodengebundene Mobilfunkinfrastruktur (4G) zurückzugreifen, weshalb entweder VHF Radio oder in einigen Fällen sogar auf Satellitenkommunikation zurückgegriffen werden muss. Insbesondere Satellitenkommunikation war auf Grund der Antennengröße bislang vor allem großen UAVs und Flugzeugen vorbehalten. Fortschritte in der Antennentechnik machen in-zwischen jedoch geostationären Satcom für vergleichsweise kleine UAV möglich, welcher jedoch erhebliche Bandbreiteneinschränkungen (200 kbit/s) und hohe Kosten aufweist. Erhebliche Verbesserung hinsichtlich Bandbreite, Verfügbarkeit und Kosten sind von neuartigen sogenannten LEO-Superconstellations (low earth orbit) zu erwarten, von welchen Starlink von SpaceX das aussichtsreichste Programm ist. Bandbreiten im 2-stelligen mbit/s-Bereich bei deutlich geringeren Kosten und moderaten Antennengrößen könnten Satcom für UAV mit MTOW (maximum take-off weight) zwischen 20kg und 100kg zu einem erheblichen Wettbewerbsvorteil über weiten, unerschlossenen Missionsgebieten verhelfen.



Abbildung 25: Cobham AVIATOR UAV 200 Satcom Antenne (links); Starlink satcom low earth orbit constellation mit hoher Bandbreite (rechts)

Im Bereich der Fernerkundung laufen Arbeiten zur Gegenüberstellung von Satellitentechnologie und UAV-gestützten Sensortechnologien. Während Satelliten erheblich größere Flächenerkundungsleistungen aufweisen, bieten UAVs eine höhere operationelle Flexibilität, Auflösung und Reaktionsgeschwindigkeit. Beispielhaft sei hier die Waldbrandfrüherkennung genannt, bei welcher Detektionsintervalle von weniger als einer Stunde notwendig sind. Eine Satellitenkonstellation müsste, um diese revisit-time-Anforderung erfüllen zu können, aus mehreren hundert bis tausend Satelliten bestehen, was sie gegenüber einem regelmäßigen von UAVs abgeflogenen Scanpattern unwirtschaftlich macht.

Die wettbewerbliche Analyse von Langstrecken UAV Einsatzszenarien gegenüber anderen Fernerkundungsmethoden bedarf insbesondere bei größeren und komplexeren Infrastrukturen eines automatisierten Ansatzes zur Generierung möglichst valider Missionskonzepte auf Basis einer Parametervariation von UAV-Fähigkeiten und Operationsbasenplatzierungen. Dies wird umgesetzt mittels Vehicle-Routing Heuristiken, welche geeignet sind die Problemkomplexität auch bei großen Infrastrukturen bewältigen zu können. Nicht nur kann so die Kostenbasis von Langstrecken UAVs im allgemeinen analysiert werden, sondern es kann auch das ökonomische Potential der reichweitensteigernden Gewichtseinsparungen durch das REALISE Start-/Landekonzept untersucht werden.

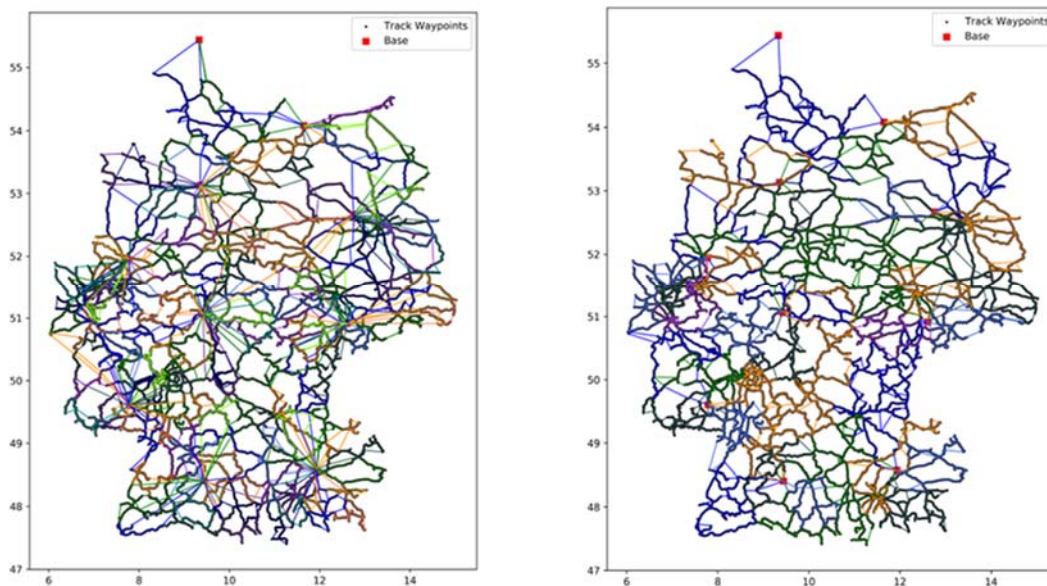


Abbildung 26: UAV-Befliegung des deutschen Bahnnetzes mit Reichweiten von 400km (links) und 1000km (rechts)

Über eine Reichweitenvariation verschiedener UAVs und UAV-Modifikationen können somit folgende Missionslängen für eine einmalige Befliegung ermittelt werden:

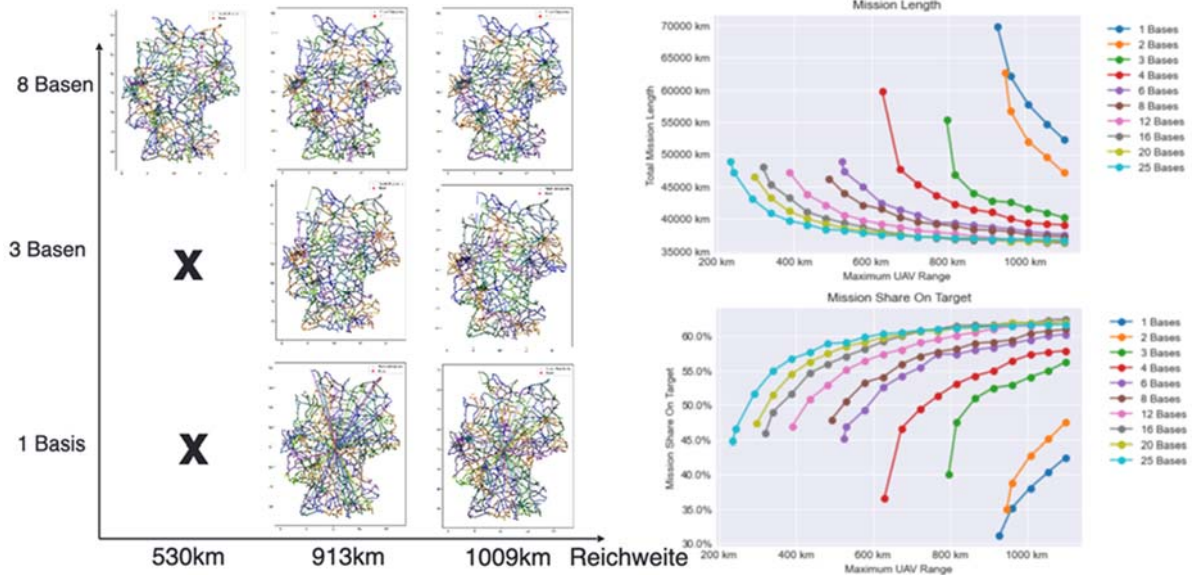


Abbildung 27: Missionen Parameteranalyse für eine einmalige Befliegung des deutschen Bahnnetzes

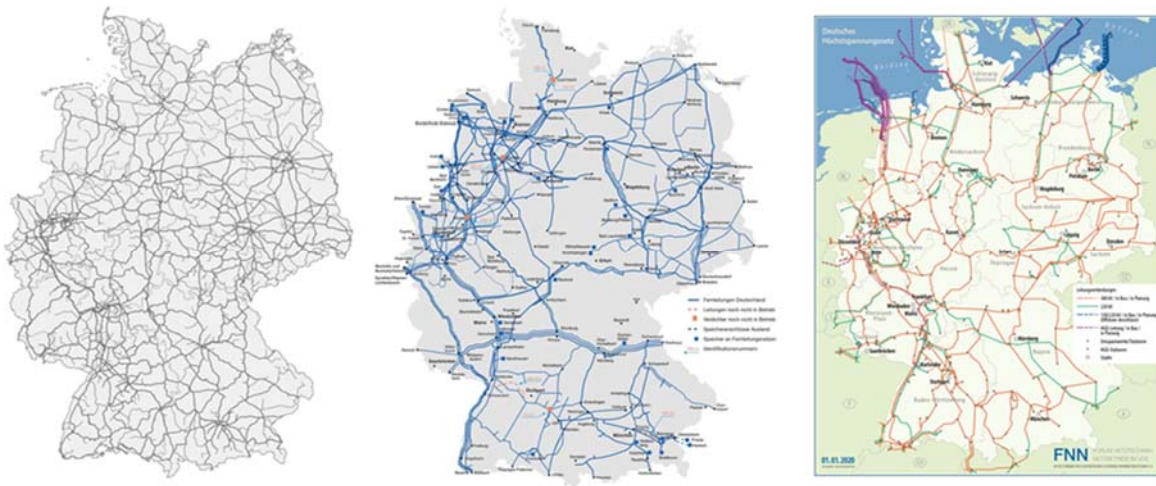


Abbildung 28: Energienetz Infrastrukturen: Bahnnetz, Gasfernleitungen, Stromnetz

In einem an die Missionsdefinition anschließenden Schritt wurde eine Kostenmodellierung der unterschiedlichen Missionskonfigurationen vorgenommen. Dabei konnte gezeigt werden, dass mit zunehmender Reichweite der eingesetzten UAVs merkliches Optimierungspotential durch verbesserte Routenführung innerhalb einer Konfiguration mit einer bestimmten Anzahl an Start-/Landebasen besteht. Die weitaus größeren reichweitenabhängigen Kostensenkungspotentiale resultieren aus der Möglichkeit weniger Start-/Landesysteme inkl. zugewiesener UAV einzusetzen. Dies verbessert die Kapazitätsauslastung der UAS, was wiederum die notwendigen anzusetzenden Abschreibungen je Missionsflugkilometer verringert. Dem entgegenwirkt der Effekt der besseren Befliegungseffizienz bei größeren Basenzahlen, da diese somit durchschnittlich näher an der Zielinfrastruktur platziert werden können. Kann eine „dichtere“ Konfiguration mit mehr Start- / Landebasen durch häufige Befliegung oder weitere externe

Aufträge in ihrer Kapazität ohnehin ausgelastet werden, so überwiegt der Effekt der Befliegungseffizienz und die dichtere Konfiguration wird wirtschaftlicher.

All dies hat Implikationen wiederum für den ökonomischen Wert von kapitalintensiven High Performance Drohnensystem mit großer Reichweite (wie gewichtsoptimierte und automatisierte REALISE Systeme), gegenüber technisch weniger aufwendigen Systemen mit geringer Reichweite, von denen wiederum deutlich mehr Systeme eingesetzt werden müssten.

Welche Systemstrategie die bessere ist, lässt sich jeweils nur in Bezug auf eine bestimmte Infrastruktur beantworten. Am Beispiel der Befliegung des deutschen Bahnnetzes, könnten folgende Befliegungskosten ermittelt werden.

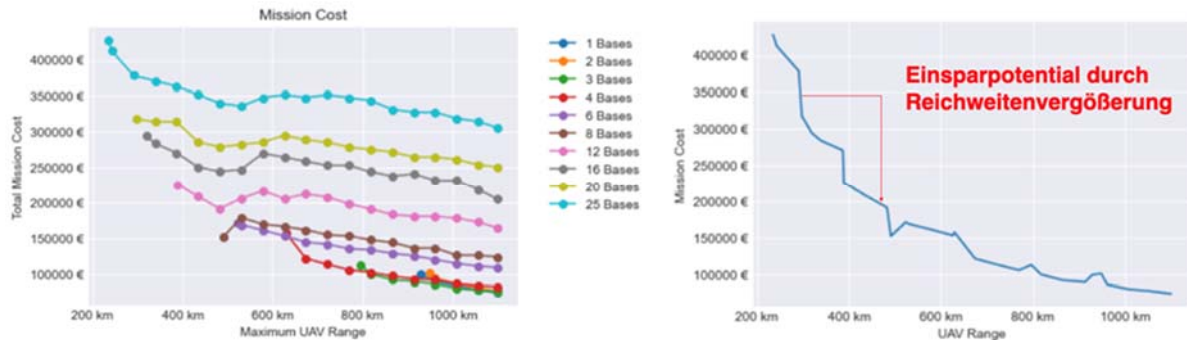


Abbildung 29: Einfluss von AUS-Gesamtconfiguration auf Missionskostenanalyse

	Kosten je Flugstunde @ 90km/h camera cruise	Kosten je Mission Vollständige Befliegung 34.000km
S360-ElektRail	55€ - 220€	ca. 50'000€
S360-Runway	75€ - 450€	ca. 100'000€
Helikopter	1.500€	> 1 Mio. €
Quantum Systems Vector (manual/automatic)	tbd	tbd

Abbildung 30: Missionskostenvergleich

Zusammenfassend ist hinsichtlich der Bewertung festzustellen, dass fixed wing UAS basierend auf REALISE Start- / Landesystemen in bestimmten Anwendungsfeldern durchaus hohe Marktchancen eingeräumt werden können. Im Wettbewerb bestehen diese vor allem durch die bessere Automatisierbarkeit des Betriebes von Starrflügeldrohnen und den dadurch resultierenden Einsparungen bei Personalkosten sowie die durch das Start- / Landekonzept nochmals gesteigerte Reichweite des UAVs selbst, welche eine Reduktion der eingesetzten Systeme erlaubt. Insbesondere Anwendungen mit sehr großen zu befliegenden Infrastrukturen sowie häufigen und regelmäßigen Befliegungsintervallen können die höhere technische Systemkomplexität durchaus rechtfertigen.

3.10 Andere wesentliche Ereignisse

Es sind keine anderen wesentlichen Ereignisse eingetreten.

3.11 Relevante F&E Ergebnisse Dritter

Keine.