

UNTERSTÜTZUNG DER SICHERHEIT UND EFFIZIENZ BEI DER LUFTRAUMINTEGRATION VON RAKETENSTART- UND WIEDEREINTRITTSOPERATIONEN IN EUROPA

A. Stahnke, T. Rabus, S. Kaltenhäuser,
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Flugführung,
Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig, Germany

Zusammenfassung

Vor dem Hintergrund zunehmender Raumfahrtaktivitäten und der Kommerzialisierung der Raumfahrt werden in Europa aktuell verschiedene Ideen zu potentiellen Spaceports diskutiert und entwickelt. In diesem Zusammenhang wird es künftig notwendig sein, eine Balance zwischen den kommerziellen Interessen der zivilen Luftfahrt und der Raumfahrt zu finden. Aus diesem Grund entwickelt das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) zurzeit ein sogenanntes Launch-Coordination-Center (LCC) zur Missionsunterstützung und -überwachung. Das LCC wird verschiedene Services für die Planung, Durchführung und Nachbereitung von Starts sowie Wiedereintritten und Landungen von Raumfahrzeugen anbieten. Dabei liegt der Fokus auf der Reduktion des Einflusses von Raumfahrzeugoperationen auf den Luftverkehr im europäischen Luftraum.

Keywords

Luftfahrt; Raumfahrt; Integriertes Luft- und Raumfahrtverkehrsmanagement; Start; Wiedereintritt

1. EINLEITUNG

Seit 2004 haben die Raumfahrtaktivitäten global zugenommen, wie anhand von Zahlen zu Raketenstarts und gestarteten Satelliten erkennbar ist [1]. Gleichzeitig findet eine Kommerzialisierung der Raumfahrt statt, wobei der Trend hin zu Satellitenkonstellationen und flexibleren Startsystemen geht. Im Vergleich zu bisherigen Startlösungen sollen diese Systeme eine schnellere, flexiblere und kostengünstigere Alternative bieten, beispielsweise um Kleinsatelliten in erdnahe Umlaufbahnen (Low Earth Orbits, LEOs) zu bringen oder zur Durchführung orbitaler sowie suborbitaler Flüge für wissenschaftliche Experimente oder zu touristischen Zwecken.

Basierend auf diesen Trends wird davon ausgegangen, dass es zukünftig auch in Europa vermehrt zu Raumfahrtaktivitäten kommen wird. Unterstützt wird diese Annahme ebenfalls durch die in verschiedenen europäischen Ländern vorangetriebenen Bemühungen zum Ausbau nationaler beziehungsweise europäischer Zugänge zum Weltraum, beispielsweise durch den Aufbau von Weltraumbahnhöfen (Spaceports) sowie die Förderung privater Raumfahrtunternehmen [2; 3; 4].

In Hinblick auf das bereits bestehende europäische Luftverkehrssystem bedeutet dies eine Interaktion mit neuen Luftraumnutzern. Solange es sich hierbei um einzelne, staatliche Raumfahrtakteure handelt, kann diesen Vorrang vor der kommerziellen Luftfahrt gegeben werden. Sobald jedoch beide Seiten kommerzielle Interessen verfolgen, bedarf es der Entwicklung feiner abgestimmter Verfahren zur Integration von Raumfahrzeugen¹ in das bestehende Luftverkehrssystem. Darüber hinaus gilt es auch Einflüsse auf die Schifffahrt sowie deren Interessen zu berücksichtigen.

Vor diesem Hintergrund ist die Zusammenführung von

Daten aus der Luftfahrt und der Raumfahrt sowie der Schifffahrt für die Realisierung eines integrierten Verkehrssystems der Zukunft unerlässlich. Zu diesem Zweck wird am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) aktuell ein Launch-Coordination-Center (LCC) entwickelt. Dabei wird auf Erfahrungen und Erkenntnissen aus früheren Forschungsprojekten des DLR mit Bezug zum integrierten Luft- und Raumfahrzeugbetrieb aufgebaut [5; 6; 7].

Im Kontext der Integration von Raumfahrzeugen in den Luftraum soll das LCC künftig eine zentrale, verwaltende und koordinierende Rolle einnehmen. Raumfahrt Daten werden in das LCC eingespeist, mit Luftfahrt Daten angereichert und für Planungsprozesse, Echtzeit-Monitoring sowie die Nachbereitung genutzt. Relevante Ergebnisse, wie berechnete Sicherheitszonen (Hazard Areas, HAs), werden Nutzern entsprechend zur Verfügung gestellt.

Vordergründiges Ziel des LCC ist dabei die Reduktion des Einflusses von Raumfahrtaktivitäten auf andere Luftraumnutzer. Dass der Raumfahrtbetrieb teilweise bereits Auswirkungen auf den Luftverkehr hat, konnte beispielsweise durch die Federal Aviation Administration (FAA) gezeigt werden [8]. Demnach hatte ein durch das Raumfahrtunternehmen SpaceX im Jahr 2018 am Kennedy Space Center durchgeführter Raketenstart signifikante Umwege und Verspätungen für den Luftverkehr zur Folge (insgesamt 34.841 zusätzliche nautische Meilen und 4.645 Minuten Verspätung) [8]. Grund hierfür ist die weiträumige Einrichtung von Sicherheitszonen während Raketenstarts, die verhindern sollen, dass Luftfahrzeuge in potentiell gefährdete Gebiete einfliegen. Durch das LCC sollen diese HAs bereits in der Planungsphase feiner abgestimmt und während des Betriebs zeitlich effizienter aktiviert und wieder freigegeben werden.

Daneben wird mit dem LCC die Erhöhung des Situationsbewusstseins aller Beteiligten angestrebt, um eine fundierte Entscheidungsfindung zu unterstützen. Darüber

¹ Raumfahrzeuge in diesem Kontext umfassen, in Abgrenzung zu anderen Luftfahrzeugen, alle künstlichen Körper, die sich

zeitweise im Weltraum (je nach Definition, z.B. ab 80 km oder 100 km Flughöhe [20]) befinden und sich im Luftraum bewegen.

hinaus soll das LCC Services bereitstellen, die sogenannten Launch-on-Demand, also zeitlich flexible Startaktivitäten, ermöglichen. Zudem wird die Nutzbarkeit der LCC-Services für alle Typen von Raumfahrzeugen sowie alle Arten von Start- und Wiedereintrittsoperationen angestrebt.

Zur Realisierung der Services werden entsprechende Softwarewerkzeuge (Launch Solutions, LaSol) als Hauptbestandteil des LCC entwickelt.

2. OPERATIONELLER HINTERGRUND

Um Softwarelösungen entwickeln zu können, die eine Integration von Raumfahrzeugen in das europäische Luftverkehrssystem unterstützen, sind Kenntnisse über die operationellen Rahmenbedingungen unerlässlich.

2.1. Start- und Wiedereintrittsoperationen

Raumfahrtaktivitäten können staatlicher oder kommerzieller Natur sein und wirtschaftlichen, wissenschaftlichen, touristischen oder militärischen Zwecken dienen. Dabei kann in bemannte und unbemannte Raumfahrt unterschieden werden. Des Weiteren können die Flüge von Raumfahrzeugen orbital oder suborbital durchgeführt werden. Bei orbitalen Raumflügen wird zumeist eine Umlaufbahn (Orbit) um die Erde angestrebt. Bei suborbitalen Flügen wird die zur Beibehaltung einer Umlaufbahn notwendige Geschwindigkeit (Orbitalgeschwindigkeit) nicht erreicht und das Raumfahrzeug kehrt nach Erreichen des Scheitelpunktes (Apogäum) zur Erde zurück. Orbitalflüge werden entsprechend durchgeführt, um Satelliten in Erdumlaufbahnen zu bringen, während suborbitale Flüge beispielsweise zur Durchführung wissenschaftlicher Experimente und für touristische Zwecke genutzt werden. In Hinblick auf suborbitale Flüge werden zudem A-to-A und A-to-B Flüge unterschieden:

- A-to-A: Start und Landung am gleichen Spaceport und räumliche Nähe des Manövers zum Start-/Landeplatz
- A-to-B: Start und Landung an unterschiedlichen Spaceports

Ähnlich wie bei suborbitalen A-to-B-Flügen findet auch bei Orbitalflügen eine größere Horizontalbewegung des Raumfahrzeugs statt. Dadurch ergeben sich, je nach Flugbahn eines Raumfahrzeugs, unterschiedlich große Sicherheitszonen und Auswirkungen auf den Luftverkehr. Aktuell finden von Europa aus lediglich Raketenstarts für suborbitale Flüge statt.² Verschiedene Europäische Länder haben jedoch bereits angekündigt, zukünftig auch orbitale Missionen durchführen zu wollen [3; 4].

Des Weiteren können, je nach Bauweise, Starts- und Landungen von Raumfahrzeugen horizontal oder vertikal ausgeführt werden. In der Regel finden vertikale Operationen an landseitig fest integrierten Spaceports statt. Zum Teil existieren aber auch Konzepte für mobile Start- und Landeplätze, beispielsweise für Aktivitäten auf See. Für den Horizontalbetrieb hingegen werden Start- und Landebahnen benötigt. Der Horizontalbetrieb eignet sich zudem besonders zur Integration des Raumfahrzeugbetriebs in die Infrastruktur von Flughäfen (Dual-Use-Airport). Des Weiteren finden Landungen von Raumfahrzeugen,

beispielsweise die von Kapseln nach einem Wiedereintritt, auch über offenen Wasser- oder Landflächen statt. Ebenso landen Raumfahrzeugteile, wie abgetrennte Stufen oder Nutzlastverkleidungen, zumeist über freien Flächen. Grundsätzlich werden die Trajektorien von Raumfahrzeugen bei Starts, Wiedereintritten und Landungen zumeist so geplant, dass sie möglichst dünn besiedelte und wenig frequentierte Gebiete an Land und auf See tangieren, um potentielle Risiken für Menschen und Güter zu minimieren.

Darüber hinaus können sich Raumfahrzeuge im Luftraum auf unterschiedliche Weise bewegen, wobei sich auch die Art des Antriebs unterscheiden kann. Herkömmliche Trägerraketen werden beispielsweise chemisch angetrieben und vertikal gestartet. Neuere, kleinere Trägersysteme (Microlauncher) verfügen ebenfalls über chemische Antriebe und können vertikal starten, daneben eignen sie sich aber auch für Horizontalstarts im Rahmen eines Air-Launch. Dabei wird ein Raumfahrzeug am Boden an einem Trägerflugzeug befestigt und bei Erreichen einer definierten Flughöhe wieder freigegeben. Anschließend setzt das Raumfahrzeug seine Flugbahn mit Hilfe der eigenen Triebwerke fort. Antriebssysteme werden zudem auch für Landungen, beispielsweise von wiederverwendbaren Raketenstufen, genutzt. Vertikale und horizontale Landungen werden zum Teil aber auch ohne aktiven Antrieb durchgeführt. Stattdessen gleitet das Raumfahrzeug oder es werden Fallschirme zur Reduzierung der Geschwindigkeit genutzt.

Die Art des Antriebs sowie weitere technische Eigenschaften beeinflussen dabei auch die Manövrierbarkeit eines Raumfahrzeugs im Luftraum. Dadurch ergeben sich, je nach Raumfahrzeug, verschiedene Anforderungen für dessen Integration in das bereits bestehende Luftverkehrssystem sowie unterschiedliche Auswirkungen auf andere Luftraumnutzer.

2.2. Luftverkehrsmanagement

Der europäische Luftraum weist eine komplexe Struktur mit einer hohen Anzahl an Luftraumnutzern und Dienstleistern auf. Er gliedert sich in einen unteren und einen oberen Luftraum bestehend aus mehreren Fluginformationsgebieten (Flight Information Regions, FIRs), die wiederum in eine Vielzahl an Sektoren unterteilt sind. BILD 1 zeigt beispielhaft das kumulierte Verkehrsaufkommen für den 24.06.2019 sowie die FIRs des unteren Luftraums in Europa. Die Fluginformationsgebiete werden zum Teil vom europäischen Netzwerkmanager (NM), der European Organisation for the Safety of Air Navigation (EUROCONTROL), und zum Teil von nationalen Flugsicherungsdienstleistern (Air Navigation Service Providers, ANSPs) verwaltet.

Dabei ist EUROCONTROL in Zusammenarbeit mit den nationalen ANSPs für das europäische Luftverkehrsmanagement (Air Traffic Management, ATM) verantwortlich. Durch das ATM soll allen beteiligten Akteuren ein sicherer und effizienter Luftverkehrsbetrieb ermöglicht werden. ATM umfasst das Luftraummanagement (Airspace Management, ASM), das Verkehrsflussmanagement (Air Traffic Flow Management, ATFM) und die Flugsicherung (Air Traffic Services, ATS) sowie mehrere Sub-Services.

Vor dem Hintergrund einer Integration von

² Europäischer Spaceport für Orbitalstarts: Guiana Space Centre (Französisch-Guayana)

Raumfahrzeugen in den Luftraum müssen raumfahrtspezifische Daten in die verschiedenen Bereiche des ATM einfließen, um Anforderungen des ATM und des Raumfahrtverkehrsmanagements (Space Traffic Management, STM) gleichermaßen berücksichtigen zu können.

Beispielsweise werden im Rahmen von ATS Flugverkehrskontrolldienste (Air Traffic Control, ATC) zur Koordination des Luftverkehrs bereitgestellt. Während des Betriebs von Raumfahrzeugen kann es daher im Rahmen der Flugverkehrskontrolle notwendig sein, Luftfahrzeuge entsprechend der vom Raumfahrzeugbetreiber (Launch and Re-entry Operator, LRO) veröffentlichten Informationen umzuleiten und als Gefahrengebiete ausgewiesene Zonen nach Beendigung einer Raumfahrtaktivität wieder für den Luftverkehr freizugeben.

Ein weiterer essentieller Bestandteil des ATM ist das ATFM, beziehungsweise das Air Traffic Flow and Capacity Management (ATFCM). ATFCM ist in vier Phasen gegliedert, die verschiedene Planungsstadien, Änderungen in Echtzeit und Prozesse zur Nachbereitung umfassen: strategische, pre-taktisch, taktische und post-operationelle Phase. Vor dem Hintergrund der Übermittlung relevanter Informationen zur Integration des Luft- und Raumfahrtbetriebs gilt es daher insbesondere die Abläufe und Anforderungen dieser spezifischen Phasen zu berücksichtigen.

Darüber hinaus kann es im Rahmen des ASM für den Betrieb von Raumfahrzeugen notwendig sein, Luftraumänderungen zu beantragen. Informationen zur Luftraumstruktur oder zu besonderen Ereignissen, die über einen längeren Zeitraum von Relevanz sind, werden in den nationalen Luftfahrthandbüchern (Aeronautical Information Publication, AIP) durch die nationalen ANSPs veröffentlicht. Kurzfristige Änderungen und Informationen, die (noch) nicht in den AIPs veröffentlicht wurden, werden als Notice to Airmen (NOTAM) herausgegeben.

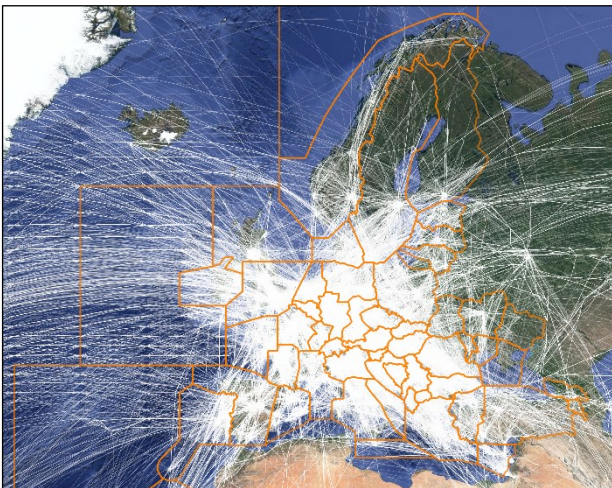


BILD 1. Kumulierter Luftverkehr (24.06.2019) und FIRs des unteren Luftraums (AIRAC Cycle 1913) [Daten: EUROCONTROL]

3. GEGENWÄRTIGE VERFAHREN

Ähnlich wie beim ATFCM lassen sich auch die aktuellen Prozesse im Rahmen von Raumfahrtaktivitäten in verschiedene Phasen einteilen.

3.1. Vorbereitung

Um Starts- oder Wiedereintrittsoperationen durchführen zu können, benötigt der LRO eine Betriebslizenz des Landes, in dem das Raumfahrzeugs betrieben werden soll. Des Weiteren kann es notwendig sein, eine Änderung des Luftraums zu beantragen. Diese beiden Aspekte sind Teil der langfristigen Planung während der Phase zur Vorbereitung der Mission. [9; 10]

Wird eine Betriebslizenz bei einer entsprechenden Behörde beantragt, müssen verschiedene Informationen durch den Antragsteller bereitgestellt werden, beispielsweise zum angedachten Raumfahrzeug, gewünschten Ort des Starts oder der Landung und der geplanten Trajektorie. Zudem müssen im Rahmen einer übergeordneten Flugsicherheitsanalyse (Flight Safety Analysis) verschiedene Untersuchungen, zum Beispiel zu Trümmerverteilungen, Gefahrenstoffen und zu den Gefahren durch Überdruckphänomene, durchgeführt werden. Diese Analysen dienen der Gewährleistung der Sicherheit der Missionsteilnehmer, externer Stakeholder, wie der Zivilbevölkerung, Luftraumnutzern und Seefahrern, sowie von Gütern. Um alle Beteiligten in ausreichender Weise zu informieren, sind zudem entsprechende Vereinbarungen mit Luftfahrern, Seefahrern, Rettungsdiensten und den Spaceport-Betreibern zu treffen. [11; 12; 13]

Um die Sicherheit in Bezug auf gefährliche Trümmer während des Fluges zu gewährleisten, werden HAs in der Luft, an Land und auf See für nominale und nicht-nominale Ereignisse, wie zum Beispiel für abgeworfene Raketenstufen und Nutzlastverkleidungen sowie für den Fall einer Explosion auf der Flugbahn, im Vorfeld durch den Betreiber identifiziert. Luftfahrer, Seefahrer und andere Beteiligte werden vor einer geplanten Operation entsprechend über diese HAs informiert. Zur Kommunikation von HAs werden dabei NOTAM und NOTMAR (Notice to Mariners) verwendet. [11; 14]

Die Daten, die der Netzwerkmanager und die Flugsicherungsdienstleister vom Raumfahrzeugbetreiber erhalten, werden hinsichtlich des Einflusses der geplanten Mission auf den Luftverkehr untersucht. Das Ergebnis dieser Untersuchung hat Einfluss auf die Entscheidung über Ort und Zeitpunkt einer Start- oder Wiedereintrittsoperation. Zudem werden potentielle Konflikte identifiziert und behoben. Dabei werden die HAs im Zuge der Vorbereitung des Starts oder des Wiedereintritts in einem iterativen Prozess kontinuierlich angepasst. Des Weiteren können Piloten und Airlines die bereitgestellten Informationen über HAs für ihre Flugplanung nutzen. [14; 15; 16]

3.2. Durchführung

Die Phase zur Durchführung der Mission beginnt bis zu 24 Stunden vor einem Start oder Wiedereintritt. Die Flugverkehrskontrolle beginnt zeitnah vor dem Beginn der Operation mit der Umleitung des Flugverkehrs, der nicht bereits auf Basis der NOTAM angepasst wurde. Dabei erhält die Flugverkehrskontrolle aktuelle Informationen über den Betriebsstatus via E-Mail oder Telefon vom LRO gemäß den Bedingungen der zuvor getroffenen Vereinbarung. [11; 17]

Während des Fluges muss der Betreiber die Echtzeitüberwachung des Raumfahrzeugs gewährleisten. Dabei wird der Zustandsvektor des Raumfahrzeugs fortlaufend aufgezeichnet. Dahingegen stehen der Flugverkehrskontrolle aktuell keine Echtzeitdaten der Mission zur

Verfügung. Relevante Informationen werden stattdessen per E-Mail oder Telefon durch den Raumfahrzeugbetreiber weitergeleitet. [11; 17; 18]

Tritt ein nicht-nominales Event ein, wird eine Refined Hazard Area (RHA) berechnet und an die betroffenen AN-SPs übermittelt. Dort werden die Koordinaten der RHA beispielsweise durch einen Verkehrsmanager transkribiert und an die Fluglotsen weitergegeben. Die Fluglotsen wiederum kontaktieren die betroffenen Flugzeuge und leiten diese um. Dabei wird die RHA im Zuge der Notfallprozeduren nicht aktualisiert. [17; 18]

Am Ende der Operation werden die zuvor für den Luftverkehr beschränkten Gebiete wieder freigegeben [17].

3.3. Nachbereitung

Während der Phase der Nachbereitung werden Beurteilungen und Analysen durchgeführt. Die aufgezeichneten Real-Daten und Monitoring-Informationen werden mit den vor der Mission getroffenen Annahmen und Vorhersagen verglichen. Darüber hinaus werden die Auswirkungen des Raumfahrzeugbetriebs auf den Luftverkehr bewertet. Die daraus gezogenen Erkenntnisse werden festgehalten und die Ergebnisse für künftige Operationen berücksichtigt. Die Ergebnisse werden zudem in Berichten gespeichert. Allerdings existiert kein zentrales Repository, in dem die Daten gesammelt und abgerufen werden können. [17]

4. BEDARF FÜR EIN LCC

Wie gezeigt, sind viele Stakeholder in unterschiedlichen Positionen an Start- und Wiedereintrittsvorgängen und damit verbundenen Luft- und Raumfahrtaktivitäten beteiligt und werden von ihnen beeinflusst. Mit Blick auf Europa ergeben sich dabei besondere Herausforderungen aufgrund der fragmentierten Luftraumstruktur mit einer Vielzahl von ANSPs, heterogenen ATM-Systemen und uneinheitlichen nationalen Vorschriften für den Raumflugbetrieb. Darüber hinaus wird es für Piloten aufgrund einer Überfülle an NOTAM immer herausfordernder, die für sie wirklich relevanten Informationen entlang ihrer geplanten Flugrouten zu identifizieren [19]. Vor diesem Hintergrund wäre ein erhöhtes Situationsbewusstsein für Raumfahrtoperationen im Luftraum für alle Beteiligten dienlich.

Der Aufbau eines LCC als Schnittstelle zur Zusammenführung, Verarbeitung und Verteilung relevanter Daten für verschiedene Stakeholder zielt darauf ab, die Herausforderungen derzeitiger Operationen anzugehen, durch:

- Ermöglichung quantitativer Bewertungen der Auswirkungen von Start- und Wiedereintrittsoperationen auf das Luftverkehrssystem.
- Bereitstellung effizienter Verfahren zur optimalen Planung von Start- und Wiedereintrittsoperationen in Abstimmung mit allen Beteiligten.
- Aufbau der Fähigkeit für alle Stakeholder Daten zu Start- und Wiedereintrittsoperationen auf effiziente Weise zu teilen und zu erhalten.
- Unterstützung einer zeitnahen und effizienten Entscheidungsfindung während des nominalen und nicht-nominalen Betriebs.
- Förderung der Reaktionsfähigkeit zur frühzeitigen Identifizierung von Abweichungen und Störungen während Start- und Wiedereintrittsoperationen

sowie zur Einleitung entsprechender Notfallmaßnahmen.

- Vereinfachung der Koordination zwischen den Stakeholdern in Bezug auf Luftraumbeschränkungen.
- Verbesserung der Fähigkeiten zur Erfassung und Weitergabe von Erkenntnissen und bewährten Verfahren unter allen Beteiligten.

5. DURCH DAS LCC OPTIMIERTE VERFAHREN

Aus Sicht des LCC ergeben sich folgende primäre Stakeholder: Flugsicherungsdienstleister, Raumfahrzeugbetreiber, Luftraumnutzer und Spaceport-Betreiber. Weitere sekundäre Stakeholder sind: Regulierungsbehörden, Seeverkehrsbehörden, Raumfahrtverkehrsmanagement-Organisationen, Behörden für Luftraumänderungen und andere Genehmigungsbehörden.

Das LCC dient dazu die Daten der verschiedenen Stakeholder sowie weitere relevante Informationen, beispielsweise Wetterdaten, zusammenzuführen, zu verarbeiten und die Ergebnisse wieder für die Stakeholder bereitzustellen. Konkret werden spezifische Services für alle Phasen eines Starts oder Wiedereintritts bereitgestellt, in denen eine Abstimmung zwischen der Raumfahrt und der Luftfahrt notwendig ist, um einen sicheren und effizienten Betrieb für alle beteiligten Akteure zu gewährleisten. Dies beginnt bei der Vorbereitung und geht über die Durchführung bis hin zur Nachbereitung.

Im Unterschied zu gegenwärtigen Operationen soll das LCC dabei zukünftig eine zentrale, koordinierende Rolle zur Unterstützung der operativen Integration von Raumfahrzeugen einnehmen. Im Zuge der Vorbereitung werden dabei insbesondere potentielle Auswirkungen eines Raumflugs auf den Luftverkehr untersucht. Während der Operation wertet das LCC Flugbahndaten des Raumfahrzeugs aus und liefert Echtzeitinformationen für alle Beteiligten. Dies ermöglicht im Falle von nicht-nominalen Ereignissen und Notlagen eine schnelle Reaktionsfähigkeit und die Einleitung geeigneter Maßnahmen sowie im Nominalbetrieb eine angepasste Steuerung von Luftraumbeschränkungen. Das LCC stellt zudem für alle Stakeholder die zentrale Anlaufstelle für die Nachbereitung der Operation dar. In allen Phasen finden modernisierte und automatisierte Prozesse statt, wobei angenommen wird, dass diese im Vergleich zu derzeitigen Betriebsmethoden weniger fehleranfällig, zeitaufwändig und kostenintensiv sein werden. Eine schematische Visualisierung des LCC ist in BILD 2 dargestellt.

Für eine operationelle Implementierung des LCC sind verschiedene Optionen denkbar. Das LCC könnte von einem einzelnen Dienstleistungsanbieter oder einer Organisation betrieben werden. Zum Beispiel könnte das LCC in die bestehende Struktur des Netzwerkmanagers integriert werden. Alternativ könnten bestimmte Funktionen des LCC

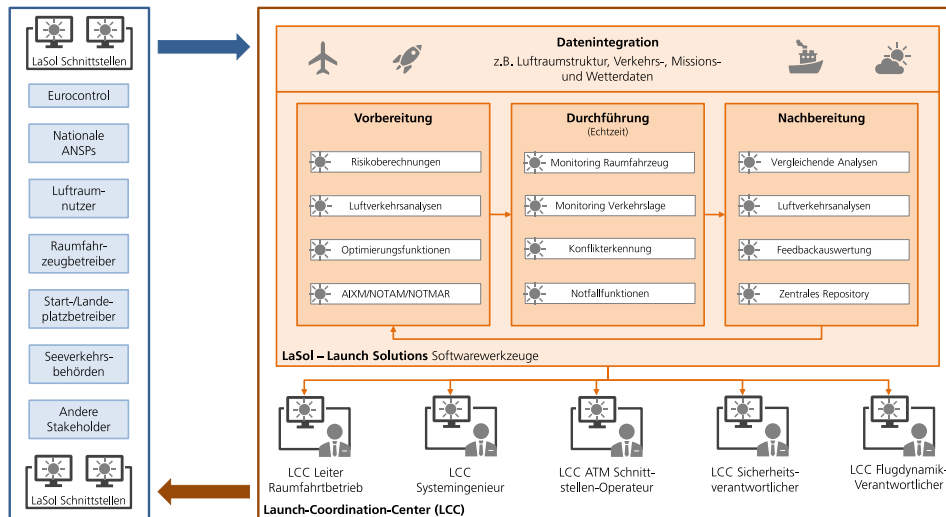


BILD 2. Schematische Darstellung des LCC

von verschiedenen Verantwortlichen ausgeführt werden oder ein LCC-Betreiber könnte spezifische Dienstleistungen für verschiedene Institutionen anbieten.

5.1. LCC-Services während der Vorbereitung

Sofern noch keine Betriebserlaubnis für die geplante Operation vorliegt, ist diese entsprechend vom LRO zu beantragen. Im Zuge dieses Verfahrens kann dem LRO durch das LCC Unterstützung bei der Anpassung an nationale und lokale Anforderungen bereitgestellt werden, insbesondere in Hinblick auf Operationen im europäischen Luftraum. Zudem können LCC-Services Lizenzierungsbehörden bei der Überprüfung spezifischer Kriterien unterstützen, beispielsweise bei der Berechnung von HAs.

Liegt eine Lizenz vor, kann durch den Raumfahrzeugbetreiber eine konkrete Detailplanung für einen spezifischen Start oder Wiedereintritt durchgeführt werden. Dies erfolgt entsprechend der missions- und systemspezifischen Anforderungen, wie der Trajektorie, dem Raumfahrzeug und des Start-/Landeplatzes. Entsprechend erfolgt auch eine Abstimmung mit dem Start- oder Landeplatzbetreiber. Auf Seiten der Luftfahrt und der Schifffahrt werden parallel ebenfalls eigene Betriebsplanungen durchgeführt. Während der Vorbereitungsphase wird der Planungsstatus des LRO und des Start-/Landeplatzbetreibers daher kontinuierlich überprüft, um das Situationsbewusstsein auf der Ebene der Stakeholder zu erhöhen.

Zudem werden im LCC Daten seitens des LRO sowie der ANSPs beziehungsweise des Netzwerkmanagers zusammengeführt und analysiert. Basierend auf den bereitgestellten LRO-Daten werden potentielle HAs für alle nominalen und nicht-nominalen Betriebsszenarien während des Auf- beziehungsweise Abstiegs des Raumfahrzeugs anhand von Risikomodellierungen ermittelt. Davon ausgehend werden die betroffenen FIRs und Sektoren sowie die zugehörigen ANSPs identifiziert. Unter Berücksichtigung der Größe, der Lage und der Dauer der entsprechenden Luftraumbeschränkungen können so in einem weiteren Schritt die Auswirkungen des Starts/Wiedereintritts auf den für diesen Tag geplanten Luftverkehr bestimmt werden. Zudem werden Optimierungen

hinsichtlich der Ausdehnung und Dauer der Luftraumbeschränkungen sowie des Start-/Landeortes beziehungsweise des Zeitpunktes der Operation durchgeführt, um die Auswirkungen auf den Luftverkehr zu minimieren. Für diese Analysen und Auswertungen werden sowohl luftfahrtseitige Planungsdaten als auch historische Verkehrsdaten herangezogen. Je nachdem, welche Daten durch den LRO bereitgestellt werden, findet zudem ein Vergleich der Untersuchungsergebnisse des LCC mit entsprechenden LRO-Daten statt. Anschließend werden die Ergebnisse der Untersuchungen dem LRO und den ANSPs sowie dem NM bereitgestellt und in einem durch das LCC koordinierten iterativen Prozess so lange abgestimmt, bis die Ergebnisse für alle Beteiligten zufriedenstellend sind. Dabei wird ein hoher Grad an Automation und Standardisierung angestrebt. Die beschriebenen Untersuchungen und Prozesse sollen somit eine optimierte Planung von Start- und Wiedereintrittsoperationen unter Berücksichtigung der für einen sicheren und effizienten Luft- und Raumfahrtbetrieb notwendigen Anforderungen ermöglichen.

Weitere Services und Funktionen des LCC können die Integration des Raumfahrzeugbetriebs zusätzlich unterstützen, indem NOTAM oder AIXM-konforme³ Messages sowie NOTMAR generiert und für die ANSPs, den NM sowie Seeverkehrsbehörden bereitgestellt werden. In diesem Zusammenhang können beispielsweise Servicefunktionen für die im Aufbau befindliche Datenverteilungsinfrastruktur des System Wide Information Management (SWIM) geschaffen werden.

5.2. LCC-Services während der Durchführung

Die Betriebsphase beginnt bis zu 24 Stunden vor dem geplanten Start- oder Wiedereintritt, wobei eine Synchronisierung mit den Prozessen des ATFCM angestrebt wird. Die hierfür entwickelten Betriebsabläufe sind an einer Integration des LCC in einen Echtzeitdatenaustausch mit dem LRO, dem Start-/Landeplatzbetreiber, NM, ANSPs und weiteren Beteiligten ausgerichtet.

Bereits im Vorfeld des Starts/Wiedereintritts ($T < T_0$) wird die Situation des Luftverkehrs und auch des Seeverkehrs in Hinblick auf die bevorstehende Operation

³ Aeronautical Information Exchange Model

überwacht und bewertet. Dies dient der Erhöhung des Situationsbewusstseins aller Beteiligten und der Entscheidungsfindung auf Basis durch das LCC verarbeiteter Daten, die beispielsweise über ein webbasiertes Dashboard für Nutzer zugänglich gemacht werden können. Des Weiteren werden potentielle Freigaben sowie Restriktionen (Go/No-Go-Meldungen) verschiedener Akteure während der unmittelbaren Vorbereitung der Operation durch das LCC überwacht. Auf der Grundlage vereinbarter Betriebsverfahren und definierter Kriterien zur Bewertung der Verkehrslage und von Umweltbedingungen (Wetter, Weltraumwetter etc.) kann das LCC zudem selbst Go/No-Go-Meldungen ausgeben.

Ab dem Beginn der Operation ($T \geq T_0$) verarbeitet das LCC die live eingespeisten Zustandsvektordaten des Raumfahrzeugs und liefert den angeschlossenen Akteuren Echtzeitvorhersagen für Instantaneous Impact Points⁴ (IIPs) und HAs. Das LCC überwacht die Flugbahn des Raumfahrzeugs (Position, Geschwindigkeit, Beschleunigung) und vergleicht die Werte mit der nominalen Flugbahn und dem genehmigten Flugkorridor. Weichen die Daten von den Sollwerten ab, werden Hinweise gegeben. Parallel dazu überwacht das LCC nominale raumfahrzeugbezogene Ereignisse, wie Stufentrennungen und Wiedereintrittszündungen. Zudem werden in Abhängigkeit der Verfügbarkeit von Telemetrie- und Tracking-Daten nach der Trennung von Stufen und Nutzlastverkleidungen auch die Trajektorien und IIPs der Raumfahrzeugkomponenten (näherungsweise) bestimmt.

Des Weiteren wird durch das LCC die aktuelle Verkehrslage auf See und in der Luft überwacht und analysiert. Wird beispielsweise durch das System erkannt, dass sich Flugzeuge in ausgewiesenen Sicherheitszonen befinden, werden entsprechende Warnhinweise an ANSPs gegeben. Bestimmte Funktionen des LCC überprüfen zudem, ob beschränkte Gebiete frei von Raumfahrzeugen und deren Komponenten sind und geben entsprechende Informationen über freie Lufträume an ANSPs weiter, um eine sofortige Freigabe des Luftraums für den Luftverkehr zu unterstützen, sobald dies möglich ist.

Im Falle eines nicht-nominalen Ereignisses (z.B. Loss of Signal (LOS), Flugbahnabweichung, Explosion auf der Flugbahn) zeigt das LCC den Status des Raumfahrzeugs an und informiert alle beteiligten Akteure. Wird ein LOS bestätigt, beispielsweise über eine speziell eingerichtete Hotline, beginnen die Risikomodellierungsfunktionen des LCC mit Berechnungen zur Bestimmung einer RHA auf der Grundlage des zuletzt empfangenen Zustandsvektors und die Ergebnisse werden auf dem Dashboard angezeigt. Wenn der Verlust des Raumfahrzeugs bestätigt wird, können die Koordinaten der RHA sofort in digitaler Form und über vordefinierte Protokolle an alle beteiligten Stakeholder, insbesondere an den NM, die betroffenen ANSPs, deren ATCs und andere Behörden, die davon profitieren könnten, weitergeleitet werden.

Auf der Grundlage noch zu implementierender Verfahren können diese Informationen genutzt werden, um seitens ATC auf das bestätigte nicht-nominale Ereignis zu reagieren und zu versuchen, den betroffenen Luftraum zu räumen, wodurch die Gefahren für andere Luftraumnutzer gemindert werden. Um Gefahren weiter zu mindern, könnten zusätzliche LCC-Funktionen die Situation von Flugzeugen und Schiffen in Bezug auf die RHA analysieren und

bewerten sowie weitere Unterstützung bei der Räumung der RHA bereitstellen.

Die Aufgaben des LCC während der Betriebsphase enden, wenn das Raumfahrzeug den Orbit erreicht hat oder gelandet ist und alle Komponenten ihre Zielorte erreicht haben oder der Luftraum nach einem Abbruch der Operation wieder freigegeben wurde.

5.3. LCC-Services während der Nachbereitung

Für Analysen und Auswertungen im Rahmen der Nachbereitung einer Operation stellt das LCC aufgezeichnete und verarbeitete Daten aus der Vorbereitungs- und der Betriebsphase bereit. Diese Daten können genutzt werden, um Vorhersagen und Realdaten miteinander zu vergleichen, insbesondere in Hinblick auf Trajektorie, HAs und Zeitplan. Spezifische Funktionen des LCC unterstützen zudem die Identifizierung möglicher Ursachen für Unterschiede und Abweichungen. Potentielle Ursachen könnten beispielsweise unerwartete meteorologische Bedingungen oder Ereignisse sein.

Das LCC unterstützt dabei insbesondere die Analyse und Bewertung von Auswirkungen der Operation auf das Luftverkehrssystem. Dazu werden beispielsweise Auswirkungen auf die Luftraumkapazität und die Länge von Routen sowie zeitliche und finanzielle Aspekte untersucht.

Des Weiteren wird auch die reale Umsetzung der etablierten Prozesse innerhalb der beiden vorausgegangenen Phasen evaluiert und auf Optimierungspotentiale hin untersucht, beispielsweise hinsichtlich der Kommunikation und Kooperation zwischen den einzelnen Stakeholdern. Zu diesem Zweck wird ein standardisiertes Feedback der Stakeholder erhoben.

Die auf Basis des Nutzerfeedbacks sowie der Datenauswertungen gewonnenen Erkenntnisse und quantitativen Ergebnisse werden in einem standardisierten Format gespeichert und allen Beteiligten zur Verfügung gestellt, damit sie für künftige Aktivitäten berücksichtigt werden können. Darüber hinaus werden nach dem Konzept des LCC alle gewonnenen Erkenntnisse, Ergebnisse und Rohdaten in einem zentralen Repository gespeichert, auf das alle interessierten Akteure Zugang erhalten können. Dabei wird auf die Einhaltung notwendiger und vorgeschriebener Datenschutzbestimmungen und Zugangssicherungen geachtet.

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Mit der Entwicklung eines LCC und der zugehörigen Services will das DLR eine abgestimmte Integration von Luftverkehr und Raumfahrzeugbetrieb für alle relevanten Missionsphasen unterstützen. Dabei soll die Weitergabe wesentlicher Informationen an alle beteiligten Akteure schnelle und bedarfsgerechte Reaktionen, beispielsweise auf nicht-nominale Ereignisse, ermöglichen, um die Sicherheit der Raumfahrzeuge und anderer Luftraumnutzer zu gewährleisten. Auf diese Weise soll nicht nur das Situationsbewusstsein aller Beteiligten erhöht, sondern auch die Grundlage für künftige, fortschrittliche Integrationsverfahren gelegt werden, die es ermöglichen, die erforderlichen Sicherheitszonen auf das notwendige Mindestmaß zu optimieren und die Verfahren für die operationelle Planung zu beschleunigen (Stichwort: Launch-on-

⁴ Landepunkt eines Raumfahrzeugs bei Annahme eines sofortigen Triebwerkstopps auf dessen Flugbahn

Demand). Zudem wird bei der Entwicklung des LCC darauf geachtet, dass die bereitgestellten Funktionen für alle Arten von Raumfahrzeugen und Missionsvarianten in den Phasen nutzbar sind, in denen eine Interaktion mit dem Luftverkehr stattfindet.

Ziel des LCC ist es, die Effizienz und Sicherheit von Raumfahrtaktivitäten im europäischen Luftraum zu gewährleisten. Zur Erfüllung dieser Zielsetzung ist jedoch eine gemeinsame, grenzüberschreitende Zusammenarbeit zwischen Staaten und Akteuren erforderlich, um das LCC zur Koordinierung internationaler Raumfahrtaktivitäten nutzen zu können. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund der Zunahme an Raumfahrtaktivitäten in Europa von Bedeutung, damit nicht nur die Integration in den Luftverkehr, sondern auch die Koordination der Raumfahrtaktivitäten untereinander ermöglicht wird.

Die Konfliktfreiheit von Starts und Wiedereintritten und den damit verbundenen Flugbahnen muss sowohl für Akteure der Luftfahrt als auch der Raumfahrt gewährleistet sein. Dies muss bereits in der Planungsphase im Rahmen der ATM- und STM-Prozesse berücksichtigt werden. Während des Starts oder Wiedereintritts haben Änderungen, die sich auf die vierdimensionale Trajektorie in der Ursprungsdomäne auswirken, sehr wahrscheinlich auch Auswirkungen auf den Betrieb in der nachfolgenden Domäne. Eine interaktive und integrierte ATM/STM-Schnittstelle sollte daher bereits in der Planungsphase durch das LCC unterstützt werden. Während der Durchführung von Start- und Wiedereintrittsoperationen steigen diese Anforderungen weiter an. Abweichungen von der geplanten Flugbahn müssen in beiden Domänen auf ihre Auswirkungen hin überprüft und entsprechende Maßnahmen mit Hilfe der jeweiligen Prozesse von ATM und STM eingeleitet werden. Potenzielles nicht-nominales Verhalten muss bereits in der Planung berücksichtigt und auf beiden Seiten in Hinblick auf die Gewährleistung der erforderlichen Sicherheitsanforderungen bewertet werden. Das LCC wird solche Anforderungen berücksichtigen und seine Funktionen entsprechend der Entwicklung gemeinsamer ATM/STM-Betriebsverfahren anpassen.

Um die beschriebenen Funktionen zu demonstrieren, wird am Institut für Flugführung des DLR in Braunschweig aktuell ein Prototyp des LCC aufgebaut. Im Rahmen dieser Entwicklung wurde bereits ein Concept of Operations (ConOps) zur Beschreibung des Systems aus Nutzersicht angefertigt, das verschiedene Anwendungsfälle umfasst. Ausgehend von diesem ConOps wurden Systemanforderungen definiert. Es wird angestrebt, die erfassten Anforderungen und das zugehörige Systemkonzept basierend auf Gesprächen mit potentiellen Stakeholdern des LCC zeitnah weiter auszuarbeiten. Parallel werden bereits Modulbestandteile des LCC softwareseitig umgesetzt. Ziel ist es, den Prototypen des LCC im Rahmen einer Pilotmission im Shadow Mode einzusetzen und zu evaluieren.

7. QUELLEN

- [1] **Todd, David.** 2021 Launch Year: A new record for both orbital rocket and satellite launch totals. *Seradata*. [Online] 2022. [Zitat vom: 07. September 2022.] <https://www.seradata.com/2021-launch-year-a-new-record-for-both-orbital-rocket-and-satellite-launch-totals-in-a-year/>.
- [2] **Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt.** Der DLR Mikrolauncher- und Nutzlast-Wettbewerb. *DLR - Deutsche Raumfahrtagentur*. [Online] 2022. [Zitat vom: 07.

September 2022.]

https://www.dlr.de/rd/desktopdefault.aspx/tabid-15784/25586_read-65808/.

[3] **UK Space Agency und Department for Transport und Civil Aviation Authority.** *Brochure: UK spaceflight programme / Launch UK: Leading the commercial space age*. Vereinigtes Königreich: UK Space Agency und Department for Transport und Civil Aviation Authority, 2019.

[4] **Swedish Space Corporation.** *Espace User's Handbook. Volume IX: Spaceport*. Ver. 1.2. Schweden: Swedish Space Corporation, 2022.

[5] **Kaltenhäuser, Sven und Klünker, Carmo Sonja und Schmitt, Dirk-Roger und Sippel, Martin und Veth, Jürgen und Zimmermann, Kai und Lockheed Jr., Allan H. und Strom, John R.** *Spaceport Concept in Germany. 71st International Astronautical Congress (IAC) – The CyberSpace Edition*. 2020.

[6] **Kaltenhäuser, Sven und Klünker, Carmo Sonja.** *Cross-border exchange of spacecraft data for the safe and efficient execution of space activities. FAA Quick Look*. 2021.

[7] **Luchkova, Tanja und Kaltenhaeuser, Sven und Morlang, Frank.** *Air Traffic Impact Analysis Design for a Suborbital Point-to-Point Passenger Transport Concept. 3rd Annual Space Traffic Management Conference*. 2016.

[8] **Air Line Pilots Association.** *ALPA White Paper: Addressing the Challenges to Aviation from Evolving Space Transportation*. Washington: Air Line Pilots Association, 2018. S. 10.

[9] **Federal Aviation Administration.** *Vehicle Operator Licenses & Permits*. [Online] 2022. [Zitat vom: 07. September 2022.]

https://www.faa.gov/space/licenses/operator_licenses_permits.

[10] **Civil Aviation Authority.** *Applying for a launch or return operator licence. Information on how to apply for a launch or return operator licence*. [Online] 2022. [Zitat vom: 07. September 2022.]

<https://www.caa.co.uk/space/licences/applying-for-a-launch-or-return-operator-licence/>.

[11] **Federal Aviation Administration.** *Streamlined Launch and Reentry License Requirements (Part 450). Federal Register. Rules and Regulations*, 2020, Bd. 85, Ed. 238. S. 79726-79734.

[12] **Federal Aviation Administration.** *PART 450 Application Letter Template*. Washington: Federal Aviation Administration, 2020. S. 4/5.

[13] **Civil Aviation Authority.** *Guidance for launch operator and return operator licence applicants and licensees*. Crawley: Civil Aviation Authority, 2021. S. 25.

[14] **Virgin Orbit.** *Virgin Orbit Operations from Spaceport Cornwall (Southern Trajectory)*. Rev. 3.0. Long Beach: Virgin Orbit, 2022. S. 9/18-26.

[15] **Virgin Orbit.** *CAA Airspace change portal. Virgin Orbit - Rocket Flight from Spaceport Cornwall*. [Online] 2022. [Zitat vom: 07. September 2022.]

<https://airspacechange.caa.co.uk/PublicProposalArea?pid=373>.

[16] **Klußmann, Niels und Malik, Arnim.** *Lexikon der Luftfahrt*. 4. Ed. Berlin: Springer, 2018. ISBN 978-3-662-54040-4. S. 235.

[17] **Federal Aviation Administration.** *Commercial Space Integration into the National Airspace System. Concept of Operations*. Washington: Federal Aviation Administration, 2020. S. 24/25.

[18] **Murray, Dan.** *Integrating Commercial Launch and Reentry Operations into the U.S. National Airspace System: Realtime Ops.* Washington: Federal Aviation Administration, 2018. Präsentation. S. 4-6.

[19] **International Civil Aviation Organization.** *Global campaign on NOTAM improvement (NOTAM2021).*

[Online] 2021. [Zitat vom: 07. September 2022.]

<https://www.icao.int/airnavigation/information-management/Pages/GlobalNOTAMcampaign.aspx>.

[20] **McDowell, Jonathan C.** The edge of space: Revisiting the Karman Line. *Acta Astronautica.* 2018, Bd. 151, S. 668-677.

Anmerkung:

Das in diesem Paper verwendete generische Maskulinum steht repräsentativ für männliche, weibliche und diverse Formen und Personen.

Kontaktadresse:

anouk.stahnke@dlr.de