
Airbus Defence and Space

Schlussbericht für die „TerraSAR-FOX Phase 0“ Missionsstudie

FKZ: 50EE2415

Dokument Änderungshistorie

Datum	Geänderte Kapitel	Änderung
02.09.2025	Alle	Erste Ausgabe

TABLE OF CONTENTS

1	EINFÜHRUNG	4
1.1	ZIEL DES DOKUMENTES	4
1.2	BEZUG DES VORHABENS ZU DEN FÖRDERPOLITISCHEN ZIELEN	4
1.3	REFERENZEN	5
1.4	ABKÜRZUNGEN UND DEFINITIONEN	6
2	KURZDARSTELLUNG	8
2.1	AUFGABENSTELLUNG	8
2.2	VORAUSSETZUNGEN, UNTER DENEN DAS VORHABEN DURCHGEFÜHRT WURDE	8
2.3	PLANUNG UND ABBLAUF DES VORHABEN	9
2.4	STAND DER WISSENSCHAFT UND TECHNIK	12
2.4.1	<i>Überblick</i>	12
2.4.2	<i>Wissenschaftliche Anwendungen und Missionsideen</i>	13
2.4.3	<i>X-Band SAR Instrument und System Technologien</i>	17
2.5	ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN	20
3	EINGEHENDE DARSTELLUNG	21
3.1	ERZIEHLTE ERGEBNISSE	21
3.2	VERWERTBARKEIT DES ERGEBNISSES IM SINNE DES FORTGESCHRIEBENEN VERWERTUNGSPLANS	22
3.3	FORTSCHRITT AUF DEM GEBIET DES VORHABENS BEI ANDEREN STELLEN	23
3.4	VERÖFFENTLICHUNG DER ERGEBNISSE	26

1 EINFÜHRUNG

In Anbetracht der deutschen Erfolge im Bereich der Radartechnologie mit zuletzt zwei herausragend langlebigen und einzigartigen zivilen Satelliten TerraSAR-X und TanDEM-X, sowie mit den SARLupe und SARah Satelliten im militärischen Bereich, wird auf eine Fortsetzung der deutschen Radarlinie im X-Band und die Kontinuität bei der Befriedigung der Nutzerbedürfnisse abgezielt. Aufgrund der fortgeschrittenen Lebensdauer der beiden zivilen Satelliten wurde durch Airbus von 2016 bis 2018 eine Phase 0/A für den Missionsvorschlag HRWS durchgeführt. Das HRWS Konzept hätte einen Großteil des Nutzerbedarfs gedeckt, jedoch zu entsprechend hohen Kosten.

Das hohe Interesse an einer Nachfolgemission zu TerraSAR-X und TanDEM-X, welche die Datenkontinuität für behördliche, wissenschaftliche und kommerzielle Nutzer im X-Band gewährleistet und gleichzeitig technologische Innovationen bietet, wurde u.a. im März 2023 durch die Analyse der systematischen Erfassung der Nutzeranforderungen bestätigt.

Ziel der Studie war es Konzepte vorzuschlagen, die einen optimalen Kompromiss zwischen der Deckung der Nutzerbedarfe und Aspekten wie Kosten, technologische Innovation, Risiko, programmatischen Zielen und möglichen Synergien mit anderen Missionen darstellen.

1.1 ZIEL DES DOKUMENTES

Zum formalen Abschluss des FEVetrag

- „TerraSAR-FOX Phase-0“ Missionsstudie mit dem
- Förderkennzeichen: 50EE2415 unter der
- Projektleitung von Herr Dr. Münzenmayer
- Ausgelaufen zum 31.07.2025

wird der Schlussbericht gemäß dem vorgeschriebenen Muster erstellt.

1.2 BEZUG DES VORHABENS ZU DEN FÖRDERPOLITISCHEN ZIELEN

Die Raumfahrtstrategie der Bundesregierung [RD-01] adressiert u.a. folgende Ziele:

- Unser Ziel ist, dass deutsche Unternehmen ihre hervorragende technologische Grundlage nutzen können, um sich entlang der Wertschöpfungskette von Kleinsatelliten und Microlaunchern im internationalen Wettbewerb behaupten zu können
- Wir stärken die zivil-militärische Zusammenarbeit, um bei Bereitstellung und Betrieb von Weltrauminfrastruktur Synergien durch gemeinsame Nutzung zu schaffen.
- Wir wollen, dass Deutschland führender Standort und technologischer Vorreiter für innovative Erdbeobachtung in Europa bleibt.
- Die Bundesregierung setzt sich dafür ein, dass Behörden in Bund, Ländern und Kommunen optimal über das Potenzial von Erdbeobachtungsdaten – z. B. für Land-, Fischerei- und Forstwirtschaft, Stadt- und Landesplanung, Klimaanpassung, Natur-, Umwelt- und Küstenschutz, Gesundheitsschutz, Wasserwirtschaft, Verkehr, Energie und Daseinsvorsorge – informiert sind, leichten Zugang zu den Daten haben, für deren Anwendung geschult sind und diese Daten aktiv und routinemäßig in ihren Arbeitsabläufen nutzen.
- Es ist Ziel der Bundesregierung, die Nutzung und Anwendbarkeit von Satellitendaten für die Energiewende voranzutreiben. Insbesondere können sogenannte „Go-to-areas“ identifiziert werden, d. h. spezifische Orte an Land oder auf See, die besonders geeignet sind für die Ansiedlung von Kraftwerken zur Produktion von erneuerbaren Energien.
- Die Bundesregierung setzt sich für ein investitionsfreundliches Klima in Deutschland zur Beschaffung von Raumfahrt Daten und -diensten ein, in dem Raumfahrtanwender und NewSpace-Start-ups ein optimales Umfeld finden, in dem sie nachhaltige Geschäftsmodelle verwirklichen können.

Die nachfolgend dargestellten Ziele zeigen den Beitrag zu den förderpolitischen Zielen:

- Die deutsche Radarlinie genießt nationale und internationale Anerkennung und hat eine große Nutzergemeinschaft in der kommerziellen und wissenschaftlichen Domäne. Diese Gemeinschaft hat bestätigt, dass eine nationale deutsche Mission zur Deckung ihrer Datenbedarfe notwendig ist. Die behördlichen Nutzer haben zwar umfangreiche Nutzeranforderungen an ein X-Band System formuliert, sind aber aufgrund der hohen Kosten von X-Band Daten am kommerziellen Markt nicht in der Lage, diese Daten umfänglich für Ihre Aufgabenerfüllung zu erwerben. Ein programmatisches Ziel der Mission TerraSAR-FOX ist es daher, die national-hoheitlichen Bedarfe und Anforderungen zu bedienen und Daten zu geringen oder keinen Kosten für diese Nutzer bereitzustellen. Damit soll gewährleistet werden, dass die jahrzehntelangen Entwicklungen im X-Band auch der Gesellschaft zu Gute kommen.
- Ein weiteres programmatisches Ziel ist die Unabhängigkeit bei der Versorgung Deutschlands mit qualitativ hochwertigen Radardaten. Gerade bei der zivilen Sicherheit (Bundesministerium des Innern und für Heimat, Bundespolizei, etc.) sowie bei der Überwachung der kritischen Infrastrukturen ist ein eigener nationaler Zugang zu Radardaten von großer Bedeutung. Den Nutzern, die sich mit sicherheitsrelevanten Themen befassen, sollte ein effizienter und sicherer Zugang zu Radardaten ermöglicht werden.
- Ziel dieser neuen Mission ist es auch, eine erhöhte Wertschöpfung aus den bisher getätigten Investitionen zu erzielen. Dazu zählen die Entwicklungen in vielen deutschen Forschungsinstituten im Bereich der Radartechnik und der Fernerkundung, welche einzigartige Kompetenzen durch die hohe Verlässlichkeit der TerraSAR-X/TanDEM-X Satelliten aufbauen und weiterentwickeln konnten.
- Zusätzlich hat die deutsche Industrie nicht nur Erfahrung im Bereich der Radartechnologie, sondern auch einzigartige und führende Systemkompetenz für die Radarfernerkundung aufgebaut. Diese zu erhalten, ist von großer Bedeutung für den Technologiestandort Deutschland

1.3 REFERENZEN

RD No.	Document Title	Document No. (Issue)
[RD-01]	Für eine zukunftsfähige deutsche Raumfahrt; Raumfahrtstrategie der Bundesregierung	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK); September 2023
[RD-02]	Nutzeranforderungen an eine nächste X-Band SAR-Mission Analyse der Nutzerbefragung	DLR-RFA 04.05.2023
[RD-03]	TerraSAR Follow-On X-Band Mission (TerraSAR-FOX) Phase 0 Leistungsbeschreibung zur Angebotsaufforderung	TSFOX-DLR-AO-LB-01; AUSGABE: 1; DATUM: 2023-11-20
[RD-04]	Mittermayer et al.: MirrorSAR: An HRWS Add-On for Single-Pass Multi-Baseline SAR Interferometry	Transactions on Geoscience and Remote Sensing (TGRS), Vol. 60, Dec. 2021

1.4 ABKÜRZUNGEN UND DEFINITIONEN

Abbreviation	Explanation
ACS	Attitude Control System
AD	Anwendbares Dokument
AG	Auftraggeber (hier das DLR)
AIT	Assembly, Integration and Testing
AN	Auftragnehmer
AP	Arbeitspaket
BAAINBw	Bundesamt für Ausrüstung, Informationstechnik und Nutzung der Bundeswehr
BAFA	Bundesamt für Ausfuhrkontrolle
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
BMVg	Bundesministerium für Verteidigung
BMVi	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BND	Bundesnachrichtendienst
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
BSI	Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik
CTRS	Customer Technical Requirements Specification
CWFM	Continuous Wave Frequency Modulation
DBF	Digital Beam Forming
DDL	Documents-Delivery-List
DEM	Digital Elevation Model
DIL	Deliverable-Items-List
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
ECSS	European Cooperation for Space Standardization
EMSA	European Maritime Safety Agency
ESA	European Space Agency
FRONTEX	European Agency for the Management of Operational Cooperation at the External Borders of the Member States of the European Union
GEOSS	Global Earth Observation System of Systems
GMTI	Ground Moving Target Informationen
HR	Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme
HRWS	High Resolution Wide Swath
HW	Hardware
ITU	International Telecommunication Union
KO	Kick-Off
KSA	Kommando Strategische Aufklärung
L0, L1b, L2	Bildprodukte in unterschiedlichen Veredelungsstufen
LCT	Laser Communication Terminal
LLI	Long Lead Item
LTA	Long Term Agreement
MAPS	Multi Aperture Sampling
MDR	Mission Definition Review
MOD	Ministry of Defence
N/A	nicht anwendbar

NESZ	Noise-Equivalent Sigma Zero
NRT	Near Real Time
PA	Product-Assurance
PRF	Pulse Repetition Frequency
PRI	Pulse Repetition Interval
RD	Referenzdokument
RFA	Raumfahrtagentur
RFI	Request for Information
RID	Review Item Discrepancy
ROM	Rough Order of Magnitude
SAR	Synthetic Aperture Radar
SatDSig	Satellitendatensicherheitsgesetz
SatDSiV	Satellitendatensicherheitsverordnung
SCORE	„Scan-On-Receive“-Verfahren
SCOUT	SAR with CrOss Sectional Usable Technology
SW	Software
TBC	To be confirmed
TBD	To be defined
TRL	Technical Readiness Level
UAN	Unterauftragnehmer
UBA	Umweltbundesamt
WBS	Work Breakdown Structure
WP	Work Package
ZGeoBW	Zentrum für Geoinformationswesen der Bundeswehr

2 KURZDARSTELLUNG

2.1 AUFGABENSTELLUNG

Das Ziel der TerraSAR-FOX Mission ist die Fortsetzung der erfolgreichen deutschen Radarlinie in X Band, der Erhalt und der Ausbau der Technologie- und Systemkompetenzen im SAR-Bereich auf verschiedenen Ebenen in Deutschland sowie die Sicherung eines eigenen nationalen Datenzugangs für hoheitliche, wissenschaftliche und kommerzielle Nutzer in Deutschland.

Eine aktuelle Nutzerbefragung [RD2] ergab für einige Anwendungen erhöhte Bedarfe für eine nächste SAR Mission im X-Band. Ein klares Missionsziel ist daher die zuverlässige und regelmäßige Bereitstellung von Daten über deutschem Hoheitsgebiet, die diese Anwendungen ermöglichen. Daten der Missionen TerraSAR-X und TanDEM-X werden im Rahmen der Aufgabenerfüllung der Raumfahrtagentur für die „International Charter Space and Major Disasters“ häufig angefragt, vor allem für Überflutungen, Erdbeben oder Hangrutschungen. Die Mission TerraSAR-FOX sollte daher ebenfalls das Katastrophenmanagement unterstützen.

Ziel der Mission soll es sein, ein Optimum bei der Erreichung der Nutzeranforderungen zu erzielen.

In dieser Phase-0 wurden Missionskonzepte und erste technische Anforderungen auf der Grundlage der nationalen Nutzeranforderungen für eine zukünftige X-Band-SAR-Mission entwickelt. Die vorgeschlagenen Mission liefern ein Optimum hinsichtlich der Abdeckung der hoheitlichen Bedarfe und gleichzeitig geringes Entwicklungsrisiko für die Szenarien basierend auf existierenden Technologien. Kostenersparnis potential ergibt sich für Missionskonzepte basierend auf dem Einsatz neuer Technologien wie z.B. Next Generation Phased Array.

TerraSAR-FOX baut auf den Vorgängermission auf und wird eine Weiterführung der bisherigen Beobachtungen sicherstellen. Basierend auf den Erfahrungen sowie neuen technologischen Erkenntnissen wurden technologische Verbesserungen bei der Missionsarchitektur berücksichtigt. Diese wurden in entsprechenden Missions-, Satelliten- und Instrumentkonzepten erarbeitet und bewertet. Die Aufgaben beinhalteten folgende Hauptaktivitäten:

- Identifikation der Nutzeranforderungen
- Definition eines oder mehrerer vorläufiger Missionskonzepte
- Durchführung von Trade-Offs zwischen Missionskonzepten, Anwendungsgebieten / Nutzeranforderungen, Technologiereife und Kosten
- Formulierung von Systemanforderungen zur Umsetzung der Missionskonzepte.
- Untersuchung der generellen Durchführbarkeit der Mission

2.2 VORAUSSETZUNGEN, UNTER DENEN DAS VORHABEN DURCHGEFÜHRT WURDE

Die Raumfahrtagentur hat ab März 2023 systematisch Daten auf Anwendungs-, aber auch auf technischer Ebene über die Nutzeranforderungen einer neuen X-Band SAR-Mission erfasst [RD2]. Diese Daten wurden in Absprache mit der RFA analysiert und als Grundlage für die Konzeptentwicklungen herangezogen. Die Mission sollte ein Optimum bei der Erfüllung der Nutzeranforderungen erreichen. Aufgrund des begrenzten finanziellen Budgets für die Realisierung der Mission werden nicht alle Nutzeranforderungen und Nutzerinteressen in gleicher Weise erfüllt. Daher spiegeln sich verschiedene Priorisierungen und Gruppierungen dieser Nutzeranforderungen in den Missionskonzepten wieder.

Mit TerraSAR-X und TanDEM-X hat sich Deutschland über Jahrzehnte eine weltweit anerkannte Expertise und ein Alleinstellungsmerkmal als bistatisches System erarbeitet. Missionskonzepte für einen multistatischen Betrieb sind Neuland und waren gefordert. Die Leistungsparameter der vorgeschlagenen Systeme sind im Wesentlichen besser oder gleich gut wie für TerraSAR-X.

Bei der Auswahl der Konzepte stand der optimalen Kompromiss zwischen der Deckung der Nutzerbedarfe und Aspekten wie Kosten, technologische Innovation, Risiko, programmatischen Zielen und möglichen Synergien mit anderen Missionen im Vordergrund.

2.3 PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABEN

Airbus Defence and GmbH hatet die Ressourcen hinsichtlich erfahrenem Personal und Infrastruktur (Analyse-Tools etc.) um die notwendigen Arbeiten für die TerraSAR-FOX Phase-0 effizient zu erledigen, insbesondere durch die Erfahrungen durch die Abwicklung der Projekte TerraSAR-X und Tandem-X sowie die HRWS Studien. Deswegen hatte Airbus gesamtheitlich die industriellen und technologischen Aspekte der Mission und möglicher Nutzlasten betrachtet. Insbesondere für die Analyse des Nutzerbedarfs und für Ableitung von entsprechenden Missionskonzepten werden entsprechende Partner mit relevanter Heritage eingebunden.

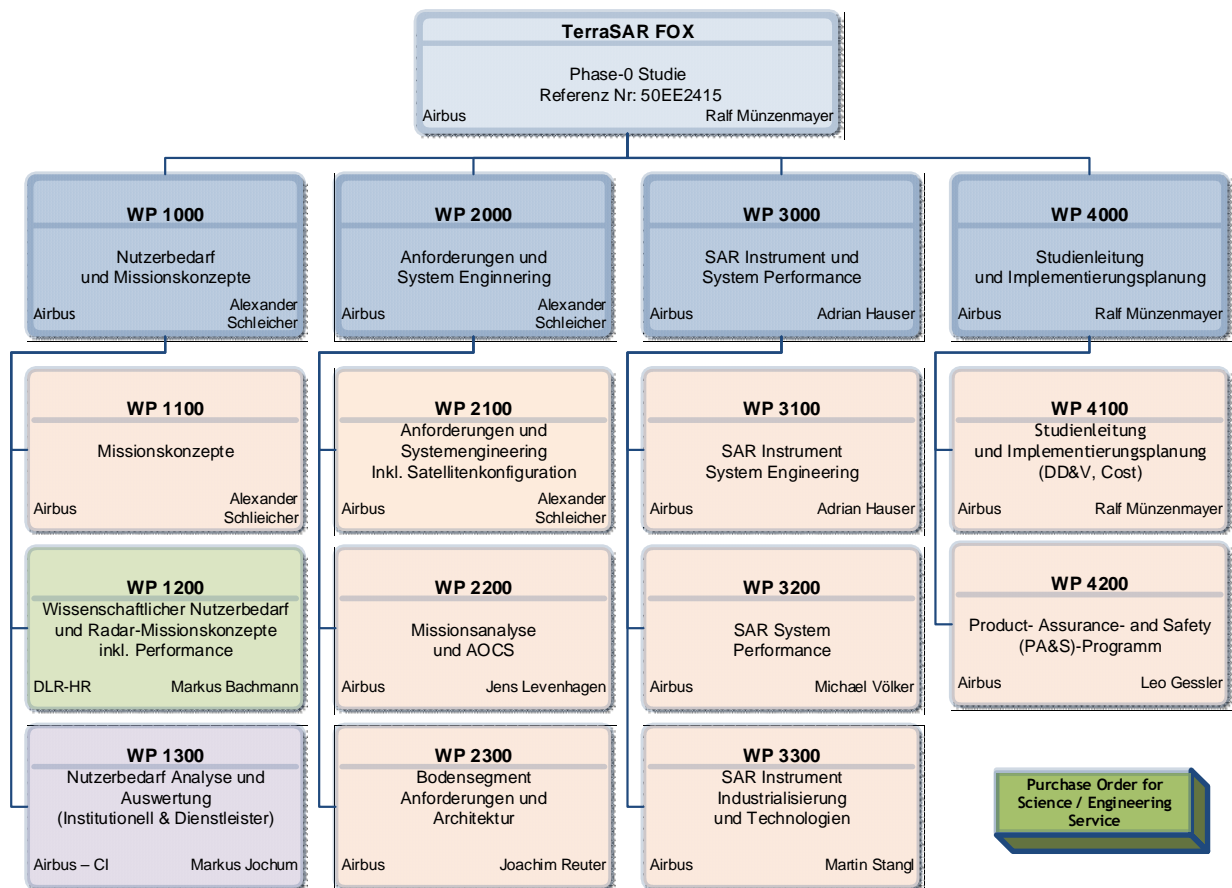


Abbildung 2-1: Der detaillierter Arbeitsstrukturplan spiegelt die Verantwortlichkeiten der beteiligten Schlüsselpersonen wieder.

Für die Ausführung des Vorhabens waren keine speziellen Infrastrukturen notwendig. Für die Analyse und den Design notwendigen Softwaretools und die zugehörigen Rechnersysteme sind bei Airbus vorhanden und standen für die Durchführung der Arbeiten im notwendigen Umfang zur Verfügung.

Die Schlüsselpersonen für die Durchführung der Arbeiten waren die Arbeitspaketverantwortlichen wie aus dem Arbeitsstrukturplan ersichtlich. In der nachfolgenden Tabelle sind neben den Schlüsselpersonen noch zusätzliche Teammitglieder für spezifische Aufgaben mit aufgelistet. Das Team besteht aus erfahrenem Studienpersonal und Kollegen mit spezifischer Erfahrung mit SAR Nutzlasten und Missionen.

Tabelle 2-1: Liste der Teammitglieder mit Ihrer Verantwortung und spezifischen Erfahrung in alphabetischer Reihenfolge

Name	Verantwortung	Spezifische Erfahrung
Bachmann, Markus	DLR WP-Manager, Nutzeranalyse und Radar-Missionskonzepte	Mehr als 15 Jahre Erfahrung in Entwicklung, Betrieb und Nutzung von mono- und bi-statischen SAR Missionen
Gessler, Leo	Produkt Sicherung (PA)	Mehr als 25 Jahren Erfahrung in der Produkt Sicherung für Instrumente und Satelliten, Qualitätssicherung im Reinraum sowie die Beschaffung von High Rel. Bauteilen
Hauser, Adrian	Koordination SAR Instrument	Mehr als 15 Jahre Erfahrung in ESA Projekten zur Entwicklung von Instrumenten
Janoth, Jürgen	Nutzerbedarfsanalyse	Mehr als 20 Jahre Erfahrung in SAR Anwendungsentwicklung und SAR Missionsdesign
Jochum, Markus	Nutzerbedarfsanalyse	Mehr als 20 Jahre Erfahrung in SAR Anwendungsentwicklung und Missionsdesign
Münzenmayer, Ralf	Studienleitung und Implementierungsplanung	Über 25 Jahre Erfahrung in Angeboten und Vorstudien mit dem Schwerpunkt Erdbeobachtungsmissionen
Reuter, Joachim	Bodensegment	Mehr als 20 Jahre Erfahrung im Systems Engineering. Davon 7 Jahre Erfahrung in Architektur und Studien von SAR Bodensegmenten.
Schleicher, Alexander	Systemingenieur	20 Jahre Erfahrung in ESA und DLR Projekten und Studien, 8 Jahre als Chief Engineer
Stangl, Martin	SAR Instrument Industrialisierung	SAR Instrument Experte mit mehr als 20 Jahren Erfahrung
Steinbrecher, Ulrich	Nutzeranalyse und Radar-Missionskonzepte	Mehr als 25 Jahre Erfahrung in Entwicklung, Betrieb und Nutzung von mono- und bi-statischen SAR Missionen
Völker, Michael	SAR System Performance	Prozessierung von SAR-Daten sowie Auslegung von SAR-Systemen

Die nachfolgende Abbildung zeigt den Balkenplan für die TSF Phase-0 Missionsstudie. Aus Terminfindungsgründen wurde vereinbart den MDR Teil 1 erst im Mai 2025 und den MDR Teil 2 im Juli 2025 abzuhalten. Die MDR Präsentation erfolgte am 15. Mai in Bonn und die im Rahmen des MDR vereinbarten Action Items wurden zum 25.07. 2025 beantwortet und damit alle Aktivitäten der Studie erfolgreich abgeschlossen. Bedingt durch die Verschiebung des MDR wurde eine kostenneutrale Vertragsverlängerung der Studie bis Ende Juli 2025 umgesetzt.

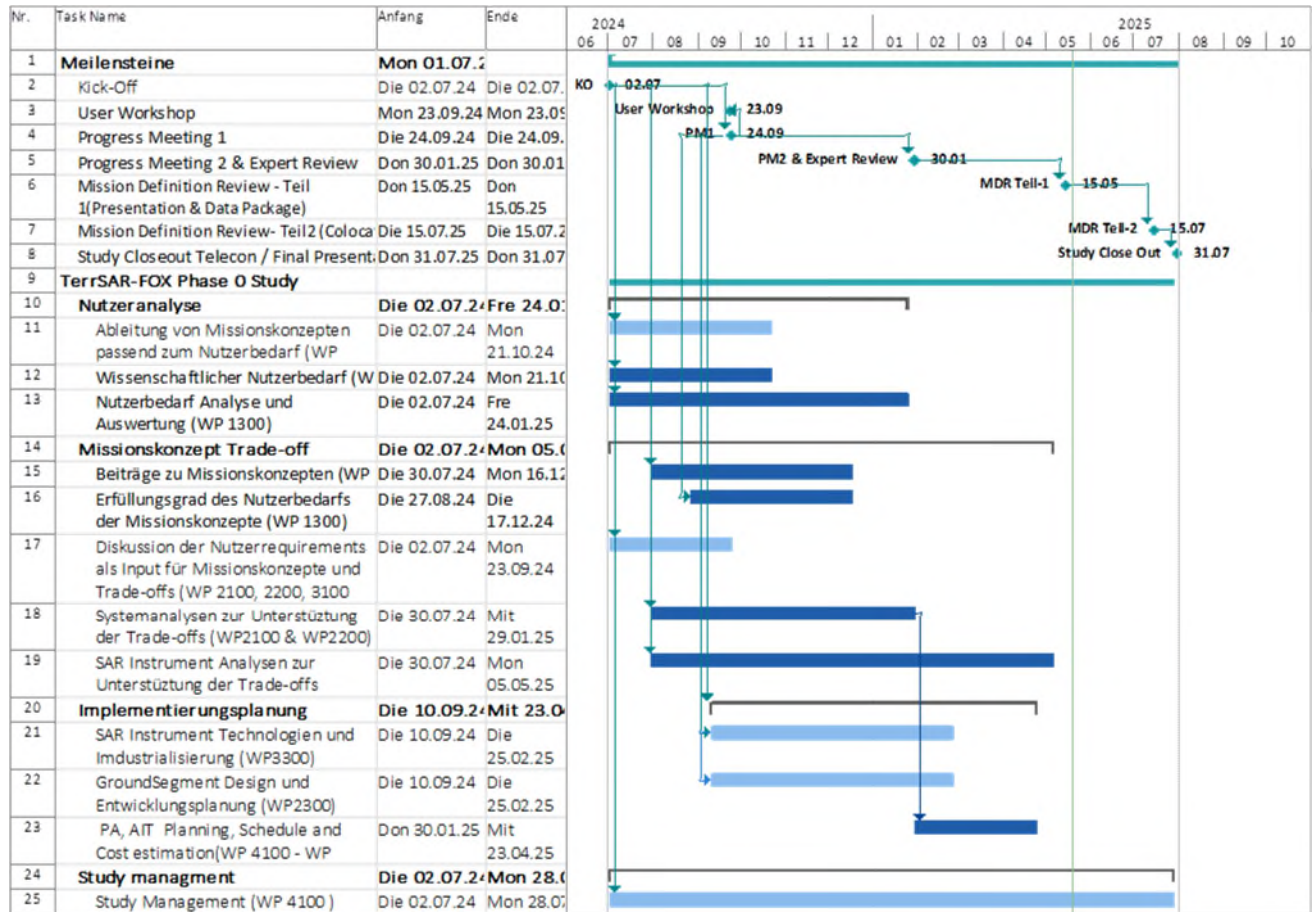


Abbildung 2-2: Zeitplan der TSF Phase-0 Missionsstudie inkl. Meilensteine.

Ergebnisdarstellung

Die Ergebnisse des Vorhabens werden im Wesentlichen durch die Präsentation bei den einzelnen Meetings dokumentiert. Zusätzlich wurde im Mai 2025 das MDR (Mission Definition Review) Datenpaket geliefert.

2.4 STAND DER WISSENSCHAFT UND TECHNIK

2.4.1 Überblick

Eine Vielzahl von weltraumgestützten SAR-Missionen wurden und werden in verschiedenen Ländern rund um den Globus durchgeführt. Die L-, C- und X-Bänder sind die am häufigsten verwendeten Wellenlängen in SAR-Instrumenten, die von der Radargemeinschaft eingesetzt werden. Aus wissenschaftlicher Sicht werden die von diesen SAR-Plattformen gelieferten Messungen in einer Vielzahl von SAR-Anwendungen im Zusammenhang mit der Erdbeobachtung und Objekterkennung sowie bei der Entwicklung und Erprobung neuer Techniken eingesetzt. Die meisten SAR-Sensoren arbeiten in mehreren Modi, jeder mit seiner eigenen Polarisation, Auflösung und Ausdehnung. Darüber hinaus werden SAR-Daten in einer Vielzahl von Typen und Formaten und in verschiedenen Verarbeitungsstufen angeboten.

In Deutschland hat es seit den Starts der Zwillingsatelliten TerraSAR-X/TanDEM-X viele technologische Fortschritte im Bereich der weltraumgebundenen Radartechnik gegeben. Diese Weiterentwicklungen bieten neue weitreichende Möglichkeiten in den Anwendungsgebieten der Radardaten sowie Verbesserungen bei Leistung, Performance, Größe und Gewicht der Satelliten.



Abbildung 2-3: Deutsche AIRBUS SAR-Programmlinie und Einfluss auf internationale Aktivitäten

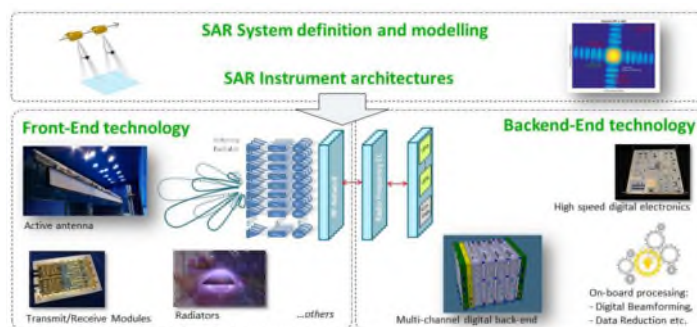


Abbildung 2-4: Wesentliche Kompetenzbereiche relevant für einen Entwurf einer SAR-Nutzlast.

Im Rahmen des nationalen Raumfahrtprogramms wurden für eine kommende Generation von SAR Anwendungen wesentlichen Technologieentwicklungen gemacht: Multi-Mode-Betrieb durch Einsatz sog. aktiver, mit T/R-Modulen bestückter Antennen mit hoher Systembandbreite sowie bordseitige Datenverarbeitung einschließlich Datenkompression und Massenspeicherung. Hinzugekommen sind u.a. Neuentwicklungen im Bereich der Mikroelektronik, Hochleistungs-Verstärker, On-Board-

Datenprozessierung und die mögliche Anwendung von KI bei der Steuerungstechnik von Radarinstrumenten.

Weltweit sind umfangreiche Untersuchungen mit Halbleitermaterialien zu beobachten. Die Entwicklung von IFETs (Integrated Frontend-Tiles) bewegt sich mittlerweile von der Nutzung des in der Raumfahrt etablierten Halbleitermaterials Gallium Arsenide (GaAs) zu Gallium Nitrit (GaN) hin. Erste Produkte haben in anderen Bereichen (z.B. Luftfahrt) Marktreife erreicht. Für die Raumfahrt sind diese aber noch nicht voll qualifiziert.

Neue Antennendesigns, Planar- oder Reflektor-basiert, werden auch weltweit weiterentwickelt. Im militärischen Bereich gab es zudem Entwicklungen, welche in einer zukünftigen zivilen Mission Anwendung finden könnten.

2.4.2 Wissenschaftliche Anwendungen und Missionsideen

TerraSAR-FOX soll für die wissenschaftliche Nutzergemeinschaft hochqualitative und relevante SAR Daten bereitstellen und die Datenkontinuität der Missionen TerraSAR-X und TanDEM-X sicherstellen. Die wissenschaftlichen, hoheitlichen und kommerziellen Anwendungen mit TerraSAR-FOX und die daraus resultierenden High-Level Anforderungen an das SAR System lassen sich basierend auf [RD-01] und der Erfahrung der Autoren mit der Nutzung der TerraSAR-X/TanDEM-X Daten wie folgt zusammenfassen:

Wissenschaftler arbeiten immer stärker mit globalen Datenstapeln z. B. für die großflächige Beobachtung von Waldentwicklung, Gletscherschmelze oder Landnutzung (siehe Abbildung 2-5). Diese Entwicklung ist getrieben durch die frei verfügbaren Sentinel-1-Daten in C-Band. Diese werden auch von hoheitlichen Nutzern stark nachgefragt (siehe [RD-03]). Im X-Band liefern hauptsächlich TerraSAR-X und TanDEM-X global verfügbare SAR-Daten. Lokal begrenzte SAR-Bilder von wenigen Kilometern Ausdehnung sind heute über NewSpace-Unternehmen einfach und zeitnah verfügbar. TerraSAR-FOX sollte daher mindestens über eine ähnliche Abbildungsleistung und den gleichen Abdeckungsbereich wie seine Vorgänger verfügen, um großflächige Beobachtungen zu erlauben bzw. weiter zu führen.

Anwendungen wie Bodenkontrollpunkte, Bodenbewegungskarten oder Änderungsdetektion erfordern eine hohe Wiederholbarkeit des Orbits und eine hohe Geolokalisierungsgenauigkeit. Die Plattform sollte eine ähnliche Bahnstabilität sowie Kontroll- und Orbitgenauigkeit wie TerraSAR-X aufweisen. Für Anwendungen in der Landwirtschaft und Forstwirtschaft ist die Nutzung von horizontal und vertikal polarisierten Wellen essentiell. Daher sollte TerraSAR-FOX zur Fortsetzung der Datenkontinuität Polarimetrie im Dual-Pol Mode ermöglichen oder sogar voll-polarimetrisch aufnehmen können.

Die Nutzerbefragung [RD-01, Seite 14] hat für hoheitliche und wissenschaftlich-hoheitliche Anwender den Bedarf an digitalen Höhenmodellen (DEMs) als wichtigste Anwendungsart ermittelt. DEMs haben den Missionen TerraSAR-X und TanDEM-X (Abbildung 2-6: Bistatisches SAR System mit zwei Satelliten am Beispiel von TanDEM-X.) zu weltweiter Beachtung in der SAR Community verholfen. Derzeit ist mit dem Copernicus-DEM ein globales TanDEM-X Höhenmodell frei verfügbar. Die Alterung dieses DEMs sowie die Entwicklung hin zu immer höheren Genauigkeiten bei SAR Aufnahmen und der damit verbundenen notwendigen Georeferenzierung drängt auf ein System zur Aufnahme von aktuellen, noch höher aufgelösten globalen Höhendaten. Auch für das System TerraSAR-FOX ist das Alleinstellungsmerkmal Single-Pass-Interferometrie zur großflächigen Aufnahme von bi- oder multistatische Daten daher eine Schlüsselanforderung. Diese kann in der erforderlichen Genauigkeits- und Abdeckungsklasse nur mit einem Mehrsatelliten-System wie weiter unten beschrieben erfüllt werden.

Realistischerweise gibt es aktuell zwei Wege um diese Anforderungen zu erfüllen: Ein dem TanDEM-X ähnliches System mit zwei oder mehr baugleichen Satelliten oder ein System, das die Umsetzung des MirrorSAR-Konzepts erlaubt, also aus einem Hauptsatelliten als Beleuchter und mehreren passiven Begleitsatelliten besteht.

Die herausragenden Fähigkeiten von TanDEM-X als Zwei-Satelliten-System sind bereits zur Genüge bekannt. Die notwendigen Finanzierungsmittel für einen solchen verbesserten TerraSAR-X/TanDEM-X-Nachfolger können jedoch sehr hoch liegen. Durch die Anwendung von NewSpace Ansätzen und den

Einsatz von existierenden NewSpace Plattformen und neuer Instrument Technologien sind solche bi-oder multistatischen Systemlösungen basierend auf mehreren relativ kleinen identischen Satelliten denkbar.

Die zweite Möglichkeit zur Realisierung eines entsprechenden Systems ist die Anwendung des am Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme entwickelten MirrorSAR-Konzepts [RD-04].

Zusammenfassend werden hier einem Hauptsatelliten, welcher monostatisch SAR-Daten aufnimmt und gleichzeitig als Beleuchter fungiert, mehrere passive Begleiter hinzugefügt. Diese in ihrer Funktion sehr vereinfachten Satelliten sind in der Lage, das vom Hauptsatelliten abgestrahlte und am Boden reflektierte SAR-Signal zu empfangen und ohne weitere Verarbeitung an den Hauptsatelliten weiterzuleiten. Die Radarempfangskette, bestehend aus Demodulation, Digitalisierung und Speicherung der Daten sowie dem Downlink wird dabei ausschließlich auf dem Hauptsatelliten implementiert. Der Datentransfer zwischen den Begleitern und dem Hauptsatelliten erfolgt über einen dafür vorgesehenen Mirror-Link. In Abbildung 2-5 (rechts) ist dieser noch als analoger MirrorSAR-Link ausgelegt. Denkbar sind aber auch ein digitaler oder ein optischer Link (z. B. ein für Konstellationen optimierter LCT). Eine andere Umsetzungsmöglichkeit besteht darin, die Begleiter mit einem eigenen Speicher und Downlink auszustatten wodurch der Datentransfer-Link zum Hauptsatelliten entfällt. Dazu ist jedoch eine Analyse zum Vergleich der verschiedenen Optionen notwendig.

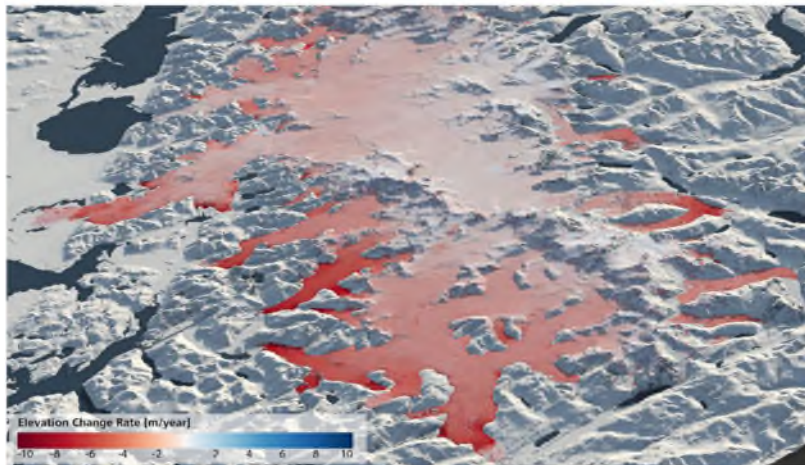


Abbildung 2-5: Gletscherschmelze in Patagonien abgeleitet aus TanDEM-X Höhenmodellen



Abbildung 2-6: Bistatisches SAR System mit zwei Satelliten am Beispiel von TanDEM-X.

Mit dem MirrorSAR-Konzept lässt sich ein multi-statisches Interferometer zur Erzeugung von DEMs realisieren, welches auf Grund der **einfachen Bauweise** der zusätzlichen Satelliten kostengünstiger umzusetzen ist als traditionelle Systeme mit mehreren komplexen Satelliten. Ein zusätzlicher Vorteil des MirrorSAR-Systems ist außerdem die Möglichkeit zur Erweiterung um zusätzliche Mirror-Satelliten und die Möglichkeit einzelne Mirror-Satelliten bei einem Ausfall zu ersetzen. Dadurch vereinfacht sich auch das Redundanzkonzept auf den einzelnen Mirror-Satelliten.

Die Umsetzung eines MirrorSAR-Systems sowie dessen Performance wurden bereits am Beispiel des HRWS-Projektes detailliert dargestellt. Der Hauptsatellit wird dabei als monostatisches System ausgelegt, ähnlich zu TerraSAR-X/TanDEM-X, aber mit verbesserter Abbildungsleistung, Auflösung und Genauigkeit. Die drei zusätzlichen Mirror-Satelliten sind jeweils mit unterschiedlichen Abständen in einer Helix-Formation zum Hauptsatelliten angeordnet (siehe Abbildung 2-7 links). Diese Formation hat sich bereits bei TanDEM-X als zuverlässig und sicher erwiesen, da sich die Satelliten in ihrer Flugbahn nie kreuzen. Die Anzahl von drei oder mehr Mirror-Satelliten ist dabei von Vorteil, denn dadurch lassen sich unterschiedlich große Basislinien realisieren, was eine hochpräzise und robuste SAR-Interferometrie ermöglicht und die Flexibilität für die Erzeugung globaler und lokaler DEMs erhöht.

Für ein konkretes Beispiel wird ein Hauptsatellit mit einer durchschnittlichen Sendeleistung von 2.3 KW im X-Band (vergleichbar mit TanDEM-X) angenommen. Die drei begleitenden Mirror-Satelliten haben jeweils eine Bandbreite von 200 MHz bei einer Abbildungsleistung von 20 km Streifenbreite. Dann ergibt sich also für ein globales DEM mit nur einer Abdeckung eine Höhengenaugigkeit von weniger als zwei Metern bei einer Auflösung von 4 m x 4 m. Verglichen mit dem TanDEM-X Global DEM ergibt sich eine ähnliche Höhengenaugigkeit bei einer um eine Größenordnung verbesserten Auflösung, und dies mit Daten aus nur einem Überflug. Abbildung 2-8 zeigt dazu ein aus F-SAR Daten (flugzeuggetragenes Radarsystem des DLR) simuliertes DEM, generiert mit den TanDEM-X-Parametern (links) und den MirrorSAR-Parametern (rechts). Man erkennt deutlich die Verbesserung der Auflösung durch MirrorSAR, speziell im vergrößerten Bereich.

Das MirrorSAR-Konzept kann auch mit einem **weniger komplexen Hauptsatelliten** als einem HRWS- oder TanDEM-X-ähnlichen Beleuchter (mit z. B. geringerer Bandbreite, einfacher Polarisation, etc.) umgesetzt werden. Da die DEM-Performance maßgeblich von den Mirror-Satelliten (z. B. von der Antennengröße) sowie von der Basislinie, dem Abstand zwischen den Begleitern und dem Hauptsatellit, und der Anzahl an Abdeckungen bestimmt wird, ist dabei trotzdem eine vergleichbare interferometrische Performance zu erwarten. Die Auswirkung von Antennengröße, Sendeleistung oder Pointing-Genauigkeit auf die Performance muss dazu noch untersucht werden.

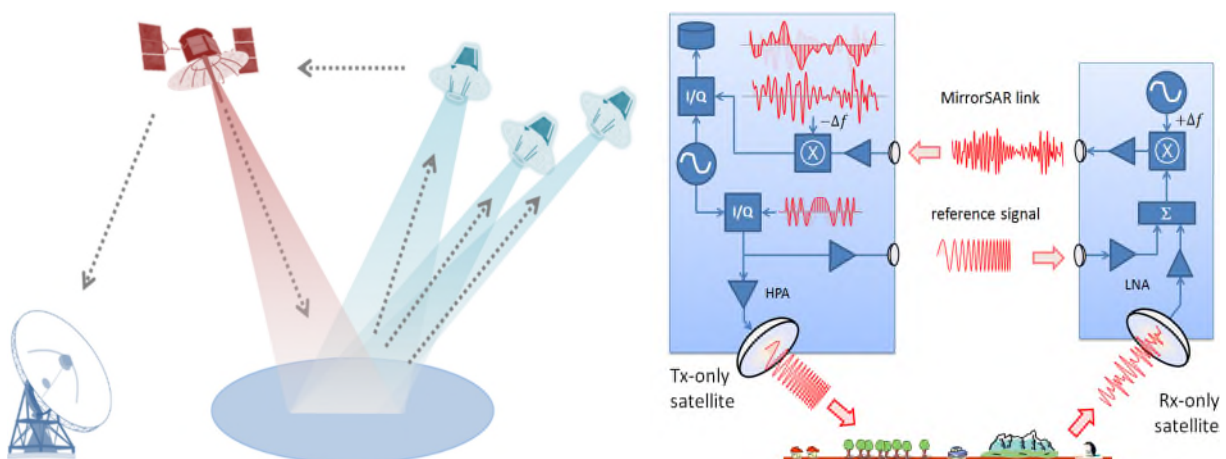


Abbildung 2-7: MirrorSAR Konzept mit einem Hauptsatelliten (rot) und drei Mirror-Satelliten (blau) (links) und MirrorSAR Empfangskette und Synchronisation zwischen Haupt- und Mirror-Satellit (rechts).

Sollte ein gleichzeitiger Start des Hauptstelliten samt der Begleiter aus Kosten- oder Zeitgründen nicht möglich sein, könnten die Begleiter auch zu einem späteren Zeitpunkt zum Hauptsatelliten hinzustoßen. Dazu müssen jedoch auf dem Hauptsatelliten bereits alle notwendigen Fähigkeiten für einen bi- bzw. multistatischen Betrieb vorgesehen sein. Diese notwendigen Fähigkeiten müssen in den frühen Projektphasen analysiert und mit eingeplant werden. Insbesondere ist hier zu untersuchen, welche Fähigkeiten wie etwa Formationsflug, Synchronisation oder Datenübertragung der Hauptsatellit und die Begleiter dazu bereitstellen müssen.

Ein weiteres theoretisches Missionsszenario stellen Schwärme oder Cluster von Kleinsatelliten dar. Hierzu wird am DLR aktuell intensiv geforscht. Die Ausarbeitung eines solchen Konzepts ist jedoch noch in einem frühen Stadium und daher derzeit nicht ausreichend, um es für die Phase-0 dieser nationalen Mission in Betracht zu ziehen.

Zusammenfassend stellt das MirrorSAR-Konzept die **innovativste Lösung** bei gleichzeitiger guter Realisierbarkeit für ein multi-statisches Systems dar. Die reduzierten Kosten durch die einfache Bauweise und Funktion der Mirror-Satelliten sowie eine verbesserte Auflösung der DEM-Produkte, sind dabei in Bezug auf die Nutzeranforderungen für hoheitliche und wissenschaftlich-hoheitliche Anwender [RD-02] positiv hervorzuheben. Weitere Vorteile wie eine mögliche Redundanz durch zusätzliche Mirror-Satelliten, eine mögliche Verlängerung der Missionsdauer durch das Ersetzen von Mirror-Satelliten, erhöhte Flexibilität bei der Erzeugung der DEM-Aufnahmen sowie die Flexibilität im Design des Hauptsatelliten sprechen ebenfalls positiv für das MirrorSAR-System. Des Weiteren wird durch das innovative Potential des Konzeptes und die Einzigartigkeit einer solchen Mission die Spitzenposition Deutschlands in der Radarfernerkundung langfristig gestärkt.

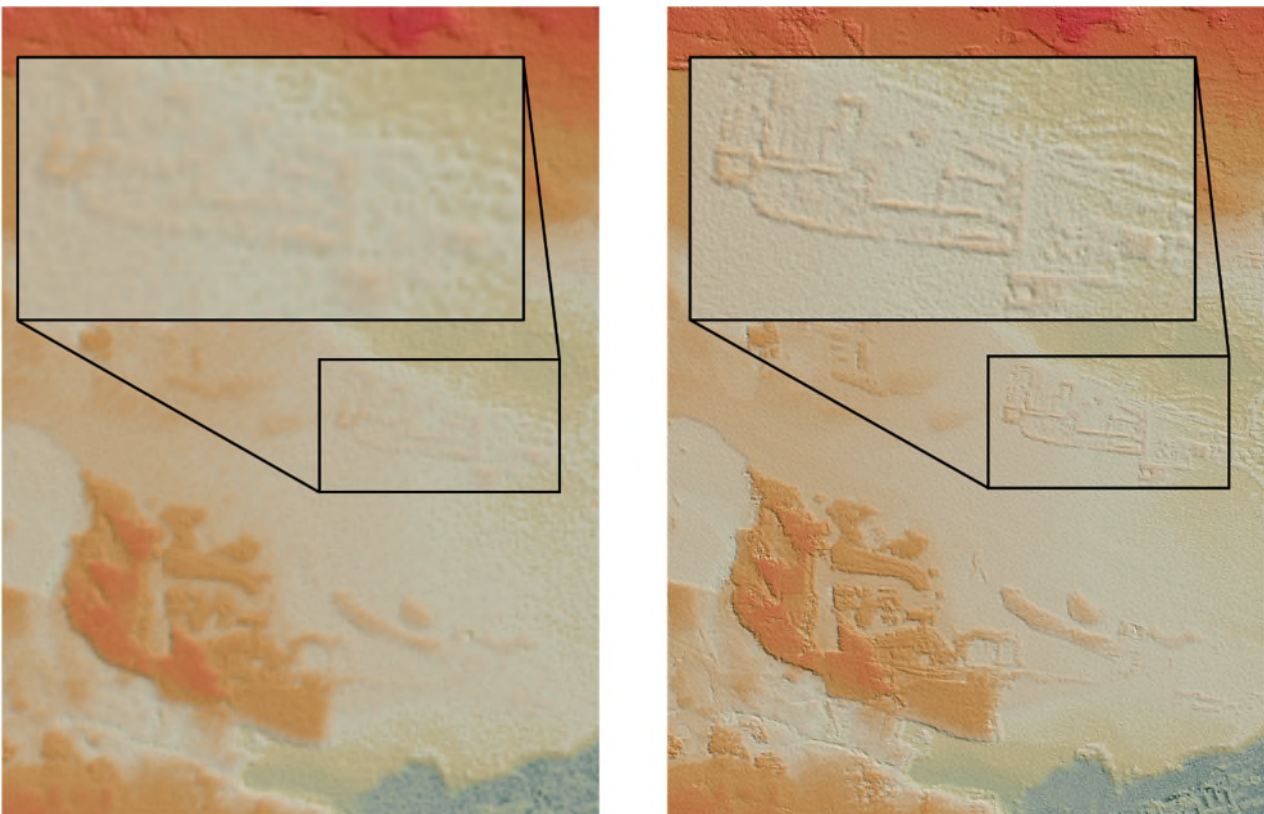


Abbildung 2-8: DEM Beispiel simuliert aus F-SAR Daten für TanDEM-X (links) und HRWS MirrorSAR (rechts). Der schwarze Kasten in beiden Bildern zeigt eine Vergrößerung des urbanen Gebietes.

2.4.3 X-Band SAR Instrument und System Technologien

Airbus Defence und Space ist seit Jahrzehnten Vorreiter innovativer hochauflösender Radarsysteme. Aktuelle Radarsysteme oder -komponenten sind z.B. SARah-1 und verwenden neuste Phased Array Antennentechnologie im Front-end und digital beamforming (DBF) Technologie im Backend. Das Airbus Universal Processing Module (UPM) stellt dabei die notwendigen Ressourcen zur Nutzung der DBF Technologie zur Verfügung. Durch diese Technologie können breite Zielgebiete bei gleichzeitig hoher geometrischer Auflösung beobachtet werden.

Airbus Defence and Space ist der führende Hersteller von X-Band-Phased-Array-Antennen für satellitengestützte Radarsysteme mit synthetischer Apertur (SAR). Diese Fähigkeiten und die langjährige Erfahrung ermöglicht es Airbus seinen Kunden leistungsstarke X-Band-SAR Systeme anzubieten, die optimal auf die Missionsziele zugeschnitten sind.

Airbus blickt auf eine lange Historie in der Entwicklung, Bau und Inbetriebnahme von weltraumgestützten Radarsystemen zurück. Die Erfolgsgeschichte von Airbus SAR Systemen begann Anfang der 1990er Jahre mit den Starts von ERS-1 und -2. Weiterer Meilensteine sind die Radarmissionen zur Gewinnung von Höhenmodellen SIR-C/X-SAR (1994) und SRTM (2000), sowie die deutsche Missionen TerraSAR-X/TanDEM-X in den Jahren 2007 und 2010. Abdeckung, Qualität und Genauigkeit machen WorldDEM, ein aus TerraSAR und TanDEM Daten abgeleitetes globales Höhenmodell, weltweit einzigartig. Diese Missionen profitieren in hohem Maße von der Airbus Antennentechnologie auf Basis hochflexibler und skalierbarer Phased-Array Antennen durch

- **Unterstützung verschiedenster Aufnahmetechniken** für hohe geometrische Auflösung oder große Ausdehnung der Zielgebiete
- **Hohe Skalierbarkeit** um maßgeschneiderte Lösungen im Rahmen der technischen und finanziellen Randbedingungen der Mission zu ermöglichen
- **Exzellente Instrumentenstabilität und Präzision** in Amplitude und Phase zur Unterstützung der interferometrischen Datenerfassung
- Möglichkeit der Nutzung **sehr hoher Signalbandbreiten** durch ITU-R-Zuweisung (1.2GHz) und damit Erzeugung **hochauflösender** Radarprodukte

Die hochmoderne Radartechnologie von Airbus, genannt SCOUT, bildet im Rahmen einer nationalen Verteidigungs- und Sicherheitssatellitenmission Deutschlands die Grundlage für SARah-1. Diese Technologie wurde seit dem Start des SARah-1-Satelliten und seinem Betrieb im Orbit erfolgreich erprobt und ist seit Oktober 2023 im operationellen Einsatz. Durch die hohe Modularität der SCOUT-Technologie kann die Instrumentenkonfigurationen optimal angepasst werden, um vielfältige Benutzeranforderungen für verschiedene Anwendungen und Marktbedürfnisse zu erfüllen. So kann ein Instrument auf Basis von SCOUT z.B. multiple Empfangskanäle enthalten, um die Verwendung von mehreren Phasenzentren zur Along-Track Interferometrie (ATI), Bewegtzieldetektion (GMTI) und zur polarimetrischen Datenerfassung zu unterstützen.

Parallel wurde im Rahmen eines Exportprojektes das Radar-RF Subsystem (Phased-Array Antenne und Analogelektronik) des Kompsat-6 Satelliten für das Korean Aerospace and Research Institute (KARI) erfolgreich geliefert. In Bezug auf Antennentechnologie ist Airbus nicht auf aktive Phased-Array Antennen beschränkt. Für ein Exportprogramm hat Airbus einen entfaltbaren CFK-Reflektor mit 5m Durchmesser für X-Band Radaranwendung entwickelt, geliefert (Abbildung 2.8) und erfolgreich in Betrieb genommen.

Die X-Band-Technologie und Produktlinie von Airbus wird kontinuierlich weiterentwickelt um Effizienz, Nachhaltigkeit und Multifunktionalität der Radarinstrumente zu verbessern. Robuste Hochleistungs-TR Module auf Basis von Gallium-Nitrid (GaN) Halbleitertechnologie, ein integrierter Antennenstrahler (CORD) und intelligente, universelle Signalerfassungs- und Prozessierungsmodule (UPM) werden aktuell entwickelt. Es wird erwartet, dass TSX-FOX und die nächste Generation von SARah sowie zukünftige Exportmissionen von diesen weiterentwickelten SCOUT-Technologien profitieren werden. Eine aktuelle ESA General Support Technology Programme (GSTP) Vorhaben arbeiten an der nächsten Generation von Phased Array Antennen, die in Form erster Breadboards bereits aufgebaut und erfolgreich verifiziert wurden. Die Aktivität verfolgt das Ziel Masse, Bauvolumen und Kosten von Arrayantennen ohne signifikante Einbußen der Leistungsfähigkeit zu reduzieren.


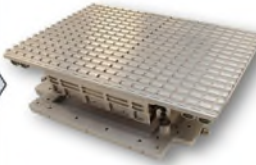
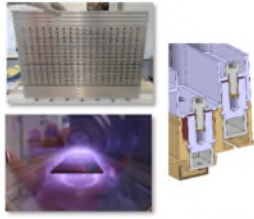
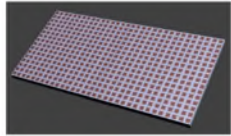

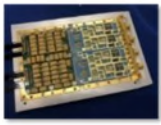
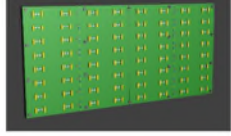
TerraSAR-X/Tandem-X	SCOUT	SCOUT Evo	Next Generation
			
			
<ul style="list-style-type: none"> TerraSAR/Tandem-X 	<ul style="list-style-type: none"> SARah-1 KompSAT-6 (RFSS) 	<ul style="list-style-type: none"> TerraSAR-FOX Export 	<ul style="list-style-type: none"> New X-band Radar Missions

Abbildung 2-9: Evolution der X-band Active Phased Array Antenna Front-End Technologie und verwendeten TR Modulen als Schlüsselemente

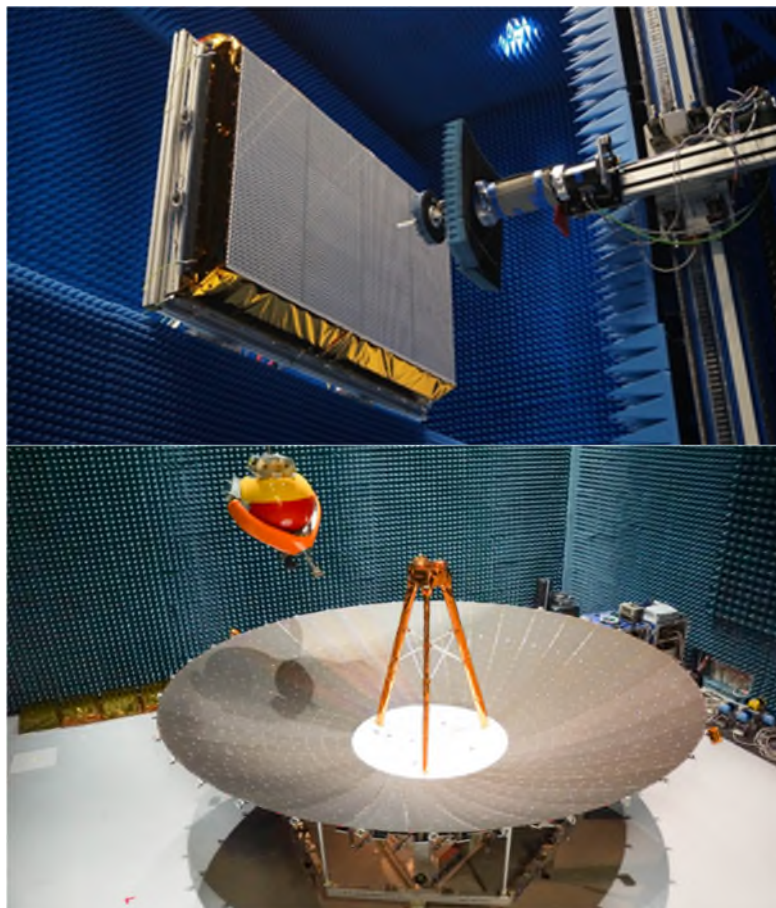


Abbildung 2-10: Teil der KompSAT-6 Antenne (oben) und 5m CFK Reflektor Flug Hardware (unten) in Test

Airbus verfügt neben den relevanten Technologien auch über ausgeprägte Fähigkeiten im Radar Systemdesign und implementiert derzeit für ESA das hochmoderne Digital Beamforming Radar ROSE-L, welches erstmals in vollem Umfang die beiden Techniken Scan On Receive (SCORE) und Multiple Azimuth Phase Centers (MAPS) implementiert. Diese Aufnahmetechnik erlaubt die deutliche Vergrößerung der Streifenbreite ohne die geometrische Auflösung zu reduzieren, wie es in klassischen SAR Systemen nicht vermeidbar ist. Darüber hinaus hält Airbus ein Patent, welches unter bestimmten Bedingungen die SCORE Funktion durch einfache, dispersive Antennenstrahlsteuerung mittels schaltbaren Laufzeitstellgliedern ermöglicht (F-SCAN). Das Verfahren wurde im Rahmen eines X-Band Radarsystem bereits erfolgreich im Orbit erprobt.

Ein weiteres Schlüsselement für alle modernen in Planung oder Implementierung befindlichen Mikrowellensystemen ist das Universal Processing Module (UPM) des SAR Back-ends.

UPM wurde von Airbus intern als strategische Produktentwicklung etabliert und fest in der Radar-Roadmap von Airbus verankert. Als einzelnes Modul verfügt es über alle Funktionen und Schnittstellen für die Instrument-internen Kontrollfunktionen, die Radar-Signalerzeugung, die mehrkanalige Echo-Digitalisierung inklusive aller On-Board Signalverarbeitungsfunktionen. UPM macht damit Mehrkanalsysteme wie ROSE-L erst möglich und befindet sich derzeit in der Produktqualifikation.

Durch Bestückungsoptionen ist das UPM in hohem Maße konfigurierbar und unterstützt skalierbare Systemdesigns optimal. Es baut auf den heute leistungsfähigsten Wandlern (Analog/Digital und Digital/Analog) und programmierbaren FPGAs auf und erlaubt so die Anpassung an spezifische Missionsanforderungen ohne neue Hardware-Entwicklung oder -Qualifikation.

2.5 ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN

Im Nachfolgenden Diagramm ist die Projektstruktur für die TerraSAR-FOX Phase 0 Studie abgebildet. Bei der Auswahl der Partner stand die Kompetenz für die Kernaufgabe der Phase-0 Studie im Vordergrund. Deswegen wurde das DLR-HR Institut mit Ihrer einzigartigen Erfahrung mit Radarsystemen für die Erdbeobachtung, insbesondere auch mit TerraSAR-X und Tandem-X, für die Analyse des wissenschaftlichen Nutzerbedarfs und für mögliche Missionskonzepte als einziger Partner zu Airbus mit aufgenommen. Die Zuordnung der Arbeitspakete zu den Projektpartnern ist im Arbeitsstrukturplan dargestellt.

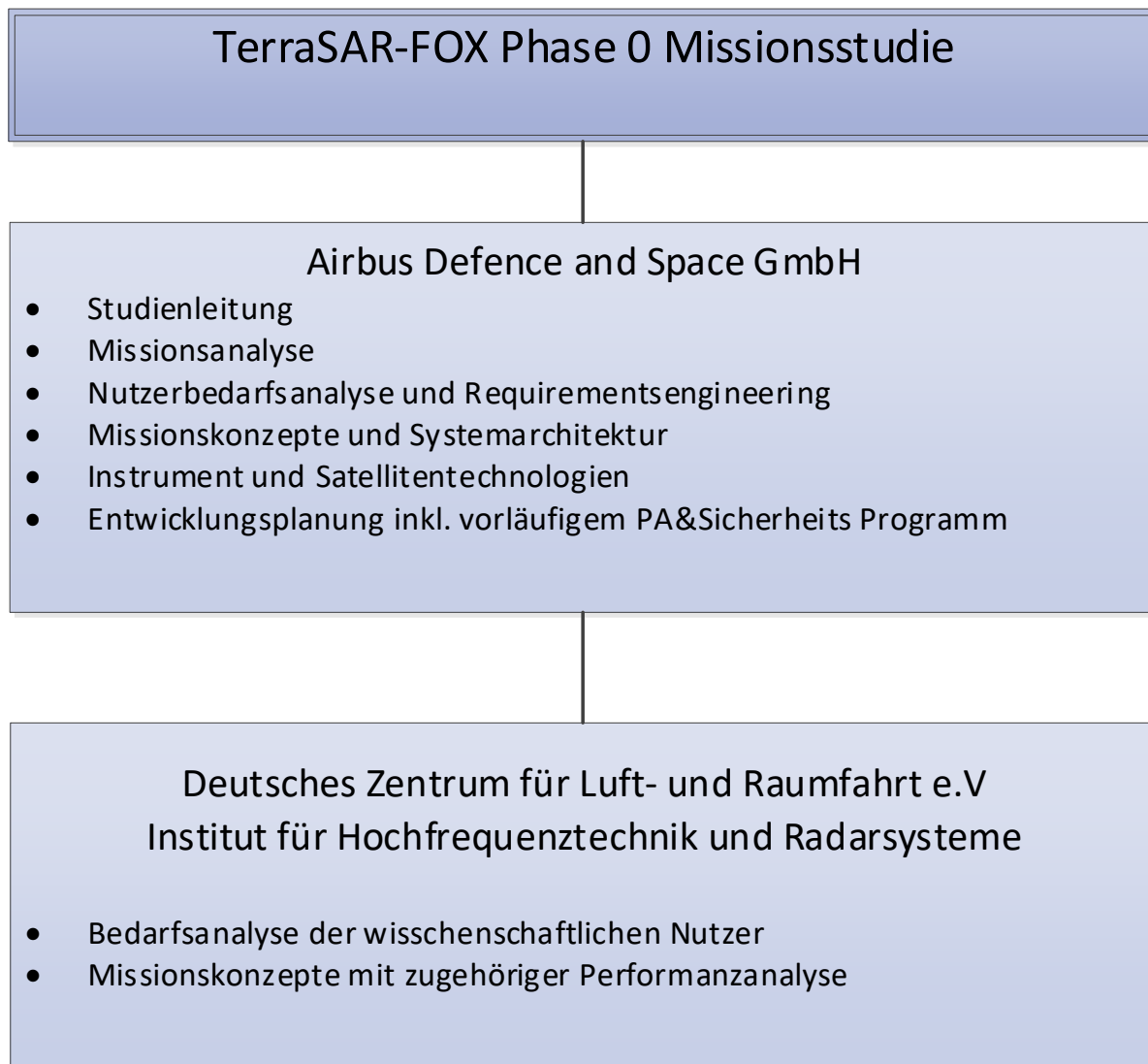


Abbildung 2-11: Organisationsstruktur der TerraSAR-FOX Phase-0 Studie: Airbus ist als Hauptauftragnehmer verantwortlich für die Ausführung der Studie . Das DLR-HR Institut wird wegen Ihrer einmaligen Expertise im Bereich X-Band Radar Erdbeobachtung und Technologie in die Studie eingebunden.

3 EINGEHENDE DARSTELLUNG

3.1 ERZIEHLTE ERGEBNISSE

Um eine erfolgreiche nationale SAR-Folgemission im X-Band zu entwickeln, wurden in der Projektphase 0 die Nutzeranforderungen konkretisiert sowie entsprechende solide Missionskonzepte erarbeitet. Gerade bei der Entwicklung und Evaluierung von Missionskonzepten wurde die technische Machbarkeit und die Technologiereife realistisch betrachtet, um verlässliche ROM Kostenkalkulationen vornehmen zu können und Komplikationen in späteren Projektphasen soweit vorhersehbar zu vermeiden. Zusätzlich wurde ein Ansatz basierend auf neuen Technologien betrachtet, welcher das Potential für deutlich Kosten Reduktion bei vergleichbarer Missionsperformance bietet.

Die erfassten Nutzeranforderungen wurden analysiert, ausgewertet, ergänzt und konkretisiert und es wurden Synergien zwischen den verschiedenen Anwendungen, herausgearbeitet. Zusätzlich wurden diese Anwendungsparameter im Zusammenhang mit den heutigen und in absehbarer Zukunft verfügbaren technologischen Möglichkeiten betrachtet, unter besonderer Berücksichtigung des finanziellen Aufwands für eine Realisierung dieser Konzepte. Ausgehend von den priorisierten Nutzeranforderungen, den oben genannten Ziele und dem Mission-Statement, wurden die Anforderungen an die Radarinstrumente abgeleitet, um danach mögliche Missionskonzepte definiert.

Als Resultat wurden vier verschiedene Missionskonzepte betrachtet, analysiert und evaluiert, welche die Aspekte.

- Optimale Abdeckung der Anwendungen,
- Kosten,
- technologische Innovation,
- Risiko,
- Einklang mit den programmatischen Zielen und
- mögliche Synergien mit anderen Missionen weltweit,

berücksichtigen. Die generelle Durchführbarkeit der Missionskonzepte wurden gezeigt und die Technologiereife der Missionsbestandteile dargestellt.

Es wurde eine vorläufige Customer Technical Requirement Specification (CTRS) einschließlich der Begründung der Anforderungen sowie eine vorläufige Missionsbeschreibung entsprechend dem typischen Detaillierungsgrade einer Phase-0 Studie geliefert.

3.2 VERWERTBARKEIT DES ERGEBNISSES IM SINNE DES FORTGESCHRIEBENEN VERWERTUNGSPLANS

Das Vorhaben diene dazu, verschiedene Missionsoptionen für eine deutsche nationale nachfolge Mission für TerraSAR-X / Tandem-X zu untersuchen und zu bewerten. Dieses Vorhaben unterstützt das Ziel die Führungsposition sowohl für die Wissenschaft als auch für die Industrie weiter zu sichern. Zum einen wurden multistatische Missionskonzepte und neue SAR Moden vorgeschlagen, welches Neuland für Wissenschaftliche Anwendungen bietet. Aus technologischer Sicht wurde ein Konzept erarbeitet, welche eine neuartige Antennentechnologie umsetzt welche den Technologievorsprung der deutschen Industrie sicherstellen würde.

Die nominelle Lebensdauer der TerraSAR Satelliten sind schon lange überschritten. Deswegen ist die Implementierung einer Nachfolgemission dringend angesagt. Insofern wird eine Auftragsvergabe für die Entwicklung von TerraSAR-FOX zeitnah erfolgen. Mit der Ausschreibung der Phase-A Systemstudien wird noch in diesem Jahr erwartet.

Eine enge Verzahnung der deutschen Wissenschaftslandschaft (DLR-HR) und der deutschen Raumfahrtindustrie (Airbus) wird durch dieses Studie stark gefördert. Für die Entwicklung der Plattform und des Instrument wird ein hoher KMU Anteil angestrebt.

Die wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit ist voll umfänglich gegeben, da die Ergebnisse der Phase-0 Studie direkt als Startpunkt für die erwartete Phase-A Aktivität genutzt werden und sogar notwendig für ein effiziente Phase A sind. Darüber hinaus ist die Anschlussfähigkeit natürlich auch für die nachfolgenden Entwicklungsphasen sowie die Betriebsphase gewährleistet, da die Missionskonzepte gezielt für den nationalen Nutzerbedarf optimiert werden.

3.3 FORTSCHRITT AUF DEM GEBIET DES VORHABENS BEI ANDEREN STELLEN

Der kommerzielle SAR Markt hat sich in den letzten Jahren entwickelt und wächst weiterhin kontinuierlich an. Das kommerzielle Marktumfeld wird maßgeblich von einer Vielzahl privater Akteure geprägt. Neben etablierten Missionen wie TerraSAR-X, TanDEM-X, PAZ, COSMO SkyMed und RADARSAT spielen New Space Firmen wie Capella Space, ICEYE und UMBRA eine zunehmende Rolle und bereichern das Datenangebot.

Der Trend zur kommerziellen Nutzung von Radar-Erdbeobachtungsdaten wird sich verstärken. Die kommenden Jahre dürften durch mehrere entscheidende Entwicklungen und unterschiedliche SAR Systeme geprägt sein:

- Ein wachsender Bedarf an Nahe-Echtzeit-Daten wird den Markt für radarbasierte Erdbeobachtungsdienste beeinflussen. Die Möglichkeit, kontinuierlich und in nahezu Echtzeit auf präzise Daten zuzugreifen, wird für zahlreiche Anwendungsfelder wie im Bereich des Katastrophenmanagements, Sicherheit und maritimes Monitoring immer wichtiger. Der Trend zu Nahe-Echtzeit-Daten wird durch technologische Fortschritte in der Satellitenkommunikation und Datenverarbeitung begünstigt. Moderne SAR-Satellitenkonstellationen, die in der Lage sind, Daten in kurzen Zeitintervallen zu erfassen und zu übertragen, sowie die zunehmende Integration von Cloud-Technologien beschleunigen diesen Wandel. Dies wird nicht nur die Effizienz bestehender Anwendungen verbessern, sondern auch neue Einsatzmöglichkeiten für radarbasierte Erdbeobachtungsdienste eröffnen. Insgesamt wird die steigende Nachfrage nach zeitnah verfügbaren und präzisen Informationen die Weiterentwicklung des Marktes für radarbasierte Erdbeobachtung erheblich vorantreiben. Unternehmen und Organisationen, die in der Lage sind, diesen Bedarf zu erfüllen, werden eine Schlüsselrolle bei der Lösung globaler Herausforderungen in den Bereichen Katastrophenmanagement, Sicherheit und maritimes Monitoring spielen
- Trend zur kommerziellen Nutzung von Radar-Erdbeobachtungsdaten wird sich verstärken. Relativ neue Akteure wie Capella Space, UMBRA, ICEYE und Synspective, die ihre eigenen Satellitenkonstellationen betreiben, bieten zunehmend hochauflösende Radar-Bilder mit hoher Wiederholrate an. Diese Satellitenkonstellationen bauen auf dem New Space Ansatz auf und greifen dabei auf Standard Komponenten zurück die eine kostengünstige Manufaktur von Kleinsatelliten unter Nutzung der Skaleneffekte ermöglichen. Diese Missionen eignen sich insbesondere für das Monitoring von hochdynamischen Prozessen, da in Abhängigkeit des Breitengrades mehrere Aufnahmen an einem Ort möglich sind. Sich bewegende Objekte wie Schiffe und Erfassung von Überflutungen sowie einfache Zeitserien für Sicherheitsaufgaben lassen sich damit gut realisieren. Alle Anwendungen die eine hohe Präzision (stabiler Orbittube), wie ZB SAR Interferometrie, eine hohe radiometrische Datenqualität, große Abdeckung und generell große Aufnahmekapazitäten benötigen können von diesen Kleinsatellitenmissionen nicht bedient werden.
- Seit 2007 sind große Radarsatelliten ein fester Bestandteil der Erdbeobachtung und haben den Markt maßgeblich geprägt und etabliert. Diese traditionellen Systeme stellen bis heute die Basis für die Mehrzahl der kommerziellen Anwendungen dar und genießen aufgrund ihrer ausgereiften Technologie eine zentrale Bedeutung im SAR-Sektor. Ein wesentlicher Vorteil dieser großen Satelliten ist ihre lange Lebensdauer, die den Betrieb über viele Jahre ermöglicht, sowie ihre hohe Zuverlässigkeit, die eine konsistente und präzise Datenerfassung gewährleistet. Sie liefern Daten von außergewöhnlicher Genauigkeit und Qualität, die für zahlreiche anspruchsvolle Anwendungen unverzichtbar sind.

Insbesondere in den Bereichen Infrastrukturmonitoring, Bodenbewegungsanalyse, militärische Aufklärung, Objekterkennung und die Erstellung digitaler Geländemodelle spielen große Radarsatelliten eine Schlüsselrolle. Beim Infrastrukturmonitoring ermöglichen sie beispielsweise

die Überwachung von Bauwerken wie Brücken und Dämmen, um potenzielle Gefahren frühzeitig zu erkennen. Die Analyse von Bodenbewegungen ist essenziell für die Erkennung von geologischen Prozessen wie Erdbeben, Bergbaubanking und tektonischen Verschiebungen. Militärische Anwendungen profitieren von der hohen Auflösung und Zuverlässigkeit der Daten, die für die präzise Aufklärung und Überwachung von strategischen Gebieten erforderlich sind. Ebenso ist die Objekterkennung, etwa in maritimen oder urbanen Bereich, auf die hochwertigen Radardaten dieser Systeme angewiesen. Schließlich ermöglichen die generierten digitalen Geländemodelle die detaillierte und umfassende Kartierung von Landschaften, was in der Geoinformationsbranche und für Umweltstudien von großer Bedeutung ist. Die Kombination aus bewährter Technologie, Langlebigkeit und präzisen Daten macht große Radarsatelliten weiterhin zu einer tragenden Säule des SAR-Markts und unverzichtbar für zahlreiche Schlüsselanwendungen in der modernen Welt.

Die in der TerraSAR-FOX-Studie identifizierten Anwendungen werden im großen Masse von kommerziellen Daten bestehender und geplanter SAR-Missionen unterstützt. Dennoch gibt es Einschränkungen bei der Realisierbarkeit bestimmter Datentypen: Die Generierung eines globalen Höhenmodells in angemessener Zeit und der erforderlichen Qualität bleibt eine Herausforderung, die derzeit keine SAR-Mission vollständig bewältigen kann.

Ein vielversprechender Ansatz für die Weiterentwicklung von Digitalen Höhenmodellen in der Zukunft beinhaltet nur das derzeitige Konzept der KOMPSAT-8 Mission. Diese sieht im aktuellen Konzept einen multistatischen Betrieb vor, bei dem drei Companion-Satelliten in Verbindung mit dem Hauptsatelliten arbeiten. Dieses Konzept basiert auf dem HRWS Konzept und ermöglicht eine höhere räumliche Abdeckung sowie eine Verbesserung der Datenqualität.

Die folgende Tabelle veranschaulicht die potenzielle Beitragsfähigkeit aktueller und zukünftiger SAR-Missionen zu den in der TerraSAR-FOX-Studie untersuchten Anwendungen. Die Bewertungen basieren auf der Einschätzung von Airbus und stützen sich auf öffentlich zugängliche Informationen. Dabei wurden verschiedene Kriterien wie Auflösung, Wiederholfrequenz, Qualität, Präzision, Lagegenauigkeit, Abdeckung und Datenverfügbarkeit berücksichtigt.

Dabei sei angemerkt, dass nach unserem Kenntnisstand die Missionen ICEYE, Umbra und Capella InSAR nur innerhalb eines kurzen Zeitraums realisieren können, weswegen sie für das langfristige Infrastrukturmonitoring nicht geeignet sind. Das behördliche Monitoring von Brücken, Straßen und Gebäuden erfordert eine langfristige Beobachtung und den Aufbau präziser Datenzeitreihen, die sich über Monate oder sogar Jahre erstrecken. Ein gutes Beispiel hierfür ist das Bodenbewegungsmonitoring in Böblingen, das sich über einen Zeitraum von 30 Jahren erstreckte. Kleinsatellitenmissionen sind für derart langfristige Aufgaben jedoch nicht geeignet. Ihre Orbits lassen sich in der Regel nicht über diese langen Zeiträume stabil halten. Dadurch sind interferometrische Radarmessungen oft nur innerhalb weniger Orbits möglich, bevor die Bahndrift des Satelliten die für die kohärente Datenanalyse notwendige geometrische Basis verändert.

Table 3-1: Beitragspotentiale von heutigen und zukünftigen SAR Mission für Anwendungen deutscher hoheitlicher Nutzer und Wissenschaftler

Anwendung (unter Berücksichtigung der Detektierbarkeit, Wiederholrate, Zeitlichkeiten)	TerraSAR-X TanDEM-X -PAZ-1	Cosmo Skymed 2nd Gen	KOMPSAT-5	ICEYE	UMBRA	Capella Space	Strix (Synspetive)	PAZ-2	Cosmo Futuro	KOMPSAT-6	KOMPSAT-8
Anzahl Satelliten	2	2+2	1	40	24	36		2	2	1	1
Änderungsdetektion	✓	✓	✓	-	-	-	-	✓	✓	✓	✓
Infrastrukturmonitoring	✓	✓	✓	-	-	-	-	✓	✓	✓	✓
Bodenbewegung	✓	✓	✓	-	-	-	-	✓	✓	✓	✓
DEM, global, regional	✓	-	-	-	-	-	-	option	-	-	✓
Ölverschmutzung	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Maritime Anwendungen	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Schifferkennung	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Schnee und Gletscher	✓	✓	✓	✓	-	✓	?	✓	✓	✓	✓
Landnutzung	(✓)	(✓)	(✓)	(✓)	-	(✓)	(✓)	(✓)	(✓)	(✓)	(✓)
Forstwirtschaft	(✓)	(✓)	(✓)	(✓)	-	(✓)	(✓)	(✓)	(✓)	(✓)	(✓)
Landwirtschaft	(✓)	(✓)	(✓)	(✓)	-	(✓)	(✓)	(✓)	(✓)	(✓)	(✓)
Hochwasserkartierung	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Katastrophenmanagement	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Bodenkontrollpunkte	✓	✓	-	-	-	-	-	✓	✓	✓	✓
Bodenfeuchte	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Topografische Kartierung	✓	✓	✓	✓	-	-	-	✓	✓	✓	✓

3.4 VERÖFFENTLICHUNG DER ERGEBNISSE

Die im Rahmen des Studie erarbeiteten Lösungen wurden einem repräsentativen Nutzerkreis präsentiert und mit diesem diskutiert. Bedingt durch die Konkurrenzsituation werden die detaillierten Missionskonzepte zum aktuellen Zeitpunkt nicht veröffentlicht.