



PROGRAMME OF THE
EUROPEAN UNION



EGNOS

NAVIGATION MADE IN EUROPE

EUROPEAN RADIO NAVIGATION PLAN 2023



Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um eine Arbeitsunterlage der Kommissionsdienststellen, die von der Generaldirektion Verteidigungsindustrie und Weltraum (DG DEFIS) in Zusammenarbeit mit der Gemeinsamen Forschungsstelle (JRC), dem wissenschaftlichen Dienst der Europäischen Kommission, verfasst wurde.

Die in diesem Dokument geäußerten Ansichten spiegeln den Standpunkt der Kommissionsdienststellen wider und können keinesfalls als offizieller Standpunkt der Europäischen Kommission betrachtet werden. Die im vorliegenden Dokument enthaltenen Informationen sind für die Mitgliedstaaten und/oder die mit Ortung, Navigation und Zeitgebung befassten Stellen bestimmt.

Weder die Europäische Kommission noch im Namen der Kommission handelnde Personen sind für die Verwendung dieser Veröffentlichung verantwortlich. Für Informationen zur Methodik und Qualität von für diese Veröffentlichung verwendeten Daten, die weder von Eurostat noch von anderen Kommissionsdienststellen stammen, sollte die angegebene Quelle kontaktiert werden. Die in den Karten verwendeten Bezeichnungen und die Darstellung der Karteninhalte geben in keiner Weise die Auffassung der Europäischen Union zur Rechtsstellung von Staaten, Hoheitsgebieten, Städten oder Gebieten bzw. deren Behörden oder zum Verlauf ihrer Grenzen wieder.



Die Weiterverwendung von Dokumenten der Europäischen Kommission ist durch den Beschluss 2011/833/EU der Kommission vom 12. Dezember 2011 über die Weiterverwendung von Kommissionsdokumenten (ABl. L 330 vom 14.12.2011, S. 39) geregelt. Sofern nicht anders angegeben, darf dieses Dokument unter den Bedingungen der Creative-Commons-Lizenz „Namensnennung – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International“ (CC-BY 4.0) weiterverwendet werden (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). Dies bedeutet, dass die Weiterverwendung gestattet ist, sofern die Quelle ordnungsgemäß genannt wird und Änderungen angegeben werden. Für jede Verwendung oder Wiedergabe von Fotos oder anderen Materialien, die nicht Eigentum der EU sind, muss direkt bei den jeweiligen Urheberrechtshabern eine Genehmigung eingeholt werden.

Alle Inhalte © Europäische Union, 2023, sofern im Dokument nicht anderes angegeben.

Druckfassung ISBN: 978-92-68-11354-7 doi: 10.2889/922565

Katalognummer: HV-09-23-074-DE-C

Elektronische Fassung (PDF) ISBN: 978-92-68-11350-9 doi: 10.2889/922170

Katalognummer: HV-09-23-074-DE-N

Zitierweise: Europäische Kommission, „Europäischer Funknavigationsplan 2023“, 2023, ISBN 978-92-68-11354-7, doi: 10.2889/922565.

Inhalt

Inhalt.....	3
1 EINLEITUNG.....	6
1.1 Kontext des Europäischen Funknavigationsplans	7
1.2 Zweck des ERNP	8
1.3 Anwendungsbereich des ERNP	8
1.4 Ziele des ERNP	8
1.5 Struktur des ERNP	9
1.6 Anmerkungen zum ERNP	9
2 PNT-LANDSCHAFT	10
2.1 Einführung in PNT	11
2.2 Rolle von PNT in der Gesellschaft	12
2.3 Wirtschaftliche Vorteile von PNT/GNSS.....	13
2.4 Bedürfnisse der PNT-Nutzer.....	14
2.5 Herausforderungen in Bezug auf PNT/GNSS.....	16
2.6 Trends und Chancen	18
2.7 PNT-Systeme und -Dienste.....	20
2.7.1 Überblick über PNT-Systeme.....	20
2.7.2 Globale Satellitennavigationssysteme (GNSS) und Augmentationen	23
2.7.3 Konventionelle PNT-Systeme	25
2.7.4 Neue PNT-Systeme/PNT-Systeme der nächsten Generation	27
2.8 Interoperabilität und Kompatibilität	29
2.9 Internationale PNT-Maßnahmen	30
3 PNT in der EU	31
3.1 EU-Weltraumprogramm 2021–2027	32
3.2 Galileo-Dienste.....	33
3.2.1 Offener Dienst (OS) von Galileo	34
3.2.2 Hochpräzisionsdienst (HAS).....	37
3.2.3 Kommerzieller Authentifizierungsdienst (CAS)/Signalauthentifizierungsdienst (SAS)	38
3.2.4 Öffentlicher regulierter Dienst (PRS).....	39
3.2.5 Notfalldienst	40
3.2.6 Zeitgebungsdienst	41
3.2.7 Beitrag zum Such- und Rettungsdienst (SAR)	42
3.2.8 Beitrag zu sicherheitskritischen Diensten	43
3.2.9 Beitrag zu Weltraumwetterinformationen	44
3.2.10 Fahrplan für Galileo-Dienste	45
3.3 EGNOS-Dienste.....	46
3.3.1 Offener Dienst (OS) von EGNOS	47
3.3.2 Sicherheitskritischer Dienst (SoL) von EGNOS.....	48

3.3.3	EGNOS-Datenübertragungsdienst (EDAS)	51
3.4	Strategien und empfohlene Maßnahmen zu PNT in der EU	52
3.4.1	Resilienz kritischer europäischer Infrastrukturen	52
3.4.2	Europäischer Grüner Deal	54
3.4.3	Bemannte Luftfahrt	55
3.4.4	Unbemannte Luftfahrt	57
3.4.5	Navigation in der See- und der Binnenschifffahrt	59
3.4.6	Straßenverkehr	62
3.4.7	Schienenverkehr	64
3.4.8	Landwirtschaft	65
3.4.9	Standortgestützte Dienste	67
3.4.10	Suche und Rettung (search and rescue)	68
3.4.11	Kartierung und Vermessung	69
3.4.12	Präzise Zeitgebung und Synchronisierung (Finanzbereich, Stromnetze, Kommunikation)	71
3.4.13	Weltraumnutzer	72
3.4.14	Sicherheit und Verteidigung	73
3.4.15	Bedürfnisse von Nutzern im multimodalen Verkehr	74
3.4.16	Güterverkehr und Logistik	74
3.5	EU-Zusammenarbeit bei der Satellitennavigation	75
4	Vision für PNT in der EU	77
5	ANHANG A: PNT-Systeme	80
5.1	Globale Navigations satellitensysteme (GNSS)	80
5.1.1	Satellitennavigations systeme mit globaler Abdeckung	83
5.1.2	Satellitennavigations systeme mit regionaler Abdeckung	98
5.1.3	Augmentationssysteme	104
5.2	Konventionelle PNT-Systeme	109
5.2.1	NDB	109
5.2.2	PCL	109
5.2.3	DME	111
5.2.4	ILS	112
5.2.5	TACAN	114
5.2.6	Loran	114
5.2.7	Langwellige Zeit- und Frequenzverteilungssysteme	118
5.2.8	Atomuhren	119
5.3	Neue Technologien	121
5.3.1	White Rabbit (WR)	122
5.3.2	Zeitverteilung über Computernetze	123
5.3.3	Pseudoliten	124
5.3.4	PNT auf der Grundlage von 5G und Mobilfunknetzen	126

5.3.5	Ranging Mode (R-Mode)	128
5.3.6	Sichtnavigation	130
5.3.7	Mobilfunkgestützte Navigation	132
5.3.8	IMU-Koppelnavigation.....	134
5.3.9	Magnetnavigation	135
5.3.10	Erdnahe Umlaufbahn	136
5.3.11	Quantentechnologien.....	137
5.3.12	Pulsarsen-PNT.....	142
5.4	Zusammenfassung der Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken	144
6	ANHANG B: Resiliente PNT-Dienste	146
7	ANHANG C: Vorschriften und Normen	147
8	ANHANG D: PNT in der EU – wichtige Interessenträger	152
9	ANHANG E: EU-Bezugsrahmen	156
10	ANHANG F: ABKÜRZUNGEN	158

1 EINLEITUNG

Von **Ortung, Navigation und Zeitgebung (PNT¹)** abhängige Dienste sind seit Langem ein **Motor für das Wirtschaftswachstum**. Auch spielen sie eine zentrale Rolle in der Gesellschaft und in mehreren Sektoren und unterstützen kritische Infrastrukturen. Die Abhängigkeit von PNT-Diensten in zivilen und kommerziellen Anwendungen nimmt zu, aber auch in den Bereichen Verteidigung, Sicherheit und Schutz des menschlichen Lebens kommt ihnen immer mehr Bedeutung zu.

PNT-Dienste basieren heutzutage vorwiegend auf Funknavigationssystemen und insbesondere auf den Diensten der **globalen Satellitennavigationssysteme (GNSS)**. Die Nutzung von GNSS erstreckt sich auf zahlreiche Bereiche und beruht auf der Weiterentwicklung der bestehenden und der Entstehung neuer Konstellationen. Heute hängen rund **10 % des Bruttoinlandsprodukts der Europäischen Union (EU)** von der Nutzung von **GNSS-Diensten** ab, und die Trends deuten darauf hin, dass dieser Anteil weiter steigen wird. Insgesamt besteht für die Industrie in vielen Sektoren ein erhebliches Potenzial, GNSS-Dienste besser zu nutzen und von der überragenden Leistung von GNSS zu profitieren.

Terrestrischen PNT-Systemen kommt – entweder in Kombination mit oder unabhängig von GNSS – seit vielen Jahren eine wichtige Rolle zu. Die Verbreitung und die Weiterentwicklung von GNSS-Lösungen eröffnen jedoch die Möglichkeit, **bestimmte terrestrische PNT-Systeme außer Betrieb zu nehmen oder zu rationalisieren**. Dadurch würden Kosteneinsparungen bei der Errichtung, dem Betrieb und der Wartung der terrestrischen Infrastruktur möglich. Ferner würde das damit verbundene elektromagnetische Funkspektrum frei werden.

GNSS-Signale sind jedoch anfällig für natürliche und künstliche Störungen sowie für vorsätzliche Angriffe wie Jamming und Spoofing. Im Hinblick auf den Schutz kritischer Anwendungen oder kritischer Infrastrukturen ist daher allgemein anerkannt, dass GNSS, selbst in Multikonstellations- und Mehrfrequenzumgebungen, nicht die einzige Quelle für PNT-Informationen sein sollten. Für diese Anwendungen sollte eine **alternative PNT-Lösung** (als Backup, aber auch ergänzend) entwickelt und unterhalten werden, die nicht unbedingt auf Funkfrequenztechnologien basiert.

In der EU ist die Europäische Kommission für die Verwaltung der **europäischen globalen Satellitennavigationssysteme (EGNSS)** Galileo und EGNOS zuständig. **Galileo** ist das autonome GNSS der EU unter ziviler Kontrolle, das Nutzern weltweit modernste PNT-Dienste bietet. Die **Europäische Augmentation des geostationären Navigationssystems (EGNOS)** ist das Augmentationssystem der EU, durch das bestehende Navigationssignale, die vom Global Positioning System (GPS) und Galileo generiert werden, zukünftig verbessert werden sollen (Genauigkeit und Integrität). EGNOS ermöglicht die Nutzung von GNSS-Signalen für sicherheitskritische Anwendungen, insbesondere im Luftfahrtsektor.

Die Nutzung von **GNSS-Diensten** ist vielfältig. Um nur einige Beispiele zu nennen: GNSS-Dienste werden derzeit genutzt, um den Verkehrsfluss und die Fahrzeugeffizienz zu verbessern, die Verfolgung von Paketen und Sendungen durch Mehrwert bringende logistische Lösungen zu unterstützen, Katastrophenschutzmaßnahmen unter extremen Umgebungsbedingungen zu erleichtern, Rettungsaktionen zu beschleunigen und der Küstenwache und den Grenzkontrollbehörden wichtige Instrumente an die Hand zu geben. Überdies sind GNSS ein hervorragendes Instrument für die bei Finanztransaktionen erforderlichen Zeitstempel, für die wissenschaftliche Forschung in Bereichen wie Meteorologie, atmosphärische Wissenschaften, Geophysik und Geodäsie sowie für kritische Wirtschaftstätigkeiten.

Auch wenn bei der Nutzung von GNSS ein Anstieg zu beobachten ist, wird **noch nicht** in allen Marktsektoren **vollständig von GNSS-Diensten Gebrauch gemacht**. Darüber hinaus erfährt der Einsatz autonomer, unbemannter und ferngesteuerter Fahrzeuge ein exponentielles Wachstum. In Anbetracht der Rolle, die GNSS-Dienste in all diesen Marktsektoren spielen können, ist es umso wichtiger, dass die EU die Vorteile, die Galileo und EGNOS bieten können, in vollem Umfang ausschöpft und die Einführung dieser beiden Systeme in den einzelnen Sektoren erleichtert.

¹ Die Abkürzungen, einschließlich der in den Abbildungen und Tabellen verwendeten, sind in [ANHANG F: ABKÜRZUNGEN](#) erläutert.

1.1 Kontext des Europäischen Funknavigationsplans

Der Kontext zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Fassung des Europäischen Funknavigationsplans (ERNP) – das Jahr 2023 – spielt eine wichtige Rolle in Bezug auf den Anspruch, den Umfang und die Ziele dieser Fassung des ERNP. Die wichtigsten Kontextelemente für diese Ausgabe des ERNP sind folgende:

1. In der 2016 veröffentlichten [Weltraumstrategie für Europa](#) wurde die Europäische Kommission aufgefordert, „einen Europäischen Funknavigationsplan bereit[zu]stellen, damit Anwendungen, die sich des globalen Satellitennavigationssystems bedienen, besser in sektorielle Politikbereiche Eingang finden“. Auf dieser Grundlage wurde 2018 eine [erste Fassung des ERNP](#) veröffentlicht.

Mit dem vorliegenden Dokument, der zweiten Fassung des ERNP, wird nach wie vor das vorrangige Ziel verfolgt, „die Einführung von Galileo- und EGNOS-Anwendungen in verschiedenen Marktbereichen zu erleichtern“.

2. Der **Europäische Rechnungshof** veröffentlichte **2021** einen [Sonderbericht](#) zu den EU-Weltraumprogrammen Galileo und Copernicus und zur Notwendigkeit, der Nutzung der von diesen beiden Systemen bereitgestellten Daten zusätzlichen Schub zu verleihen.

In Buchstabe c der Empfehlung 4 „Bessere Nutzung des Regelungsrahmens zur Förderung der Nutzung von EU-Weltraumdiensten“ wird die Europäische Kommission aufgefordert, „für jedes einschlägige Marktsegment, in dem die Nutzung von Galileo durch eine Regulierung oder Normung gefördert werden kann, Zeitpläne fest[zul]egen und deren Einhaltung [zu] überwachen“. Zweck dieser Fassung des ERNP ist somit die Erfüllung dieser Empfehlung.

3. [Vorwiegend GNSS-gestützte PNT-Dienste gewinnen zunehmend an Bedeutung](#) für Wirtschaft und Gesellschaft. Dies betrifft nicht nur [Ortungs- und Navigations-](#), sondern auch [Zeitgebungsdienste](#) (wichtig für den Finanzbereich, Stromnetze, Kommunikation usw.). Dieser Trend wird sich in den kommenden Jahren noch verstärken.

Weltraumdienste und -daten sind ein **wichtiger Wegbereiter für den digitalen Wandel** der Wirtschaft und Gesellschaft und ermöglichen digitale Innovationen wie autonome Fahrzeuge, intelligente Lösungen und 5G/6G-Mobilfunknetze.

4. Aufgrund der relativ geringen Leistung der GNSS-Signale **kommt es vermehrt zu Unterbrechungen der GNSS-Dienste**. Einfache, kostengünstige Geräte können absichtliche Störungen der von GNSS genutzten Frequenzen verursachen, um den Empfang von GNSS-Signalen zu stören („Jamming“), und Störsender mit wesentlich höherer Leistung können Auswirkungen auf einen viel größeren Bereich haben. GNSS-Dienste können auch von „[Spoofing](#)“ betroffen sein, wobei Falschinformationen zu Fehlern in der PNT-Lösung führen. Schließlich können GNSS-Dienste aufgrund von Weltraumwetterereignissen oder Systemausfällen schwerwiegende Leistungseinbußen erleiden.

Gleichzeitig **wächst das Bewusstsein für GNSS-Störungen, und es werden Maßnahmen zur Verbesserung der Resilienz von GNSS-Signalen vorgeschlagen** (z. B. [Zusammenarbeit zwischen der Europäischen Union und den Vereinigten Staaten im Bereich der Satellitennavigation mit Schwerpunkt auf der Resilienz der Dienste](#)).

In dieser Fassung des ERNP wird erörtert, wie die Resilienz von GNSS-Diensten erhöht wird (z. B. durch neue Galileo-Dienste einschließlich Authentifizierung) und wie bei GNSS-Störungen PNT-Dienste über andere Technologien bereitgestellt werden könnten.

5. **PNT-Dienste sind für neue Anwendungen von grundlegender Bedeutung, und bestimmte neue Technologien werden auch PNT-Dienste erbringen.**

Beispiele für ersteres sind der Einsatz von **GNSS bei der Ortung** von [Multikonstellationen in der erdnahen Umlaufbahn \(LEO\)](#) (erforderlich für die Steuerung der Konstellation) oder von [Objekten im Weltraum](#) (erforderlich für ein Weltraumverkehrsmanagementsystem) oder der Einsatz von **GNSS für 5G- und 6G-Technologien** mit einer Genauigkeit der weltweiten **Zeitbestimmung von unter einer Mikrosekunde**. Beispiele für letzteres sind **LEO-Konstellationen, die darauf ausgerichtet sind, PNT-Dienste bereitzustellen**, und künftige Kapazitäten von **5G- und 6G-Netzen zur Bereitstellung genauer PNT-Dienste**.

In dieser Fassung des ERNP wird die neue Technologie im Zusammenhang mit PNT-Diensten erörtert.

6. **Strategische Autonomie bei PNT:** Strategische Autonomie ist ein [von der Kommission von der Leyen festgelegtes politisches Ziel der Europäischen Union](#). Die EU unternimmt Schritte zur Stärkung der europäischen strategischen Autonomie in verschiedenen Bereichen, z. B. der [wirtschaftlichen und finanziellen strategischen Autonomie der EU](#) oder des [Strategischen Kompasses für Sicherheit und](#)

[Verteidigung](#). Im Strategischen Kompass wird die Annahme einer **EU-Weltraumstrategie für Sicherheit und Verteidigung** bis Ende 2023 gefordert.

7. Nicht zuletzt die [Verordnung \(EU\) 2021/696 zur Einrichtung des EU-Weltraumprogramms](#), in der die Dienste der europäischen Satellitennavigationssysteme festgelegt sind, und die [Prioritäten der Europäischen Kommission für 2019–2024](#), zu denen PNT-Dienste und insbesondere GNSS einen wichtigen Beitrag leisten (z. B. europäischer Grüner Deal, ein Europa für das digitale Zeitalter).

1.2 Zweck des ERNP

In Anbetracht der vorstehenden Kontextinformationen wird mit dieser Ausgabe des ERNP folgender Zweck verfolgt:

1. **Bereitstellung einschlägiger Informationen über PNT-Systeme und -Dienste**, ihre Nutzung, typische Leistung, Stärken, Schwächen, Entwicklungen, Trends, Herausforderungen, Chancen usw.
Mit dieser Fassung des ERNP sollen synthetische und zusammengefasste Informationen über PNT-Systeme und -Dienste bereitgestellt und für detailliertere Informationen auf öffentliche Quellen verwiesen werden;
2. **Erleichterung der Nutzung der Dienste der europäischen GNSS (Galileo und EGNOS)** durch:
 - Bereitstellung detaillierter Informationen über aktuelle und künftige europäische GNSS-Dienste und deren Mehrwert im Vergleich zu anderen PNT/GNSS-Diensten;
 - Empfehlung von sektorspezifischen Maßnahmen zur Nutzung der EGNSS in den verschiedenen Markt Bereichen, die auf EU-Ebene umzusetzen sind (z. B. Rechtsvorschriften, Normen);
3. Sensibilisierung und Empfehlung von Maßnahmen zur **Stärkung der Resilienz von PNT-Diensten in der EU**.

1.3 Anwendungsbereich des ERNP

Folgende Aspekte fallen in den Anwendungsbereich der aktuellen Ausgabe des ERNP:

1. relevanteste **weltraumgestützte und terrestrische PNT-Systeme und -Dienste**, einschließlich solcher, die nicht auf Funkfrequenzen beruhen;
2. **derzeitige Nutzung und voraussichtliche künftige Nutzung** von PNT-Systemen und -Diensten;
3. **neue PNT-Systeme und -Dienste** (LEO, 5G, Sensorfusion usw.), soweit sie hinsichtlich PNT eine wichtige Rolle spielen.

Eine Beschreibung der Systeme und Technologien, die nicht in erster Linie für Ortung, Navigation oder Zeitgebung verwendet werden, z. B. Überwachungssysteme (Radare, Kameras usw.), fällt nicht in den Anwendungsbereich der aktuellen Fassung des ERNP.

1.4 Ziele des ERNP

In Anbetracht des in den vorangegangenen Abschnitten dargelegten Kontexts, Zwecks und Anwendungsbereichs werden mit der aktuellen Fassung des ERNP folgende Ziele verfolgt:

1. **Einführung von PNT** und Hervorhebung der wichtigen **Rolle dieses Tätigkeitsbereichs in der Gesellschaft**, der damit verbundenen **wirtschaftlichen Vorteile** und der **potenziellen Auswirkungen von PNT-Störungen**, insbesondere auf kritische Infrastrukturen;
2. Überblick über die **Bedürfnisse der PNT-Nutzer** in den verschiedenen Marktsektoren;
3. Erläuterung der **Herausforderungen in Bezug auf PNT/GNSS** sowie der **Trends und Chancen** für PNT-/GNSS-Dienste;
4. Überblick über die **wichtigsten PNT-Systeme und -Dienste**, einschließlich konventioneller, GNSS- und neuer Systeme, sowie ihre derzeitige und künftige Nutzung und ihre typische Leistung, Entwicklungen sowie Stärken und Schwächen; Bereitstellung von Informationen über die **Interoperabilität und Kompatibilität** von PNT-Systemen und -Diensten;
5. Überblick über die einschlägigen **internationalen politischen Maßnahmen** im Zusammenhang mit PNT;

6. Bereitstellung **detaillierter Informationen über die europäischen GNSS-Dienste** (Galileo und EGNOS) unter Hervorhebung ihres Mehrwerts gegenüber anderen GNSS-Diensten und unter Einbeziehung geplanter künftiger Dienste;
7. Erläuterung der **politischen Maßnahmen der Europäischen Union** im Zusammenhang mit PNT, einschließlich der laufenden Maßnahmen zur Erleichterung des Eingangs der europäischen GNSS in Politikbereiche der EU;
8. gegebenenfalls Aussprechen von Empfehlungen für die einzelnen Marktsektoren zum Ergreifen von
 - **Maßnahmen zur Erleichterung der Einführung der EGNSS**, einschließlich Vorschriften und Normen;
 - **Maßnahmen zur Stärkung der Resilienz von PNT-Diensten**;
9. Aufstellen einer **mittelfristigen Vision** für die Weiterentwicklung von PNT in der Europäischen Union.

1.5 Struktur des ERNP

Die aktuelle Fassung des ERNP ist wie folgt aufgebaut:

- Abschnitt 1 enthält die Einleitung sowie den Kontext, den Zweck, den Anwendungsbereich, die Ziele und die Struktur des Dokuments.
- Abschnitt 2 befasst sich mit der PNT-Landschaft, wobei die Ziele 1 bis 5 behandelt werden, und enthält eine Einführung in PNT, die Rolle dieses Tätigkeitsbereichs in der Gesellschaft, die wirtschaftlichen Vorteile, die Bedürfnisse der PNT-Nutzer in den einzelnen Marktsegmenten sowie die Herausforderungen, Trends und Chancen. Zudem wird ein Überblick über die wichtigsten PNT-Systeme und -Dienste, ihre Interoperabilität und Kompatibilität sowie die wichtigsten internationalen politischen Maßnahmen im Zusammenhang mit PNT geliefert.
- In Abschnitt 3 wird PNT in der EU erörtert, wobei die Ziele 6 bis 8 behandelt werden, und auf Folgendes eingegangen: das EU-Weltraumprogramm, die wichtigsten von den europäischen GNSS Galileo und EGNOS bereitgestellten Dienste und die aktuellen politischen Maßnahmen der EU im Zusammenhang mit PNT für die einzelnen Marktsegmente sowie die zusätzlichen Maßnahmen zur Erleichterung der Nutzung von Galileo- und EGNOS-Diensten und/oder zur Erhöhung der Resilienz der PNT-Dienste. Gegenstand dieses Abschnitts sind zudem die Kooperationsmaßnahmen der EU in Bezug auf GNSS.
- Abschnitt 4 liefert einen mittelfristigen Überblick über PNT in der EU, wobei Ziel 9 behandelt wird.
- Die verschiedenen Anhänge enthalten detaillierte Informationen zu den einzelnen Aspekten, die in dem Dokument beschrieben werden.

1.6 Anmerkungen zum ERNP

Anmerkungen zum ERNP sind willkommen und werden bei der nächsten Aktualisierung des Dokuments berücksichtigt: <mailto:DEFIS-GNSS-ERNP@ec.europa.eu>.

2 PNT-LANDSCHAFT

In diesem Abschnitt wird die PNT-Landschaft erörtert und es werden die in Abschnitt [1.4](#) vorgestellten Ziele 1 bis 5 behandelt. Der Leser erhält relevante zusammenfassende Informationen über PNT-Systeme und -Dienste, die Bedürfnisse der Nutzer, die Herausforderungen, Trends und Chancen sowie die internationalen politischen Maßnahmen im Zusammenhang mit PNT. Dieser Abschnitt bildet die Grundlage für den folgenden Abschnitt, in dem es um PNT in der EU geht.

Der Abschnitt enthält Folgendes:

- eine Einführung in PNT (Abschnitt [2.1](#));
- eine Beschreibung der Rolle von PNT/GNSS in der Gesellschaft (Abschnitt [2.2](#));
- eine Bewertung der wirtschaftlichen Vorteile von PNT/GNSS (Abschnitt [2.3](#));
- eine Zusammenfassung der Bedürfnisse der Nutzer (Abschnitt [2.4](#));
- eine Beschreibung der Herausforderungen in Bezug auf PNT/GNSS (Abschnitt [2.5](#));
- eine Beschreibung der Trends und Chancen in Bezug auf PNT/GNSS (Abschnitt [2.6](#));
- eine Zusammenfassung der wichtigsten PNT-Systeme und -Dienste (Abschnitt [2.7](#));
- eine Beschreibung der Bedeutung von Interoperabilität und Kompatibilität (Abschnitt [2.8](#));
- eine Zusammenfassung der wichtigsten internationalen politischen Maßnahmen im Zusammenhang mit PNT (Abschnitt [2.9](#)).

Der Abschnitt soll einen Überblick über die oben genannten Themen geben und der Öffentlichkeit gleichzeitig Anhaltspunkte für weitere detaillierte Informationen liefern.

2.1 Einführung in PNT

PNT (Ortung, Navigation und Zeitgebung) bezeichnet eine Kombination aus drei unterschiedlichen, aber integralen Fähigkeiten:

- Ortung ist die Fähigkeit, die Position und die Ausrichtung in zwei oder drei Dimensionen zu bestimmen. Diese Position bezieht sich auf lokale oder meist globale Koordinatensysteme wie den terrestrischen Bezugsrahmen für Galileo (Galileo Terrestrial Reference Frame, GTRF), den europäischen terrestrischen Bezugsrahmen (European Terrestrial Reference Frame, ETRF) oder den internationalen terrestrischen Bezugsrahmen (International Terrestrial Reference Frame, ITRF).
- Navigation ist die Fähigkeit, einen Pfad zwischen aktueller und gewünschter Position (relativ oder absolut) zu bestimmen und diesen Pfad durch Korrekturen von Kurs, Ausrichtung und Geschwindigkeit zu navigieren.
- Zeitgebung ist die Fähigkeit, die Zeit entweder lokal oder global zu erfassen und beizubehalten (z. B. koordinierte Weltzeit (UTC)). Dies schließt auch Zeitübertragungsdienste ein.

Das Hauptmerkmal moderner PNT ist die Fähigkeit, **sowohl die Position als auch die Zeit im globalen Bezugsrahmen** (GTRF, ETRF, ITRF usw. für die Position und UTC für die Zeit) überall auf der Welt **genau zu bestimmen und beizubehalten**, wobei zu beachten ist, dass verschiedene PNT-Systeme unterschiedliche geografische Reichweiten haben, von global bis regional und lokal.

Im gesamten Dokument werden die folgenden Schlüsselbegriffe verwendet:

- **Indikatoren für die Nutzerleistung**, die in der Regel bei der Bewertung der Leistung der PNT-Dienste verwendet werden:
 - Verfügbarkeit: der prozentuale Anteil der Zeit, in der die Ortungs-, Navigations- oder Zeitgebungslösung vom Nutzer berechnet werden kann. Die Werte sind je nach der spezifischen Anwendung und den genutzten Diensten starken Schwankungen unterworfen, liegen aber in der Regel zwischen 95 % und 99,9 %;
 - Genauigkeit: der Unterschied zwischen tatsächlicher und berechneter Nutzerlösung (für Position oder Zeit);
 - Integrität: das Maß an Vertrauen, das in die Korrektheit der vom Empfänger gelieferten Positions- oder Zeitschätzung gesetzt werden kann;
 - Kontinuität: die Fähigkeit, die erforderlichen Leistungen im Betrieb ohne Unterbrechung zu erbringen, sobald der Betrieb begonnen hat.
- **Sonstige relevante Leistungsindikatoren** für PNT-Empfänger:
 - Zeit bis zur ersten Positionsbestimmung (TTFF): ein Maß für die Leistung eines Empfängers, das die Zeit zwischen Aktivierung und Ausgabe einer Position innerhalb der geforderten Genauigkeitsgrenzen umfasst;
 - Robustheit gegenüber Spoofing und Jamming: ein eher qualitativer als quantitativer Parameter, der von der Art des Angriffs oder der Störung abhängt, die der Empfänger abwehren kann;
 - Authentifizierung: die Fähigkeit des Systems, den Nutzern gegenüber zu versichern, dass sie Signale und/oder Daten aus einer vertrauenswürdigen Quelle verwenden, sodass sensible Anwendungen vor Spoofing-Bedrohungen geschützt werden.

2.2 Rolle von PNT in der Gesellschaft

Angesichts globaler Herausforderungen wie der digitalen Revolution, des Klimawandels und globaler Pandemien sind Wirtschaft und Gesellschaft mehr denn je auf innovative Lösungen angewiesen, die den Umgang mit Big Data, die Eindämmung von Naturkatastrophen und vom Menschen verursachte Katastrophen sowie von Krankheiten und die Stärkung einer globalen Versorgungskette ermöglichen, die die Grundlage unseres täglichen Lebens bildet. Durch Tausende von Anwendungen, die im Entstehen begriffen sind oder bereits von Bürgerinnen und Bürgern, Regierungen, internationalen Organisationen, Nichtregierungsorganisationen, der Industrie, der Wissenschaft und Forschern auf der ganzen Welt genutzt werden, **spielen PNT und GNSS eine entscheidende Rolle, wenn es darum geht, zu diesen innovativen Lösungen beizutragen** (Agentur der Europäischen Union für das Weltraumprogramm (EUSPA): [EO and GNSS Market Report 2022](#) (Marktbericht 2022 der EUSPA zu Erdbeobachtung und GNSS)). Die Gesamtzahl der installierten GNSS-Geräte wird von 6,5 Mrd. Einheiten im Jahr 2021 auf 10,6 Mrd. Einheiten im Jahr 2031 steigen. Der Löwenanteil entfällt dabei auf das Segment Verbraucherlösungen.

Neben diesen marktbedingten Kräften spielt auch die ökologische Nachhaltigkeit eine wichtige Rolle. Der **europäische Grüne Deal** zielt auf eine klimaresiliente Gesellschaft, zu einem Zeitpunkt, da einige europäische Volkswirtschaften noch stark von Kohle und fossilen Brennstoffen abhängig sind. Diese Initiative, die sämtliche Aspekte der Gesellschaft und der Wirtschaft sowie sämtliche Politikbereiche umfasst, gilt als eine der folgenreichsten legislativen Anstrengungen in der Geschichte der Europäischen Union. Das wohl bekannteste Ziel des europäischen Grünen Deals besteht darin, die CO₂-Nettoemissionen bis 2050 auf null und bis 2030 bereits um 55 % (gegenüber dem Stand von 1990) zu senken. Und obwohl Europa seit den 1990er Jahren seine Emissionen bereits um ein Viertel reduziert hat, reicht dies noch nicht aus, um die für 2030 und 2050 gesteckten Ziele zu erreichen. Durch den Einsatz von PNT beispielsweise in der intelligenten Landwirtschaft sowie zur Verringerung der Emissionen im Straßen-, See- und Luftverkehr durch Routenoptimierung **leisten EU-Weltraumdaten und -Dienste einen Beitrag zum europäischen Grünen Deal**. Darüber hinaus stellt die EU Finanzmittel und Unterstützung für Unternehmer bereit, die Copernicus- und Galileo-Daten nutzen, was in erster Linie zur Finanzierung „grüner“ Anwendungen führt und gleichzeitig die entsprechenden Märkte stimuliert.

Eine weitere wichtige Triebkraft für unsere Gesellschaft ist der **digitale Wandel**, den Europa bis zum Jahr 2030 durchlaufen soll. **Geodaten profilieren sich als Integrator**, der den Weg für eine gemeinsame, offene und innovative digitale Infrastruktur ebnet, und nicht nur als einfache Möglichkeit zur Punktpositionierung für Anwendungen. Die auf künstlicher Intelligenz (KI) basierende Analyse von Big Data verspricht eine Revolution der Nutzung von Satellitendaten für Aufgaben wie die Quantifizierung der globalen Urbanisierung, die Ernährung der Weltbevölkerung sowie die Verbesserung des Managements von Naturgefahren oder Pandemien.

Mehr Satelliten und mehr Frequenzen werden eine Fülle von Vorteilen mit sich bringen. Für trägerphasenbasierte Algorithmen (Echtzeit-Kinematik (RTK)), präzise Punktpositionierung (PPP) und PPP-RTK) sind bereits Zweifrequenzen erforderlich, und Dreifrequenzen können die Leistung der Algorithmen zur Auflösung der Phasenmehrdeutigkeit in Bezug auf den maximalen Abstand zu einer Referenzstation (für RTK und Netzwerk-RTK), die Zuverlässigkeit der Lösung und die für die Gewinnung und Validierung dieser Lösung erforderliche Zeit weiter verbessern.

Einer der wichtigsten Aspekte, die es zu berücksichtigen gilt, sind jedoch **Cyberangriffe, einschließlich der Funkfrequenzstörung (RFI) von GNSS-Signalen**. Es werden immer mehr Vorfälle von GNSS-Jamming gemeldet, von denen die meisten durch sogenannte „Datenschutzvorrichtungen“ verursacht werden (die in den meisten Ländern illegal sind). GNSS-Spoofing-Vorfälle sind zwar seltener, allerdings ist auch hier eine Zunahme zu beobachten. GNSS-Dienste sollten auf diese Bedrohungen reagieren können, indem sie unbeschadet anderer Techniken Überwachungs- und **Authentifizierungsfunktionen** als notwendigen Baustein der Gesamtsicherheit der Anwendung beinhalten.

Schließlich ist es von grundlegender Bedeutung, PNT-Dienste unter dem Gesichtspunkt des Systems **„Fusion von Systemensoren“** – dem Paradigma für autonomes Fahren und andere anspruchsvolle Anwendungen – zu betrachten, um die Integrität, Verfügbarkeit und Genauigkeit des Dienstes zu erhöhen. In der Tat wird davon ausgegangen, dass die künftige Weiterentwicklung auf der Ebene der Wirksamkeit von Sensorfusionstechniken stattfinden wird. Die Vision ist, dass nicht eine einzelne Technologie das „primäre“ PNT-Mittel ist, sondern eine Kombination aus allen relevanten bestehenden PNT-Technologien.

2.3 Wirtschaftliche Vorteile von PNT/GNSS

PNT und GNSS sind für Millionen von Menschen in ganz Europa **zu allgegenwärtigen Einrichtungen des täglichen Lebens geworden**. Viele Aspekte unseres täglichen Lebens werden durch unsichtbare GNSS-Signale aus dem Weltraum erleichtert – von der Überprüfung der Verkehrslage vor der morgendlichen Fahrt zur Arbeit bis zum Anschauen unserer Lieblingssendungen vor dem Schlafengehen.

Die Analyse der EUSPA zu den sozioökonomischen Vorteilen von GNSS² ergab für den Analysezeitraum (1999–2027) **wirtschaftliche Vorteile in Höhe von insgesamt 2 Bio. EUR** im europäischen Gebiet (definiert als die EU-27 plus das Vereinigte Königreich (UK), Norwegen und die Schweiz). Darüber hinaus waren im selben Zeitraum schätzungsweise mehr als 100 000 gut bezahlte und hoch qualifizierte Arbeitsplätze in den vor- und nachgelagerten Industrien in ganz Europa auf GNSS zurückzuführen.

Berichte mit Schwerpunkt auf dem [Vereinigten Königreich](#) und den [Vereinigten Staaten](#) (USA) enthalten Schätzungen sowohl in Bezug auf die ökonomischen Vorteile von GNSS für die betreffende Volkswirtschaft als auch die zu erwartenden wirtschaftlichen Verluste infolge eines vorübergehenden Ausfalls von GNSS. Bei den Verlustschätzungen ist der relevante Vergleichsmaßstab bei jeder Anwendung die Technologie, die im Falle eines Ausfalls für den sofortigen Einsatz zur Verfügung steht (und nicht jede theoretisch mögliche Technologie, wie bei den Vorteilen), was zu erheblichen Unterschieden bei den Schätzungen der Verluste und der Vorteile führt. Die Ergebnisse der Studien für das Vereinigte Königreich, die USA und die EU sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 1 – Zusammenfassung der gemeldeten wirtschaftlichen Vorteile und Verluste

Land, für das die Studie durchgeführt wurde	Wirtschaftliche Vorteile (jährlich)	Wirtschaftlicher Verlust	Wirtschaftlicher Verlust (pro Tag)
UK	6,7 Mrd. GBP	5,2 Mrd. GBP (5 Tage)	1,0 Mrd. GBP
USA	300 Mrd. USD	30,3 Mrd. USD (30 Tage)	1,0 Mrd. USD
Europa	69,0 Mrd. EUR	Keine Angaben	Keine Angaben

Die Diskrepanzen bei den gemeldeten Werten deuten darauf hin, dass eine **sorgfältige Analyse** der europäischen Staaten erforderlich ist, **bevor die Ergebnisse auf den europäischen Kontext ausgeweitet oder verallgemeinert werden können**. Zu den wichtigen Unterschieden, die zu berücksichtigen wären, gehören geografische Unterschiede, z. B. Bevölkerungsdichte, kulturelle Unterschiede, die sich in der Einstellung der Bevölkerung und den rechtlichen Rahmenbedingungen widerspiegeln, Unterschiede in der Methodik der Studie, z. B. Umfang der Analyse (d. h. berücksichtigte Wirtschaftssektoren oder in die Analyse einbezogene Satellitenkonstellationen) und Wahl der kontrafaktischen Szenarien, Unterschiede in der Infrastruktur mit Auswirkungen auf die Resilienz oder die verfügbare Technologie sowie Unterschiede in Bezug auf den Zeitraum, die sich auf die geschätzten Gesamtauswirkungen und die gemittelten „Tageswerte“ auswirken.

Es sei darauf hingewiesen, dass im [Bericht der RAND Corporation](#) argumentiert wird, dass die **Kosten eines GNSS-Ausfalls** – möglicherweise um ein Vielfaches – **zu hoch angesetzt sein könnten**, da zahlreiche Branchen bereits über betriebsbereite Backups verfügen.

Zusammenfassend und trotz der vorstehend dargelegten Differenzen und Meinungen können wir bestätigen, dass GNSS jährlich mit **Hundertern Milliarden Euro** zum weltweiten **Wohlstand** beitragen, während ein GNSS-Ausfall von mehreren Tagen einen **wirtschaftlichen Verlust** von bis zu mehreren **Milliarden Euro pro Tag** weltweit bedeuten könnte.

² Um die wirtschaftlichen Vorteile von GNSS in Europa zu bewerten, wurde im Rahmen der Studie die Qualität der durch GNSS ermöglichten Dienste mit einem kontrafaktischen Szenario verglichen, in dem stattdessen die nächstbeste technologisch machbare Lösung entwickelt worden wäre. In vielen Fällen wurden diese hypothetischen Lösungen nicht in dem erforderlichen Umfang entwickelt, was größtenteils auf die niedrigen Kosten, die hohe Leistung und die breite Verfügbarkeit von GNSS zurückzuführen ist.









2.4 Bedürfnisse der PNT-Nutzer

Die Bedürfnisse der Nutzer von PNT-Diensten sind in den [Berichten der EUSPA über die Nutzerbedürfnisse und -anforderungen](#) umfassend beschrieben. Diese Berichte enthalten einen Marktüberblick, Trends, Analysen der Nutzeranforderungen und Spezifikationen für verschiedene Marktsegmente.

Darüber hinaus enthält der [Marktbericht 2022 der EUSPA zu Erdbeobachtung und GNSS](#) eine detaillierte Beschreibung der Nutzung von PNT-/GNSS-Diensten in verschiedenen Marktsegmenten sowie einen Überblick über die wichtigsten Anwendungen.

Andere Nicht-EU-Dokumente wie der US-amerikanische Bericht [Economic Benefits of the Global Positioning System \(GPS\)](#) (Wirtschaftliche Vorteile des Global Positioning System (GPS)) und der US-amerikanische [Federal Radionavigation Plan](#) (Funknavigationsplan, FRP) enthalten ähnliche Informationen.

[Figure 1](#) liefert einen Überblick über die Rolle und die Entwicklung von GNSS in verschiedenen Marktsegmenten.

	Agriculture – New technologies are pushing the Agriculture sector to new frontiers. GNSS is considered a key driver and enabler for these evolutions, ranging from traditional farming applications to Internet-of-Things, blockchain, Agri-fin tech and value chain management. GNSS-enabled livestock wearables are emerging as an exciting trend which is improving animal welfare.
	Aviation and Drones – Global air traffic took a huge hit due to COVID-19 – airlines responded with consolidation of fleets, and older aircraft prioritised for retirement. Meanwhile, standards evolution in navigation and surveillance presses ahead, enhanced by growing demand from increasingly sophisticated drone operations.
	Biodiversity, Ecosystems and Natural Capital – In the domain of biodiversity, ecosystems and natural capital, GNSS-beacons are used to geo-locate animals for the purposes of monitoring migrations, habitats, and behaviours. These are becoming more accurate and additional biodiversity applications are emerging (e.g. botanical mapping).
	Climate Services – GNSS has limited but important application in the climate services domain. The technology supports a range of geodetic applications that measure properties of the earth (magnetic field, atmosphere) with direct impact on the Earth's climate. GNSS is expected to have an increasing role in the growing market of climate modelling.
	Consumer Solutions, Tourism and Health – GNSS finds increasing use in facilitating our daily lives. From context-aware apps monitoring peak visit times to contactless deliveries and personal fitness apps (powered by wearable devices), navigation and positioning information plays a vital role.
	Emergency Management and Humanitarian Aid – Estimated to save 2,000 lives a year, the new MEOSAR system of the GNSS-based COSPAS-SARSAT programme relies on the proper use of GNSS-enabled Search and Rescue beacons. On the field, GNSS is a valuable tool to coordinate emergency response and humanitarian aid.
	Energy and Raw Materials – Monitoring and management of electricity utility grids heavily rely on GNSS timing and synchronisation, allowing the balance supply and demand and ensuring safe operations. In the domain of raw materials, the increased uptake of augmented GNSS supports site selection, planning and monitoring, as well as mining surveillance activities and mining machinery guidance.
	Fisheries and Aquaculture – GNSS plays a vital role for the efficient and effective monitoring of fisheries activities through applications such as VMS and AIS. As the focus on the sustainability of these activities grows, agriculture lands diminish and food demand rises, GNSS applications are themselves seeing higher demand.



Forestry – GNSS is becoming an extremely valuable tool in monitoring and maintaining the sustainability of our forests. Besides precision forestry management, a key emerging trend is the use of GNSS-enabled UAVs and tracking devices help ensure the health of our trees and the efficiency of our timber supply chains.



Infrastructure – GNSS contributes to the proper functioning of Infrastructures operations. It allows a safe and on-time completion of construction work through the provision of high accuracy services and supports the synchronisation of telecommunication networks. With the transition towards 5G, the GNSS Timing & Synchronisation function is expected to play an increasingly critical role in telecommunication network operations.



Insurance and Finance – The financial world relies on GNSS timing and synchronisation for the accurate timestamping of financial transactions. Insurers, on the other hand, are turning towards GNSS-enabled UAVs for a more accurate and faster claim assessment.



Maritime and Inland Waterways – GNSS has shown its versatility providing data insights to monitor global shipping and port activities during the pandemic. Looking to the future, with automation and 5G expected to bring technological advancements in ports, GNSS will continue expanding its role beyond merely providing navigation information.



Rail – GNSS is becoming one of the cornerstones for non-safety related applications (e.g. asset management), whilst future adoption of GNSS for safety-related applications, including Enhanced Command & Control Systems, is expected to increase railway network capacity, decrease operational costs and foster new train operations. Thanks to GNSS taking part in digitalisation, Rail is becoming safer, more efficient and more attractive.



Road and Automotive – Despite the global slowdown of car production and sales, regulation for safer and autonomous vehicles is on track, with GNSS doubtless playing a key role. With In Vehicle Systems remaining the dominant source of Positioning, Navigation and Timing, it is moreover clear that public transport is increasingly adopting GNSS to improve its services.



Space – From using real-time GNSS data for absolute and relative spacecraft navigation, to deriving Earth Observation measurements from it, GNSS has also proven its worth for in-space applications. Driven by the NewSpace paradigm, the diversification and proliferation of space users leads to an increasing need for spaceborne GNSS-based solutions.



Urban Development and Cultural Heritage – In this field, GNSS-based solutions are used, in conjunction with EO, to accurately survey and map urban areas and to build advanced 3D models of the built environment. With more than 56% of the population already living in urban areas and this number expected to increase, digital solutions powered by GNSS will be needed more than ever support sustainable growth.

Abbildung 1 – Rolle und wichtige Entwicklungen von GNSS in verschiedenen Marktsegmenten (Quelle: [Marktbericht 2022 der EUSPA zu Erdbeobachtung und GNSS](#))

2.5 Herausforderungen in Bezug auf PNT/GNSS

GNSS-Signale, die mit sehr geringer Leistung empfangen werden, sind **anfällig** für Funkstörungen (RFI) und natürliche Phänomene (z. B. ionosphärische Szintillationen), die zu einer Unterbrechung der GNSS-Dienste führen können. Solche Phänomene können **beabsichtigt (Jamming- und Spoofing-Angriffe)**, aber auch **unbeabsichtigt** sein (Störstrahlung anderer Funkgeräte, GNSS-Mehrwegeausbreitung).

Obwohl die Schwachstellen von GNSS inzwischen allgemein anerkannt sind, geht das **Vertrauen** in PNT-basierte Systeme oder Anwendungen über GNSS hinaus und muss die gesamte End-to-End-Anwendung einschließen, die nur so sicher ist wie ihre schwächste Komponente. Für böswillige Akteure, die einen Angriff beabsichtigen, sind GNSS nicht unbedingt das einfachste Ziel. Es könnte einfacher oder billiger sein, den Ausgang eines Empfängers zu hacken, um eine falsche Position auszugeben, als einen Spoofing-Angriff auf die eingehenden GNSS-Signale auszuüben. So geben beispielsweise automatische Identifikationssysteme (AIS) im Seeverkehr Positionen aus, die Tausende von Kilometern von der tatsächlichen Position des Schiffes entfernt sind, was heutzutage für jeden Spoofer außer Reichweite ist.

Die Internationale Fernmeldeunion veröffentlichte im Juli 2022 das [Rundschreiben CR/488](#) zur Vermeidung funktechnischer Störungen von Empfängern von satellitengestützten Funknavigationsdiensten. In der [Entschließung A41-8C der Versammlung der Internationalen Zivilluftfahrt-Organisation \(ICAO\)](#) werden die Staaten aufgefordert, Maßnahmen zu ergreifen, um die Resilienz von Systemen und Diensten für Kommunikation/Navigation/Überwachung (Communication/Navigation/Surveillance, CNS) bzw. für das Flugverkehrsmanagement(ATM) zu gewährleisten. Zudem wird die ICAO aufgefordert, für resilientere Ortungs- und Zeitgebungsdienste zu sorgen, und die Normungsgremien und die Industrie werden ermutigt, geeignete Fähigkeiten zur Erkennung und Abschwächung von Störungen sowie zur Meldung von Störungen für die bodeneigenen und satelliten- bzw. bodengestützten CNS-Systemkomponenten zu entwickeln.

In der [Richtlinie 2014/53/EU über Funkanlagen](#) sind die grundlegenden Anforderungen festgelegt, die PNT-basierte Geräte erfüllen müssen, um in der EU in Verkehr gebracht zu werden. Die Funkanlagenrichtlinie ist der Rechtsakt der EU, durch den die Hersteller von Funkanlagen, einschließlich GNSS-Sendern und -Empfängern, zur effektiven Nutzung von Funkfrequenzen verpflichtet sind. Anders ausgedrückt: Wenn Produkte der Funkanlagenrichtlinie entsprechen, werden funktechnische Störungen, die die Funknavigationsdienste beeinträchtigen können, vermieden. Die Verwendung harmonisierter Normen zur Unterstützung der Funkanlagenrichtlinie, die von den [europäischen Normungsorganisationen](#) entwickelt wurden, begründet die Vermutung der Konformität mit den rechtlichen Anforderungen.

Zusätzlich zu den in den harmonisierten Normen festgelegten Maßnahmen, die den Stand der Technik widerspiegeln, gibt es heute mehrere Maßnahmen, die zum [Schutz vor GNSS-Jamming und Spoofing](#) ergriffen werden können:

- Die **Sicherstellung einer sauberen Funkfrequenzumgebung** und die Nutzung der von der Internationalen Fernmeldeunion zugewiesenen Frequenzbänder ist die allererste Ebene des Schutzes für GNSS-Nutzer;
- **Authentifizierung der GNSS-Signale:** Die GNSS-Authentifizierung wird dadurch erreicht, dass die Sendesignale über bestimmte Merkmale verfügen, die von böswilligen Akteuren nicht vorhergesagt oder gefälscht werden können. Ein zur Authentifizierung befähigter Empfänger kann diese Merkmale interpretieren, um echte Signale von Nachahmungen zu unterscheiden. Dies kann auf zwei einander ergänzenden Ebenen erfolgen: auf der Datenebene, um die gesendeten Navigationsnachrichten zu authentisieren, und auf der Entfernungsebene, um die gemessenen Entfernungen zu den Satelliten zu authentisieren;
- **Verwendung mehrerer Quellen für Positionsdaten**, um die Lösung mit unabhängigen Messungen abzugleichen. Dies kann durch die Verwendung mehrerer Konstellationen und möglicherweise mehrerer Frequenzen und/oder durch die Ergänzung der GNSS-Lösung durch andere Technologien erfolgen (als Beispiel: Smartphones enthalten in der Regel viele Sensoren, die zur Bereitstellung redundanter Positions- oder Bewegungsinformationen verwendet werden können);
- **Nutzung einer besseren Antennenanlage:** Adaptive Antennen (Antennen mit kontrolliertem Strahlungs- oder Empfangsmuster) können ein sehr effizientes Mittel gegen Jamming sein, und

einfachere Konfigurationen (zwei Antennen) können Informationen über die Ankunftsrichtung liefern, die bei der Erkennung eingehender Spoofing-Signale sehr nützlich sind;

- **Einsatz spezieller Empfängertechniken:** beispielsweise Techniken, die auf der Überwachung der Signalleistung oder des Verhältnisses von Träger zu Rauschdichte, der Unterscheidung bei der Ankunftszeit (ToA), der Prüfung der Verteilung der Korrelatorausgänge und der Konsistenzprüfung zwischen verschiedenen Messungen wie Ephemeridendaten, Änderung des Taktversatzes oder Code- und Träger-Dopplern basieren;
- **Einsatz von Techniken zur Überwachung der Signalqualität:** ursprünglich entwickelt für die Erkennung von Mehrwegeeffekten und die Überwachung von Wellenformdeformationen, kann zur Erkennung der Deformation der Korrelationsfunktion typischer Spoofing-Angriffe verwendet werden. Die Herausforderung bei der Erkennung und Abwehr von Spoofing besteht darin, zwischen echten und unerwünschten Signalen zu unterscheiden. Die Erkennung von Mehrwegeeffekten hat dasselbe Ziel, und daher werden ähnliche Techniken vorgeschlagen.

Neuartige innovative Ansätze für den Korrelationsprozess, darunter der „Superkorrelator“, bieten die Möglichkeit, Sichtlinien- und Nicht-Sichtliniensignale während des Korrelationsprozesses zu trennen und so Mehrwegeeffekte abzuschwächen, Spoofing zu verhindern und den Ankunftszeitpunkt von Signalen zu bestimmen. So leistungsfähig sie auch sind, werden solche Methoden derzeit nur bei anspruchsvollen, hochwertigen Empfängern eingesetzt, **in anderen GNSS-Chipsätzen sind sie jedoch nicht weitverbreitet.**

Aufgrund der geringen Leistung von GNSS-Signalen sind GNSS-Lösungen in bestimmten Umgebungen, z. B. in Innenräumen, unter der Erde oder in Straßenschluchten, meist nicht verfügbar. In solchen Umgebungen wird für nahtlose PNT eine Mischung von Technologien (z. B. **Hybridisierung von GNSS oder Sensorfusion**) verwendet.

Innenraumdurchdringung in Verbindung mit hoher Verfügbarkeit, geringem Stromverbrauch und kurzer Zeit bis zur ersten Positionsbestimmung (TTFF) sind die wichtigsten Anforderungen für den Massenmarkt (z. B. Verbraucherlösungen, Internet der Dinge (IoT), Automobillösungen, Drohnen, Robotik).

Weitere Informationen sind dem [Marktbericht 2022](#) und dem [GNSS User Technology Report](#) (GNSS-Anwendertechnologie-Bericht) der EUSPA zu entnehmen.

2.6 Trends und Chancen

Bei PNT- und GNSS-Diensten sind die folgenden Trends zu beobachten:

1. Multikonstellationen und Mehrfrequenzen sind die neue Norm

Die vier globalen Systeme (GPS (USA), Galileo (EU), GLONASS (Russland) und BeiDou (China)), die regionalen Systeme (QZSS (Japan) und IRNSS (Indien)) und die verschiedenen satellitengestützten Augmentationssysteme (SBAS) (USA, EU usw.) umfassen **mehr als 100 Satelliten**, die dank der internationalen Koordinierung über offene Signale, kompatible Frequenzpläne, gemeinsame Vielfachzugriffsverfahren (wobei beim GLONASS das alte Verfahren des Vielfachzugriffs im Frequenzmultiplex (FDMA) durch den Vielfachzugriff im Codemultiplex (CDMA) ergänzt wurde) und Modulationsverfahren (z. B. Galileo E1 und GPS L1C) verfügen. Dies erleichtert die Entwicklung von Multikonstellations-GNSS-Chipsätzen und -Empfängern, was den Endnutzern zugutekommt.

Darüber hinaus senden alle globalen und regionalen Konstellationen **offene Signale in gemeinsamen Mehrfrequenzbändern**, und SBAS werden diese Signale simulieren, wobei geplant ist, die Dienste in den kommenden Jahren auf Mehrfrequenzen und Multikonstellationen zu erweitern.

Zusätzlich zu den grundlegenden interoperablen offenen Signalen bietet jede globale/regionale Konstellation spezifische Dienste über spezielle Signale und Frequenzen. Dies gilt für staatliche Dienste wie den öffentlichen regulierten Dienst (PRS) von Galileo oder den präzisen Ortungsdienst (precise positioning service, PPS) des GPS sowie für Mehrwertdienste (z. B. den Hochpräzisionsdienst (HAS) von Galileo, QZSS L6 oder den BeiDou-Kurznachrichtendienst).

Zweifrequenz-Empfänger bieten in Bezug auf die erreichbare Genauigkeit, aber auch in Bezug auf eine verbesserte Störfestigkeit (aufgrund der Frequenzdiversität) erhebliche Vorteile gegenüber Einfrequenz-Empfängern. In der Vergangenheit war die Nutzung von Zweifrequenz lange Zeit auf professionelle oder staatliche Nutzer und auf teure L1- und L2-Empfänger beschränkt. Die Einführung von vier vollständigen GNSS-Konstellationen, die hochwertige offene Signale im E5-Frequenzband liefern, war ein Wendepunkt und hat die breite Verfügbarkeit von E1- und E5-Zweifrequenz-Chipsätzen für den Massenmarkt bewirkt.

2. Empfänger, Verarbeitungsmethoden und Antennen werden ständig weiterentwickelt, um eine bessere Leistung zu erzielen.

Die Weiterentwicklung bei der Auslegung von Empfängern wird durch **technologische Entwicklungen** in der **Halbleiterindustrie** ermöglicht, darunter eine **höhere Verarbeitungsleistung** zur Unterstützung von mehr GNSS-Kanälen und die Entwicklung **kostengünstiger Sensoren**, die eine engere Kopplung mit verschiedenen Technologien und die Ortung an GNSS-fernen Standorten ermöglichen. Gleichzeitig bewirkt der Konkurrenzdruck Entwicklungen in Richtung höherer Genauigkeit, besserer Leistung in allen Umgebungen, kürzerer Zeit bis zur ersten Positionsbestimmung (TTFF) und Robustheit gegen Jamming oder Spoofing.

GNSS-Fehler werden in der Regel durch zwei Modellierungsmethoden verringert: Die Beobachtungsraumdarstellung (Observation Space Representation, OSR) liefert eine einzige zusammengesetzte Entfernungskorrektur, wie sie in einer nahe gelegenen (realen oder virtuellen) Referenzstation beobachtet wird, während bei der Zustandsraum-Repräsentation (State Space Representation, SSR) die verschiedenen Fehlerquellen von einem Netz kontinuierlich arbeitender Referenzstationen (continuously operating reference stations, CORS) getrennt geschätzt werden, bevor sie an den Empfänger gesendet werden. Einige Parameter (z. B. Umgebungsverzögerungen bei PPP) werden im Empfänger und nicht in CORS-Netzen geschätzt. Bei der PPP-RTK-Methode werden die Elemente beider Methoden kombiniert und es wird für eine skalierbare Genauigkeit für alle Nutzersegmente, vom Massenmarkt bis zum Hochpräzisionsmarkt, gesorgt. Das **Aufkommen von hochpräzisen Anwendungen für den Massenmarkt** zeigt ein großes Potenzial für eine breite Nutzung von PPP-RTK.

Geolokalisierte IoT-Geräte erfordern die Verfügbarkeit von Positionsdaten für einen sehr niedrigen Energieverbrauch. Aus diesem Grund wurde in den letzten Jahren eine deutliche **Reduzierung des GNSS-Energieverbrauchs** angestrebt, was zu raschen Fortschritten in der Empfängertechnologie (mit einem Verbrauch von unter 10 mW im kontinuierlichen Tracking-Modus bei 1 Hz) und zum Einsatz verschiedener innovativer Techniken geführt hat. Dazu gehören ausgereifte Lösungen wie unterstützte GNSS (assisted GNSS, A-GNSS) oder langfristige Ephemeridenvorhersagen sowie neuartige hybride Ansätze, die die dem IoT innewohnende Konnektivität nutzen.

Antennen sind bei der Auslegung von Empfängern ein kritischer Bestandteil. Die besten Chipsätze und die ausgefeilteste Signalverarbeitung können eine schlechte Antennenleistung nicht ausgleichen. Während diese Bedeutung in den Hochpräzisionssegmenten schon lange erkannt wurde, wird dieses Thema in anderen Segmenten, einschließlich des Massenmarktes, erst jetzt in vollem Umfang aufgegriffen. Die breite Verfügbarkeit von Zweifrequenz-Empfängern eröffnet zwar neue Möglichkeiten, doch sind Antennen ein limitierender Faktor für die Gesamtleistung.

3. **5G/6G ermöglicht allgegenwärtige Konnektivität und kann zur Ortung beitragen.**

Die **Mobilfunktechnologie** hat sich in der Vergangenheit von einer Plattform von Mensch zu Mensch (3G) hin zu einer Konnektivität von Mensch zu Information (4G) entwickelt. **5G** ist das erste Mobilfunksystem, das allumfassende Konnektivität bieten soll. Es wird davon ausgegangen, dass 5G ein massives Internet der Dinge (Massive Internet of Things, MIoT) sowie kritische Kommunikationsanwendungen entfesseln wird, bei denen die Netze den Kommunikationsbedarf von Milliarden angeschlossener Geräte erfüllen können, wobei ein angemessener Kompromiss zwischen Geschwindigkeit, Latenz und Kosten gefunden werden muss. **6G** – derzeit in der Entwicklung befindlich – soll Anwendungen unterstützen, die über die derzeitigen mobilen Nutzungsszenarien hinausgehen, wie virtuelle Realität (VR) und erweiterte Realität (augmented reality, AR), allgegenwärtige Sofortkommunikation, allgegenwärtige Intelligenz und die Weiterentwicklung des Internets der Dinge (IoT).

Im Gegensatz zu früheren Generationen von Funknetzen, bei denen die Ortung nur eine Zusatzfunktion war, wird die **Ortung bei 5G-Mobilfunknetzen als integraler Bestandteil des Systems betrachtet** und eine Schlüsselrolle spielen, da sie ein breites Spektrum an standortbezogenen Diensten und Anwendungen ermöglicht. Ein wesentliches technisches Merkmal der 5G-Ortung sind Breitbandsignale im Frequenzbereich 2 (frequency range 2, FR2), der aus den Betriebsfrequenzen besteht, die 5G im mmWave-Bereich (über 24 GHz) zugewiesen wurden. Diese breiten Signale (bis zu 500 MHz Bandbreite) eignen sich für eine bessere Zeitauflösung, aber auch für eine genaue digitale Strahlformung, was wiederum eine sehr genaue Schätzung der Ankunftszeit (ToA) und der Ankunftsrichtung (Direction of Arrival, DoA) ermöglicht, insbesondere unter direkten Sichtlinienbedingungen. Eine unabhängige 5G-Infrastruktur kann auch als alternative PNT-Quelle dienen, solange die Infrastruktur nicht von GNSS abhängig ist.

Es wird erwartet, dass die **Ergänzung der EGNSS durch 5G** das Herzstück künftiger Location Engines für viele Anwendungen in den Bereichen standortgestützte Dienste (LBS) und IoT sein wird, mit einer erheblichen Verbesserung der Ortungsleistung in Städten. Mit ausfallsicheren drahtlosen Verbindungen, schnelleren Datengeschwindigkeiten und umfangreichen Datenkapazitäten kann 5G das Konnektivitäts-Backbone bereitstellen, das für die **kooperative Ortung** und den sicheren Betrieb von fahrerlosen Fahrzeugen, Drohnen, mobilen Robotern und ganz allgemein für die Welt der autonomen Dinge erforderlich ist.

In Zukunft soll **6G** dank intelligenter reflektierender Oberflächen, massiver Antennengruppen und fortschrittlicher Strahlformung eine **Genauigkeit der Ortung im Zentimeterbereich** erreichen sowie für Anwendungen wie Drohnenzustellung, Anlagenverfolgung, Zustandsüberwachung, Präzisionslandwirtschaft und autonome Fahrzeuge genutzt werden können.

Weitere detaillierte Informationen sind dem [EUSPA GNSS User Technology Report](#) (GNSS-Anwendertechnologie-Bericht der EUSPA) zu entnehmen.

2.7 PNT-Systeme und -Dienste

In der Vergangenheit haben **konventionelle PNT-Systeme**, die auf terrestrischen/bodengestützten Infrastrukturen basieren, eine zentrale Rolle bei der Verbesserung und Stärkung von PNT-Diensten gespielt, sei es in Kombination mit oder unabhängig von GNSS. Es gibt verschiedene konventionelle Systeme, die alle unterschiedliche physikalische Prinzipien nutzen, um einen bestimmten Zweck zu erfüllen. Der wichtigste ist die Bereitstellung einer genauen und zuverlässigen Ortungs- und Zeitgebungslösung, die es ermöglicht, auf sichere Weise von einem Punkt im Raum zu einem anderen zu navigieren, die Position zu bestimmen und abgeleitete Informationen wie die Geschwindigkeit und den Kurs zu liefern, um das gewünschte Ziel zu erreichen.

Moderne **PNT-Systeme und -Dienste stützen sich** heutzutage **auf GNSS**, da diese in der Lage sind, Position und Zeit weltweit mit unvergleichlicher Leistung beizubehalten. Die Verfügbarkeit von GNSS-Diensten ändert sich sehr schnell und wird dies kurz- und mittelfristig auch weiterhin tun. In den letzten Jahren wurden vier GNSS (GPS, GLONASS, Galileo und BeiDou) für betriebsbereit erklärt, um globale PNT-Dienste mit Mehrfrequenzfunktionen bereitzustellen. Darüber hinaus verbessern boden- und weltraumgestützte Augmentationssysteme die Leistung der GNSS-Signale für bestimmte Nutzer und in der Regel regional oder lokal.

Durch diese Vielzahl an interoperablen GNSS-Diensten werden die **Rationalisierung** und sogar die **Außerbetriebnahme konventioneller terrestrischer PNT-Systeme** ermöglicht, was wiederum Einsparungen bei den Wartungs- und Betriebskosten sowie die Rationalisierung des elektromagnetischen Spektrums möglich macht. Für bestimmte kritische Anwendungen wie die Luftfahrt, den Elektrizitäts- oder den Bankensektor oder zivile Notfalldienste wird es weiterhin einer Backup-Navigationsinfrastruktur bedürfen, um im Falle einer GNSS-Störung oder eines GNSS-Ausfalls eine grundlegende Navigationsfunktion zu gewährleisten.

Trotz ihres unschlagbaren Erfolgs weisen GNSS-Dienste jedoch auch gewisse Schwächen auf, die vor allem auf die geringe Signalstärke zurückzuführen sind, die auch eine hohe Störanfälligkeit mit sich bringt. Dies erfordert **alternative PNT-Systeme und -Dienste**, die in der Lage sind, PNT-Funktionen unabhängig von GNSS (normalerweise mit verminderter Leistung) bereitzustellen. Darüber hinaus können alternative PNT-Dienste dank der höheren Signalstärke GNSS-Dienste auch dort ergänzen, wo keine GNSS-Signale verfügbar sind (z. B. in Innenräumen oder unter der Erde). Die Kombination von GNSS und alternativen PNT-Diensten ermöglicht **resiliente PNT-Dienste**, d. h. PNT-Dienste, die auch bei einem Ausfall von GNSS-Diensten oder in Umgebungen, in denen keine GNSS-Lösungen verfügbar sind, weiter funktionieren.

Alternative PNT-Dienste können von konventionellen PNT-Systemen und/oder von **neuen PNT-Systemen bzw. PNT-Systemen der neuen Generation** erbracht werden, die PNT-Dienste erbringen, die in der Regel entweder eine geringere Leistung als GNSS aufweisen, eine begrenzte Abdeckung bieten oder mit höheren Kosten verbunden sind.

2.7.1 Überblick über PNT-Systeme

Hauptzweck aller PNT-Systeme ist die Bereitstellung **genauer und zuverlässiger Positions- und Zeitinformationen**, die es dem Gerät des Nutzers ermöglichen, seinen Standort zu bestimmen, von einem Punkt zum anderen zu navigieren oder sich mit einer Zeitzone zu synchronisieren. Je nach Technologie und Art der verschiedenen PNT-Systeme können diese unterschiedlich gut geeignet sein, Positions-, Navigations- oder Zeitinformationen für eine bestimmte Anwendung zu liefern. [Figure 2](#) liefert einen Überblick über die verschiedenen PNT-Systeme, unterteilt in **GNSS, konventionelle** und **neue** Technologien. Die Eignung wird durch Farben dargestellt, die einen Hinweis darauf geben, wie sich jedes System in Abhängigkeit von verschiedenen Faktoren wie Leistung oder Durchführbarkeit verhält. Wenn ein System eine bestimmte Funktionalität nicht bietet, ist es mit „Keine Angabe“ gekennzeichnet. Auf diese Weise kann ermittelt werden, welche PNT-Systeme für eine bestimmte Umgebung oder eine bestimmte Anwendung am besten geeignet sind, wobei zu beachten ist, dass andere Kriterien wie die geografische Reichweite, die Anfälligkeit gegenüber Weltraumwetter oder Kosten in dieser Übersicht nicht berücksichtigt werden. Diese PNT-Systeme werden in den folgenden Abschnitten beschrieben, wobei [APPENDIX A: PNT Systems](#) weitere detaillierte Informationen zu entnehmen sind.

		Ortung und Navigation	Zeitgebung	Im Freien	Innerräume und unterirdisch	Sicherheitskritisch (Luft-, Seeverkehr)	Kritische Infrastrukturen (Energie, Telekommunikation, Finanzen)	Technologischer Reifegrad	
		PNT-System		UMGEBUNG		ANWENDUNGEN		TRL	ANMERKUNGEN
GNSS	SYSTEME								
	Globale Abdeckung							9	Vier globale Konstellationen verfügbar
	Regionale Abdeckung							9	Zwei regionale Konstellationen in Japan und Indien verfügbar
	Satellitenerweiterung (SBAS)							9	Mehrere SBAS weltweit in Betrieb oder in Entwicklung Derzeit keine Bereitstellung von Informationen zur Zeitintegrität
KONVENTIONELL	Navigationshilfen für den Luftverkehr (VOR, DME, ILS, TACAN)		--				--	9	Einige werden Teil des Mindestbetriebsnetzes (MON) sein.
	Loran-C							9	Außer in China und Russland nicht mehr in Betrieb
	eLoran und differenzielles eLoran							9	In der EU und den USA bereits stillgelegt
	Langwellige Zeitverteilung	--				--		9	Die Signalgenauigkeit ist begrenzt und es sind spezielle Antennen erforderlich.
	Atomuhren	--				--		9	Gute Genauigkeit der Zeitbestimmung für kritische Infrastrukturen
Neu entstehende Technologien	White Rabbit					--		9	Erfordert eine ununterbrochene Glasfaserverbindung
	Zeitverteilung über Computernetze	--				--		9	Genauigkeit der Zeitbestimmung aus den speziellen Netzen
	Pseudoliten							9	Nur terrestrisch
	5G und Mobilfunknetze							7	Kommunikationstechnologie, die auch PNT liefern kann
	R-Mode						--	5	Seeverkehr, unter Verwendung leicht veränderter bestehender Infrastruktur
	Bildgestützte Navigation		--				--	6	Mehrere Technologien, abhängig von der Hardware
	Mobilfunkgestützte Navigation					--	--	9	Betriebssystembasierte Technologie, erfordert eine Internetverbindung
	Koppelnavigation und IMU		--				--	9	Passives System, anfällig für Drift, wenn nicht mit anderen Sensoren kombiniert
	Umgebungskarten		--				--	7	Passives System, erfordert vorherige kartierte Informationen
	Erdnahe Umlaufbahn							8	Neue weltraumgestützte Breitbandnetze
	Quantentechnologien (Taktgeber und IMU)							4	Neuer Ansatz für Navigations- und Zeitgebungs-Hardware.
Pulsarsen-PNT					--		3	PN für den Weltraum, vorgeschlagen als neue Zeitskala für die Erde	

--	Keine Angabe		GERINGE Eignung		HOHE Eignung
			MITTLERE Eignung		Potenziell (Bewertung/Entwicklung läuft)

Hinweis: Die Farbe für den technologischen Reifegrad (TRL) gibt einen Bereich vom NIEDRIGSTEN Reifegrad in Rot bis zum HÖCHSTEN Reifegrad in Grün an.

Abbildung 2 – Überblick über PNT-Systeme, unterteilt in GNSS, konventionelle und neue Technologien

Figure 3 liefert einen Überblick über PNT-Systeme, unterteilt in weltraumgestützte und terrestrische Systeme:

- Zu den **weltraumgestützten PNT-Systemen** gehören Konstellationen von Satelliten in der mittleren Erdumlaufbahn (MEO), die GNSS-Dienste erbringen (Abschnitt 5.1), Satelliten in der geostationären Umlaufbahn (GEO) zur Bereitstellung von GNSS-Augmentationen (Abschnitt 5.1.3.1) sowie die neuen Megakonstellationen von Satelliten in der niedrigen Erdumlaufbahn (LEO) (Abschnitt 5.3.10).
- Zu den **terrestrischen PNT-Systemen** gehören konventionelle PNT-Systeme wie Navigationshilfen für den Luft- und Seeverkehr oder Atomuhren (Abschnitt 5.2), GNSS-Augmentationssysteme wie differenzielle oder PPP-Systeme (Abschnitt 5.1.3.2) sowie neue Technologien wie 5G oder Quantum of Environmental Maps (Abschnitt 5.3).

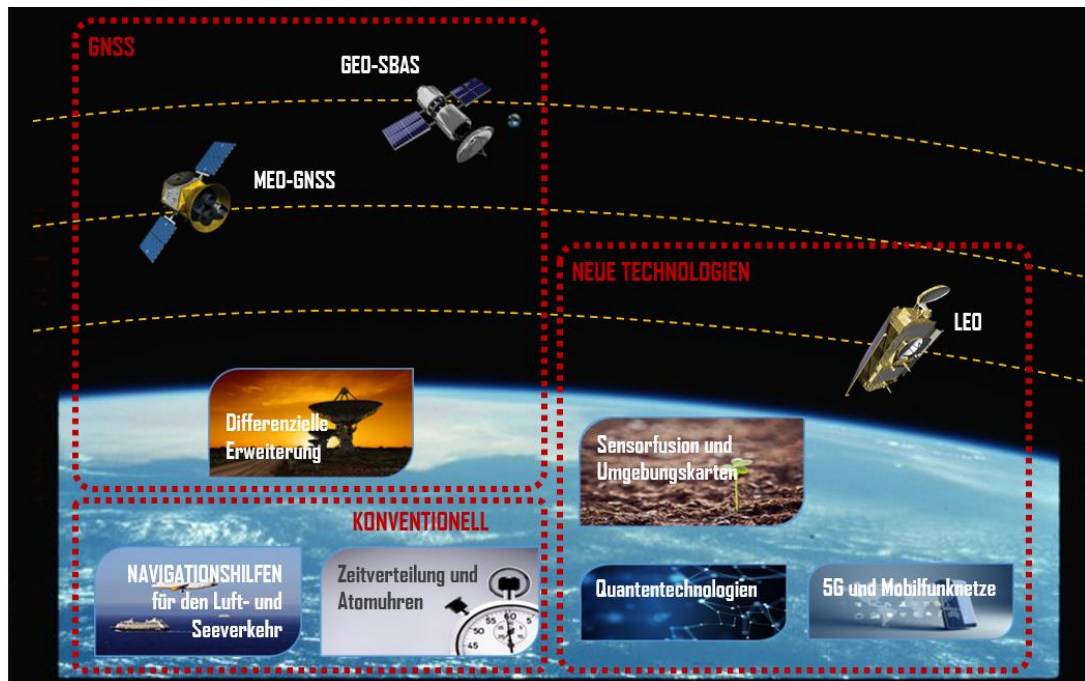


Abbildung 3 – PNT-Systeme, unterteilt in weltraumgestützt und terrestrisch

2.7.2 Globale Satellitennavigationssysteme (GNSS) und Augmentationen

Ein **globales Satellitennavigationssystem (GNSS)** ist eine PNT-Infrastruktur, die es Nutzern mit einem kompatiblen Empfänger ermöglicht, von Satelliten ausgehende Signale zu verarbeiten und die Position, Geschwindigkeit und Zeit (PVT) zu bestimmen. Abhängig von ihrer Reichweite wird zwischen folgenden Systemen unterschieden:

- Satellitennavigationssysteme mit globaler Abdeckung: Galileo (EU), GPS (USA), BeiDou (China), GLONASS (Russland).
- Satellitennavigationssysteme mit regionaler Abdeckung: QZSS (Japan), IRNSS (Indien).

Die GNSS-Leistung kann durch **Augmentationssysteme** verbessert werden, die wie folgt unterteilt werden können:

- **weltraumgestützt**: Augmentationssysteme, bei denen die GNSS-Korrekturen über Satelliten an die Nutzer übertragen werden und die *großräumige* Augmentationsinformationen liefern (d. h. im kontinentalen Maßstab).

Eine Art dieser Systeme sind satellitengestützte Augmentationssysteme (SBAS), die Dienste für den Luftverkehr erbringen und von denen es heute folgende gibt: EGNOS (EU), WAAS (USA), MSAS (Japan), GAGAN (Indien), KASS (Südkorea), ANGA (Zentralafrika), SouthPAN (Australien und Neuseeland), BDSBAS (China) und SDCM (Russland).

Eine andere Art dieser Systeme ist die präzise Punktpositionierung (PPP), die durch die Übertragung von GNSS-Korrekturen für ein Modell der GNSS-Satellitenfehler eine Echtzeit-Positionsgenauigkeit im Zentimeterbereich ermöglicht. Bei der PPP dauert es in der Regel mehrere Dutzend Minuten, bis die endgültige Positionsgenauigkeit erreicht wird.

- **terrestrisch**: Augmentationssysteme, bei denen die GNSS-Korrekturen über terrestrische Mittel (Bodenstationen oder Internet) an die Nutzer übertragen werden. Sie liefern in der Regel Augmentationsinformationen für ein *lokales Gebiet* (d. h. mehrere Dutzend Kilometer), einige liefern jedoch auch großräumige Informationen über das Internet (d. h. PPP).

Beispiele für Systeme, die Augmentationsinformationen für ein *lokales Gebiet* liefern, sind:

- bodengestützte Augmentationssysteme (GBAS), die Dienste für den Luftverkehr mit Ergänzungsinformationen einschließlich Integrität bereitstellen (siehe Abschnitt [2.1](#));
- differenzielle GNSS (DGNSS) mit Augmentationsinformationen zur Verbesserung der Genauigkeit der Nutzerposition, die auf der Verarbeitung von GNSS-Code-Messungen beruhen;
- Echtzeit-Kinematik (RTK), die dank der Verarbeitung von GNSS-Phasenmessungen eine zentimetergenaue Ortung in Echtzeit innerhalb weniger Sekunden ermöglicht.

Um das Beste aus den Welten der RTK und PPP zu vereinen, sind in den letzten Jahren PPP-RTK-Systeme entstanden, bei denen schnelle RTK-Initialisierungszeiten mit der großen Reichweite der PPP kombiniert werden;

- **empfängergestützt**: Augmentationssysteme, bei denen der Nutzerempfänger Augmentationsinformationen von Navigationssensoren enthält. Ein Beispiel für diese Art von Systemen sind luftfahrzeuggestützte Augmentationssysteme (ABAS), bei denen am häufigsten die autonome empfängerseitige Integritätsüberwachung (RAIM) zum Einsatz kommt.

Detaillierte Informationen zu den verschiedenen GNSS-Systemen und -Augmentationen sind [APPENDIX A: PNT Systems](#) zu entnehmen, während die Galileo- und EGNOS-Dienste im Einzelnen in Abschnitt [3.2](#) bzw. [3.3](#) erörtert werden.

Die folgenden Abbildungen liefern einen Überblick über die derzeitigen GNSS und SBAS mit einigen ihrer wichtigsten Merkmale und einer Zeitleiste.

			2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	
SATELLITENNAVIIGATIONSSYSTEME	GLOBALE ABDECKUNG	System	Anbieter	Signal										
		Galileo		E1 E5 E6	FOC – 24 SV + Ersatz									
		GPS		L1 L1C L2 L2C L5	FOC – etwa 30 SV									
		BeiDou		B1 B2 B3	FOC – etwa 30 SV									
		GLONASS		L1 FDMA L1 CDMA L2 FDMA L2 CDMA L3 CDMA L5 CDMA	FOC – etwa 30 SV									
	QZSS		L1C/A L1C L2C L5	FOC – 24 SV										
	IRNSS		L1 L5 S-Band	FOC – 24 SV										
	EGNOS		L1 L5	FOC – 44 SV										
	WAAS		L1 L5	FOC – 44 SV										
	MSAS		L1 L5	FOC – 44 SV										
SATELLITENGESTÜTZTE ERWEITERUNGSSYSTEME (SBAS)	REGIONALE ABDECKUNG	GAGAN		L1 L5	FOC – 22 SV									
		KASS		L1 L5	FOC – 22 SV									
		ANGA		L1 L5	FOC – 22 SV									
		SouthPAN		L1 L5	FOC – 22 SV									
		BDSBAS		B1C B2a	FOC – 22 SV									
		SDCM		L1 L5	FOC – 22 SV									
		EGNOS		L1 L5	FOC – 22 SV									
		WAAS		L1 L5	FOC – 22 SV									
		MSAS		L1 L5	FOC – 22 SV									
GAGAN		L1 L5	FOC – 22 SV											
KASS		L1 L5	FOC – 22 SV											
ANGA		L1 L5	FOC – 22 SV											
SouthPAN		L1 L5	FOC – 22 SV											
BDSBAS		B1C B2a	FOC – 22 SV											
SDCM		L1 L5	FOC – 22 SV											

- System NICHT in Betrieb
- Systementwicklung/-einführung läuft
- System in voller Betriebsfähigkeit (FOC), mit Angabe der Anzahl der betriebsfähigen Satelliten (SV) und Flugphasen

Abbildung 4 – Überblick über GNSS-Systeme

2.7.3 Konventionelle PNT-Systeme

Konventionelle PNT-Systeme sind seit vielen Jahren in Betrieb und umfassen hauptsächlich Bodeninfrastruktur wie Antennen, unterstützende Einrichtungen, Überwachungsstellen und Kontrollzentren. Konventionelle PNT-Systeme zeichnen sich durch folgende Merkmale aus:

- **spezifische Frequenzbänder und Leistung**, die die wichtigsten Dienstmerkmale, einschließlich der Reichweite des Systems, ermöglichen;
- Erbringung in der Regel von **einer Art von Dienst**, z. B. Peilung, Entfernung oder einer Kombination davon;
- **eindeutige und standardisiert Identifizierung an einem bestimmten Standort**, um ihre Verwendung mit automatisierten Systemen zu erleichtern, die ihre Signale verarbeiten;
- **Auslegung auf der Grundlage bekannter und öffentlicher Normen**, wodurch die Anforderungsspezifikationen des Systems festgelegt sowie eine ordnungsgemäße Verifizierung und Validierung des Systems ermöglicht werden.

Aufgrund der zunehmenden Nutzung von GNSS und der Veralterung einiger dieser konventionellen Systeme sowie der Kosten für deren Wartung besteht die Tendenz zur **Rationalisierung** unter Beibehaltung eines Mindestnetzes, das den Betrieb ohne GNSS unterstützen könnte.

Die nachstehende Abbildung, die dem europäischen [ATM-Masterplan](#) entnommen ist, zeigt als **Beispiel** die erwartete Weiterentwicklung der konventionellen Navigationssysteme (NDB, VOR, DME, ILS) in der **europäischen Zivilluftfahrt**. Mehrere Systeme sollen in den nächsten zehn Jahren rationalisiert oder außer Betrieb genommen werden – eine Folge der erfolgreichen Einführung und des erfolgreichen Ausbaus von GNSS und ihrer satelliten- und bodengestützten Augmentationen. Zu den Vorteilen dieser Rationalisierung der Infrastruktur gehören **Einsparungen bei den Betriebskosten und das Freiwerden der** von den konventionellen Systemen belegten **Frequenzbänder**. Um jedoch im Falle eines GNSS-Ausfalls ein sicheres europäisches Flugverkehrsmanagement gewährleisten zu können, wird ein **Mindestbetriebsnetz (minimum operational network, MON)** aus konventionellen Systemen aufrechterhalten.

Es sei darauf hingewiesen, dass die im ATM-Masterplan enthaltenen Weiterentwicklungspläne denen entsprechen, die von der Europäischen Union vorgesehen sind (und die auch die auf Ebene der ICAO vereinbarten Weiterentwicklungspläne widerspiegeln). Konventionelle PNT-Systeme fallen jedoch letztlich in die Zuständigkeit der verschiedenen nationalen Behörden, die möglicherweise über spezifische, vom ATM-Masterplan abweichende Strategien und Pläne verfügen.

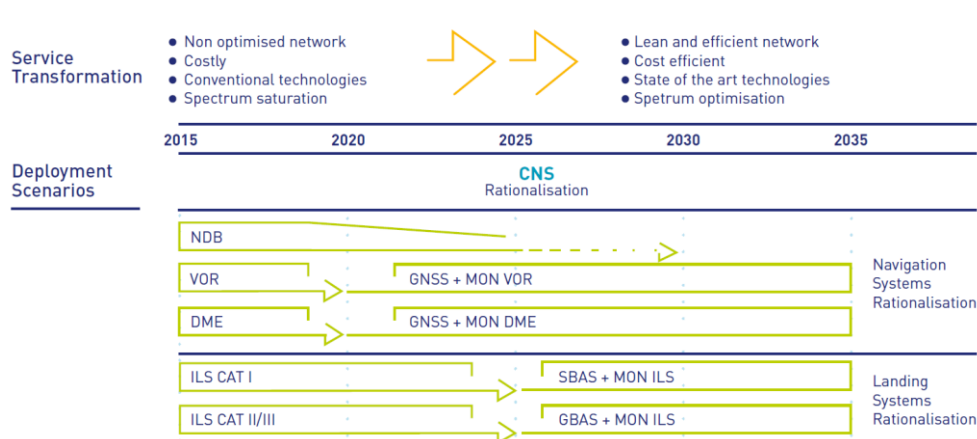


Abbildung 5 – Rationalisierung konventioneller Navigationshilfen (Quelle: [ATM-Masterplan](#))

Schließlich liefert [Abbildung 6](#) einen Überblick über die konventionellen PNT-Systeme, wobei weiterführende Informationen in Anhang A, Abschnitt [5.2](#) zu finden sind.

System	Frequenzband	PNT-Art		Genauigkeit	Reichweite	Unterstützte Nav-Spezifikation(Luftverkehr)	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
		Ortung/Navigation	Zeitgebung														
NDB	190 kHz bis 1750 kHz	Peilung in Bezug auf das NDB	--	Abhängig von AFD an Bord. Von der ICAO vorgeschriebene Mindestgenauigkeit für NDB: ±5°	25 NM bis 150 NM	--	Stilllegungsvorschlag im europäischen ATM-Masterplan										
PCL	108 MHz bis 117,975 MHz	Peilung in Bezug auf das VOR	--	Innerhalb von ±2°	25 NM bis 130 NM	RNAV 5	Rationalisierung auf MON										
DME	960 MHz bis 1215 MHz	Entfernung zum DME	--	Etwas ±200 Meter ±0,1 NM	Mit VOR: 25 NM bis 130 NM Mit ILS: etwa 15 NM	RNAV 5, RNAV 2, RNAV 1, RNP 1 und A-RNP	Rationalisierung auf MON										
ILS	108 MHz bis 111,975 MHz	Horizontale/vertikale Führung – Präzisionsanflug	--	CAT I: ± 10,5 m (35 ft) Cat II: ± 4,5 m (25 ft) Cat III: ± 3 m (15 ft)	Etwas 15 NM	--	Rationalisierung auf MON										
TACAN	960 MHz bis 1215 MHz	Peilung und Entfernung	--	Innerhalb ±1°DME-Anteil etwa ±926 m (0,5 NM)	Etwas 200 NM	--	In Betrieb seit 1960										
Loran-C	90 kHz bis 110 kHz			< 460 m	Lange ReichweiteTag: bis zu 600 NM Nacht: bis zu 1300 NM	--	In Europa seit 2015 nicht mehr in Betrieb										
eLoran und dLoran	90 kHz bis 110 kHz			±20 m, ±5 m für dLoran	600 NM Tag (Nacht: bis zu 1300 NM), dLoran 30 NM [aufgrund	--	In Europa seit 2015 nicht mehr in Betrieb										
DCF77	77,5 kHz	--		langfristige Abweichung (1 Jahr) von ±5 ms bis ±150 ms	Etwas 1000 NM	--	In Betrieb seit 1959										
Atomuhren	--	--		Besser als Nanosekunden	Keine Einschränkung	--	In Betrieb seit 1960										

--	Keine Angabe
	GERINGE Eignung
	MITTLERE Eignung
	HOHE Eignung

	System NICHT in Betrieb
	Mindestbetriebsnetz (MON) gemäß Durchführungsverordnung (EU) 2018/1048 in Bezug auf die leistungsorientierte Navigation
	System IN Betrieb (vollständige Betriebsfähigkeit – FOC)

Abbildung 6 – Überblick über konventionelle PNT-Systeme

2.7.4 Neue PNT-Systeme/PNT-Systeme der nächsten Generation

Neben konventionellen PNT-Systemen oder GNSS-Diensten gibt es eine ganze Reihe von **neuen PNT-Systemen bzw. PNT-Systemen der neuen Generation**, die heute in der Regel weniger leistungsfähig sind als GNSS, nur eine begrenzte Reichweite haben oder mit höheren Kosten verbunden sind.

[Figure 7](#) liefert einen Überblick über die neuen PNT-Technologien mit dem höchsten Reifegrad und der größten zugeschriebenen Bedeutung. Die Technologien wurden hauptsächlich auf der Grundlage der scheinbaren Hardware-Ähnlichkeiten gruppiert und umfassen:

- terrestrische Technologien, die ausgereifte Zeitgebungsdienste mit hoher Leistung erbringen;
- funkgestützte Technologien, sowohl bodengestützt (z. B. Pseudoliten, R-Mode) als auch weltraumgestützt (LEO-Satelliten);
- mobile Navigation, die bis zu einem gewissen Grad hardwareunabhängig ist und stark von Sensorfusion, maschinellem Lernen und Backend-Servern abhängt und eine maßgebliche Technologie für den Massenmarkt ist;
- nicht funkgestützte Technologien wie Trägheitssysteme und Magnetsensoren;
- Visuelle Techniken, Lasererfassung und Entfernungsmessung (LIDAR) oder radargestützte Techniken, die zwar nicht unbedingt PNT bieten, aber für die Sensorfusion wichtig sind;
- Quanten und Pulsare, die zwar noch nicht ausgereift sind, aber in Zukunft sehr interessante Leistungen bieten könnten.

Ein wichtiges Merkmal dieser Systeme ist ihr technologischer Reifegrad (technology readiness level, TRL), der in der letzten Spalte der obigen Abbildung angegeben ist. Bei der Methodik wird eine Zahl von „1“ (beachtete Grundprinzipien – niedrigster Reifegrad) bis „9“ (tatsächliches System, das sich im betrieblichen Umfeld bewährt hat – höchster Reifegrad) zugewiesen. Je höher der TRL ist, desto höher ist die Einsatzbereitschaft des Systems.

Diese **neuen Technologien** unterscheiden sich von den konventionellen Hilfen und in gewissem Maße auch von GNSS, indem sie

- als Teil des kombinierten Angebots oder des Sensorfusionsansatzes konzipiert sind;
- nicht nur die Ortung ermöglichen, sondern auch für eine effiziente Zeitverteilung sorgen, auch wenn einige eine Verbindung zur UTC benötigen;
- sich auf moderne Hardware- und Softwareentwicklungsverfahren stützen, die eine schnelle Entwicklung und drahtlose Updates ermöglichen. Dies bedeutet auch, dass alle Einheiten miteinander verbunden sind und es nach der Installation in der Regel keiner manuellen Eingriffe bedarf;
- über eigene Funktionen zur Überwachung, Meldung und Feststellung von Fehlern verfügen;
- sich durch verbesserte Cybersicherheit, Integration mit anderen Systemen, Nutzerfahrung und Flexibilität auszeichnen.

Weiterführende Informationen zu den Systemen selbst finden sich in Anhang A Abschnitt [5.3](#).

System	Frequenzband	PNT-Art		Genauigkeit	Reichweite	Technologischer Reifegrad
		Ortung/ Navigation	Zeitgebung			
White Rabbit (WR)	--			Sub-ns/-cm	Netz, mit Repeatern bis zu Hunderten km	9
Zeitverteilung über Computernetze	--	--		Sub-µsec	Netz, mit Repeatern bis zu Hunderten km	9
Pseudoliten	Verschiedene Bänder (z. B. WLAN,			0,2–15 ns/0,005 m (Träger) bis 15 m (Code)	5–15 km	9
5G und Mobilfunknetze	450 MHz bis 6 GHz und 24,25 GHz bis 52,6 GHz	2D		Dutzende Meter Sub-µsec	Gegeben durch die Netzinfrastruktur	7
Ranging Mode (R-Mode)	UKW und MF	2D		Dutzende Meter	250 km	5
Bildgestützte Navigation	--		--	Normalerweise Dezimeterbereich, variiert stark	Basierend auf dem System	6
Mobilfunkgestützte Navigation	Bluetooth und WLAN			Wenige Meter (Höhengenaugigkeit ermöglicht die Erkennung des Bodens)	Bluetooth und WLAN in der Regel Dutzende Meter	9
Koppelnavigation und IMU	--		--	1 m Drift nach 2 min (hohe Präzision) 1 m Drift nach wenigen Sek. (niedrige	Keine Einschränkungen	9
Umgebungskarten	--	2D	--	Außenbereich: Meter bis Hunderte von Metern, Innenräume: < 1 m	Abhängig vom System	7
Erdnahe Umlaufbahn	K- und L-Band			10 ns/10 m statisch	Global	8
Quantentechnologien (Taktgeber und IMU)	--			Mindestens um eine Größenordnung besser als konventionelle IMU	Keine Einschränkungen	4
Pulsarsen-PNT	Röntgen (andere nicht so effizient)			1000 km	Ganze Galaxie	3

Hinweis: Die Farbe für den technologischen Reifegrad (TRL) gibt einen Bereich vom NIEDRIGSTEN Reifegrad in Rot bis zum HÖCHSTEN Reifegrad in Grün an.

-- Keine Angabe MITTLERE Eignung HOHE Eignung (2D = 2 Dimensionen)
 Potenziell (Bewertung/Entwicklung läuft)

Abbildung 7 – Überblick über neue PNT-Systeme/PNT-Systeme der nächsten Generation

2.8 Interoperabilität und Kompatibilität

Die Entwicklung und Modernisierung von GNSS (einschließlich ihrer regionalen Komponenten und Augmentationskomponenten) gehen einher mit Diskussionen über die **Interoperabilität** und **Kompatibilität** von **GNSS** zwischen den verschiedenen Diensteanbietern.

Der internationale Ausschuss für GNSS ([International Committee on Global Navigation Satellite Systems, ICG](#)) definiert „Interoperabilität“ als „die Eignung globaler und regionaler Satellitennavigationssysteme und Augmentationen sowie der von ihnen bereitgestellten Dienste dafür, gemeinsam eingesetzt zu werden, sodass sich für die Nutzer eine größere Leistungsfähigkeit ergibt, als dies der Fall wäre, wenn lediglich auf die offenen Signale eines einzigen Systems zurückgegriffen würde“.

Im GNSS-Kontext sollte Interoperabilität als die Fähigkeit von Nutzergeräten verstanden werden, verfügbare Navigationssignale verschiedener GNSS zu nutzen und eine kombinierte Lösung zu erzeugen, die im Allgemeinen Leistungsvorteile (z. B. höhere Genauigkeit und Verfügbarkeit) gegenüber der Lösung eines Einzelsystems aufweist. Interoperabilität wird häufig auf zwei verschiedenen Ebenen erörtert, und zwar auf der **System-** und der **Signalebene**, während die Interoperabilität auf Empfängerebene durch international anerkannte Normen gewährleistet ist. Weitere Informationen sind auf der [Navipedia-Website zu Interoperabilität](#) erhältlich.

Der ICG definiert „**Kompatibilität**“ als die „Eignung globaler und regionaler Satellitennavigationssysteme und Augmentationen sowie der von ihnen bereitgestellten Dienste dafür, getrennt voneinander oder gemeinsam eingesetzt zu werden, ohne dass unannehmbare Störungen und/oder andere Schäden für ein einzelnes System und/oder einen einzelnen Dienst verursacht werden“.

Bei der Bewertung der Kompatibilität werden häufig zwei Aspekte berücksichtigt:

- die Funkfrequenzkompatibilität, einschließlich Faktoren in Bezug auf Kreuzkorrelationseigenschaften und das annehmbare Grundrauschen von Empfangsgeräten;
- die spektrale Trennung zwischen autorisierten Signalen und anderen Signalen; wenn Überschneidungen unvermeidlich sind, werden enge Gespräche zwischen den Anbietern geführt, um den erforderlichen Dienst zu gewährleisten.

Weitere Informationen sind auf der [Navipedia-Website zu Kompatibilität](#) erhältlich.

Die internationale Zusammenarbeit, die bereits in einem frühen Entwicklungsstadium erfolgt, ist von grundlegender Bedeutung, wenn es darum geht, die Interoperabilität und Kompatibilität von GNSS-Signalen (z. B. Signalstrukturen, Nachrichten, Trägerfrequenzen, Codes und Modulationen) sicherzustellen, während Normen für Empfänger der Schlüssel zur Gewährleistung der Interoperabilität und Kompatibilität auf Empfängerebene sind.

Ähnlich wie GNSS bedürfen auch andere PNT-Dienste der Interoperabilität, Kompatibilität und Entwicklung von Normen (z. B. werden vom Berufsverband der Ingenieure aus dem Bereich Elektrotechnik und Informationstechnik (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) derzeit Normen für [resiliente PNT-Nutzergeräte](#) entwickelt).

2.9 Internationale PNT-Maßnahmen

In Anerkennung der Bedeutung von PNT-Diensten bestehen international einzelstaatliche PNT-Strategien für die wichtigsten Volkswirtschaften der Welt. Dieser Abschnitt enthält einen Überblick über diese PNT-Strategien.

Der [US-amerikanische Funknavigationsplan](#) (FRP) ist für die Bundesregierung der USA die offizielle Quelle für die Politik und Planung im Bereich PNT. Der FRP enthält Kapitel zu den Themen Rollen und Zuständigkeiten, Politik, repräsentative PNT-Nutzeranforderungen, Betriebspläne und nationale PNT-Architektur sowie Anhänge zu den Themen Systemparameter und -beschreibungen, PNT-Informationsdienste und geodätische Bezugssysteme und Datumsangaben.

Im Jahr 2018 wurde in den USA der [National Timing Resilience and Security Act](#) (Nationaler Rechtsakt zur Resilienz und Sicherheit von Zeitgebungsdiensten) und 2020 die [Executive Order on Strengthening National Resilience through Responsible Use of PNT Services](#) (Durchführungsverordnung zur Stärkung der nationalen Resilienz durch verantwortungsvolle Nutzung von PNT-Diensten) mit dem Ziel veröffentlicht, „die verantwortungsvolle Nutzung von PNT-Diensten durch Eigentümer und Betreiber kritischer Infrastrukturen zu fördern“. Neben vielen anderen Maßnahmen wurde in der Durchführungsverordnung die Einführung einer GNSS-unabhängigen Quelle für die koordinierte Weltzeit gefordert. Im Jahr 2020 führte das US-amerikanische Verkehrsministerium [Prüfungen von elf ausgewählten alternativen PNT-Technologien](#) durch, um ergänzende und PNT-Technologien und GPS-Backup-Technologien zu bewerten. Im Rahmen der Kampagne wurden sowohl Untersuchungen im Hinblick auf Position als auch Zeit vorgenommen, um ein quantifiziertes Ranking für die verschiedenen untersuchten Technologien zu erstellen.

Im [russischen Funknavigationsplan](#), der 2019 veröffentlicht wurde und dem Vertreter aus elf Nationen zugestimmt haben³, werden die Positions- und Zeitanforderungen für verschiedene Nutzer erörtert. Aus dem Plan geht hervor, dass die Störung von Signalen von GNSS wie dem GPS und dessen russischem Pendant GLONASS Anlass zu großer Sorge gibt, und es wird aufgezeigt, wie Russland – und seine Verbündeten – die Sicherheit der Nutzer durch die Integration weltraumgestützter und terrestrischer Systeme in eine robustere und resilientere PNT-Architektur erhöhen. Zudem wird in dem Plan eine mobilfunkgestützte terrestrische PNT-Funktion, wahrscheinlich für militärische Zwecke, bestätigt.

Im Falle von Störungen wird im Plan die Einrichtung eines Systems zur Überwachung der GNSS-Frequenzen und zur Erkennung von Störungen, die Nutzung mehrerer GLONASS-Frequenzen und die Integration von GLONASS, GPS und terrestrischen Systemen in die Nutzerempfänger vorgeschlagen: „Eine der Möglichkeiten zur Integration von boden- und weltraumgestützten Funknavigationssystemen ist die Integration von Systemen wie ‚Seagull‘ [Loran] und GLONASS. Integrierte Systeme wie ‚Seagull‘/GLONASS können in Zukunft als Hauptsysteme für die Navigation in den einzelnen Routenabschnitten eingesetzt werden.“

Obwohl **China** bisher keinen Funknavigationsplan veröffentlicht hat, wurde das von China verfolgte Konzept auf einer Reihe von Konferenzen und Symposien vorgestellt. China plant die Errichtung der weltweit ersten [umfassenden PNT-Architektur](#) (z. B. resilient und robust). Diese Architektur wird als ein PNT-System mit mehreren Quellen beschrieben, das „allgegenwärtiger, integrierter und intelligenter“ sein wird. Im Mittelpunkt stehen die BeiDou-Satelliten in der mittleren Erdumlaufbahn (MEO), aber die Architektur wird auch eine Vielzahl anderer PNT-Quellen wie eine LEO-PNT-Konstellation, [Loran-C-Stationen](#), Trägheitssensoren und noch zu entwickelnde Systeme wie Quantennavigation umfassen.

Im Vereinigten Königreich wurde 2016 ein [Marine Navigation Plan](#) (Navigationsplan für den Seeverkehr) veröffentlicht, der sich auf die Nutzung von PNT-Diensten für die Seeschifffahrt konzentriert. Im Jahr 2017 wurden in einem [Bericht](#) die wirtschaftlichen Auswirkungen einer fünftägigen GNSS-Störung auf 5,2 Mrd. GBP für das Vereinigte Königreich geschätzt, und 2020 kündigte das Vereinigte Königreich die Einrichtung eines [National Timing Centre](#) (nationales Zeitgebungszentrum) an, das mithilfe eines Netzwerks von Atomuhren, die an sicheren Standorten untergebracht sind, für zusätzliche Resilienz von GNSS-Dienste zur genauen Zeitgebung sorgen soll.

³ Russische Föderation, Republik Aserbaidschan, Republik Armenien, Republik Tadschikistan, Republik Belarus, Turkmenistan, Republik Kasachstan, Republik Usbekistan, Kirgisische Republik, Ukraine, Republik Moldau.

3 PNT in der EU

In diesem Abschnitt werden PNT in der Europäischen Union erörtert und es werden die in Abschnitt [1.4](#) vorgestellten Ziele 6 bis 8 behandelt. Ziel ist es, **detaillierte Informationen** über die wichtigsten Dienste der europäischen GNSS **Galileo und EGNOS** zu liefern und die **derzeitigen EU-Strategien** im Zusammenhang mit PNT sowie die zusätzlichen Maßnahmen zur Erleichterung der EGNSS-Dienste und/oder Erhöhung der Resilienz von PNT-Diensten für jedes Marktsegment zusammenzufassen.

Der Abschnitt enthält Folgendes:

- eine Einführung des EU-Rechtsrahmens für das EU-Weltraumprogramm (Abschnitt [3.1](#));
- eine Beschreibung der derzeitigen und geplanten Galileo-Dienste unter Hervorhebung ihres Mehrwerts gegenüber anderen GNSS-Diensten (Abschnitt [3.2](#));
- eine Beschreibung der derzeitigen und geplanten EGNOS-Dienste (Abschnitt [3.3](#));
- eine Beschreibung der politischen Maßnahmen der EU im Zusammenhang mit PNT, einschließlich der laufenden Maßnahmen zur Erleichterung des Eingangs der EGNSS in Politikbereiche der EU (Abschnitt [3.4](#));
- Empfehlungen zur Erleichterung der Einführung von EGNSS-Diensten (Abschnitt [3.4](#));
- Empfehlungen zur Stärkung der Resilienz von PNT-Diensten (Abschnitt [3.4](#));
- Beschreibung der Kooperationsmaßnahmen der EU im Bereich der Satellitennavigation (Abschnitt [3.5](#)).

3.1 EU-Weltraumprogramm 2021–2027

Im April 2021 verabschiedeten der Rat und das Europäische Parlament die [Verordnung \(EU\) 2021/696 zur Einrichtung des neuen EU-Weltraumprogramms für die Jahre 2021 bis 2027](#). Gemäß der Verordnung soll durch das EU-Weltraumprogramm Folgendes gewährleistet werden:

- hochwertige, aktuelle und sichere **Weltraumdaten und -dienste**;
- größeren **sozioökonomischen Nutzen** aus der Nutzung solcher Daten und Dienste, mit dem Ziel von mehr Wachstum und einer verstärkten Schaffung von Arbeitsplätzen in der EU;
- mehr **Sicherheit und Autonomie** der EU;
- eine stärkere Rolle der EU als **führender Akteur** in der in der Weltraumwirtschaft.

Durch die Verordnung werden der bisherige Rechtsrahmen und das bisherige Governance-System der EU vereinfacht und der Sicherheitsrahmen wird vereinheitlicht. Die Verordnung erstreckt sich auf die folgenden EU-Weltraumkomponenten:

- **Galileo**: das eigene weltweite Satellitennavigationssystem der EU zur Bereitstellung hochpräziser globaler Positionsdaten und zur Unterstützung von Notfallmaßnahmen und von Suche und Rettung;
- **Europäische Augmentation des geostationären Navigationssystems (EGNOS)**: das regionale satellitengestützte Augmentationssystem (SBAS) der EU. Dieses System bietet Nutzern in der ganzen EU sichere kritische Dienste für die Navigation in der Luftfahrt, im Seeverkehr und an Land.
- **Copernicus**: Europäisches Erdbeobachtungsprogramm. Durch seine Dienste in den Bereichen Land, Meeresumwelt, Atmosphäre, Klimawandel, Katastrophen- und Krisenmanagement sowie Sicherheit unterstützt Copernicus eine breite Palette von Anwendungen, darunter Umweltschutz, Management städtischer Gebiete, regionale und lokale Planung, Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Fischerei, Gesundheit, Verkehr, Klimawandel, nachhaltige Entwicklung, Katastrophenschutz und Tourismus.
- **Weltraumlageerfassung (SSA)**: EU-Initiative zur Überwachung und zum Schutz von Weltraumressourcen vor weltraumbezogenen Gefahren.
- **Staatliche Satellitenkommunikation (Governmental Satellite Communication, GOVSATCOM)**: EU-Initiative zur Ermöglichung des Zugangs zu sicherer Satellitenkommunikation für nationale Behörden.

Darüber hinaus hat die [Europäische Kommission im Februar 2022 zwei neue weltraumbezogene Leitinitiativen vorgelegt](#):

- **einen Vorschlag für eine Verordnung über weltraumgestützte sichere Konnektivität (IRIS²)** zur Gewährleistung des weltweiten Zugangs zu sicheren und kosteneffizienten Satellitenkommunikationsdiensten über eine neue Konstellation für die staatliche Kommunikation und die kommerzielle Nutzung. Ziel ist es, kritische Infrastrukturen zu schützen, die Überwachung und das Krisenmanagement zu unterstützen und überall in Europa Hochgeschwindigkeitsbreitband zu ermöglichen, um den künftigen Herausforderungen unserer Wirtschaft bestmöglich begegnen zu können. Im Rahmen dieser Initiative wurde Ende 2022 eine politische Einigung zwischen dem Europäischen Parlament und den Mitgliedstaaten erreicht;
- **eine Gemeinsame Mitteilung mit dem Titel „Ein Ansatz der EU für das Weltraumverkehrsmanagement“** zur weiteren Stärkung der Fähigkeiten der EU zur Beobachtung und Verfolgung von Objekten im Weltraum (und Festlegung klarer Normen und Vorschriften für eine sichere, nachhaltige und sichere Nutzung des Weltraums).

Das EU-Weltraumprogramm wird in enger Zusammenarbeit mit den Mitgliedstaaten, der Agentur der Europäischen Union für das Weltraumprogramm (EUSPA), der Europäischen Organisation für die Nutzung von meteorologischen Satelliten (ESA), der Europäischen Organisation für die Nutzung von meteorologischen Satelliten (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites, EUMETSAT) und anderen Interessenträgern durchgeführt.

Weitere Informationen zum EU-Weltraumprogramm sind auf der Website [EU Space Programme \(europa.eu\)](#) erhältlich.

3.2 Galileo-Dienste

Galileo ist das **globale Satellitennavigationssystem der EU**, das einen hochpräzisen, garantierten globalen Ortungsdienst unter ziviler Kontrolle bereitstellt. Galileo bietet autonome Navigations- und Ortungsdienste, ist aber mit anderen GNSS wie GPS, GLONASS und BeiDou interoperabel.

Galileo besteht aus einem Weltraumsegment, das eine Konstellation von Satelliten in mittlerer Erdumlaufbahn (MEO) umfasst, die Positions- und Zeitsignale aussenden, einem Bodensegment, das den Betrieb der Satelliten steuert und die in den Galileo-Signalen zu übertragenden Navigationsinformationen erzeugt, und einem Nutzersegment, das aus den weltweiten Nutzerterminals besteht. Galileo ist **seit dem 15. Dezember 2016 in Betrieb** und wird im Rahmen der ersten Generation von Galileo kontinuierlich weiterentwickelt, während die zweite Generation von Galileo noch in der Entwicklung befindlich ist.

Zu den von Galileo bereitgestellten Diensten gehören:

- ein **offener Dienst (OS)**, der für die Nutzer gebührenfrei ist und Ortungs- und Synchronisierungsinformationen bereitstellt, die hauptsächlich für von Verbrauchern genutzte Massenanwendungen der Satellitennavigation bestimmt sind. Dieser Dienst umfasst die Authentisierung von Navigationsnachrichten im offenen Dienst (OSNMA) und Funktionen im Rahmen des Dienstvolumens;
- ein **Hochpräzisionsdienst (HAS)**, der gebührenfrei genutzt werden kann und über zusätzliche Daten, die in einem zusätzlichen Frequenzband übermittelt werden, hochpräzise Ortungs- und Synchronisierungsinformationen bereitstellt, die in erster Linie für Satellitennavigationsanwendungen für professionelle oder kommerzielle Zwecke bestimmt sind;
- ein **Signalauthentifizierungsdienst (SAS)**, der auf den in den Signalen enthaltenen verschlüsselten Codes basiert und in erster Linie für Satellitennavigationsanwendungen für professionelle oder kommerzielle Zwecke bestimmt ist;
- ein **öffentlicher regulierter Dienst (PRS)** für auf eine hohe Betriebskontinuität angewiesene sensible Anwendungen – unter anderem im Bereich Sicherheit und Verteidigung –, der starke, verschlüsselte Signale nutzt und ausschließlich staatlich autorisierten Nutzern zur Verfügung steht;
- ein **Notfalldienst (ES)**, der gebührenfrei genutzt werden kann und bei Naturkatastrophen oder anderen Notfällen in bestimmten Gebieten durch Aussendung von Signalen Warnungen übermittelt;
- ein **Zeitgebungsdienst (TS)**, der gebührenfrei genutzt werden kann und eine genaue und zuverlässige Referenzzeitangabe bereitstellt und die koordinierte Weltzeit umsetzt, wodurch die Entwicklung von Zeitgebungsanwendungen auf der Grundlage von Galileo und die Verwendung in kritischen Anwendungen ermöglicht werden.

Galileo leistet auch einen Beitrag

- zum **Such- und Rettungsdienst (SAR)** des COSPAS-SARSAT-Systems, indem es von Funkbaken gesendete Notsignale entgegennimmt und über einen Rückkanal Mitteilungen an diese Baken sendet;
- zu auf Ebene der Europäischen Union oder internationaler Ebene standardisierten **Integritätsüberwachungsdiensten**, die auf der Grundlage der Signale des offenen Dienstes von Galileo und in Verbindung mit EGNOS und anderen Satellitennavigationssystemen arbeiten und von sicherheitskritischen Diensten genutzt werden;
- **Weltraumwetterinformationen**, die über das GNSS-Dienstzentrum bereitgestellt werden, und Frühwarndiensten, die über die Galileo-Bodeninfrastruktur bereitgestellt werden, und die in erster Linie potenzielle weltraumbezogene Risiken für die Nutzer der von Galileo und anderen GNSS bereitgestellten Dienste verringern sollen.

Die einzelnen Dienste sind in den nächsten Abschnitten näher beschrieben. Weiterführende Informationen zu Galileo finden sich auf der [Website des Europäischen GNSS-Dienstzentrums \(gsc-europa.eu\)](http://gsc-europa.eu).

3.2.1 Offener Dienst (OS) von Galileo

Der offene Dienst von Galileo bietet **globale Dienste in den Bereichen Entfernungsmessung, Ortung und Zeitgebung** für Einfrequenz- und Zweifrequenznutzer, die über einen Empfänger verfügen, der mit dem offenen Dienst von Galileo kompatibel ist. Während jeder Galileo-Satellit Navigationssignale (auch Weltraumsignale (SIS) genannt) in drei Frequenzbändern sendet, wird der offene Dienst von Galileo **auf zwei der drei Frequenzbänder übertragen**.

Zu den [Programmdokumenten zum offenen Dienst von Galileo](#) gehören folgende:

- **Galileo Open Service – Service Definition Document (Offener Dienst von Galileo – Dokument mit der Dienstdefinition)**, in dem die Merkmale und die Leistung des offenen Dienstes von Galileo beschrieben sind, der über das Weltraumsignal im offenen Dienst von Galileo bereitgestellt wird.
- **Galileo Open Service – Signal In Space Interface Control Document (Offener Dienst von Galileo – Schnittstellenkontrolldokument (ICD) für das Weltraumsignal)**, das die öffentlich zugänglichen Informationen über das Galileo-Weltraumsignal enthält und in dem die Schnittstelle zwischen dem Galileo-Weltraumsegment und dem Galileo-Nutzersegment spezifiziert ist. Dieses Dokument ist zur Nutzung durch die Galileo-Nutzergemeinschaft bestimmt;
- **Ionospheric Correction Algorithm for Galileo Single Frequency Users (Ionosphärenkorrekturalgorithmus für Galileo-Einfrequenz-Nutzer)**, das eine ausführliche Beschreibung des Referenzalgorithmus enthält, der bei den Nutzerempfängern anzuwenden ist, um ionosphärische Korrekturen auf der Grundlage der Sendekoeffizienten in der Galileo-Navigationsnachricht für Einfrequenz-Nutzer zu berechnen.

Die [vierteljährlichen Leistungsberichte für den offenen Dienst von Galileo](#) liefern detaillierte Informationen über die Leistung des offenen Dienstes von Galileo in Bezug auf die im Dokument mit der Dienstdefinition festgelegten Zielwerte für das Mindestleistungsniveau.

Die Genauigkeit bei der **Entfernungsmessung und Positionsbestimmung** des offenen Dienstes von Galileo **übertrifft die anderer GNSS-Systeme bei Weitem**, mit einer Entfernungsgenauigkeit von mehr als 30 cm (95 %) sowie einer horizontalen und vertikalen Positionsgenauigkeit von mehr als 2 m bzw. 2,5 m (im Durchschnitt). Die **Genauigkeit des Zeitgebungsdienstes** ist besser als 5 ns (95 %). Betriebsbereite Satelliten liefern in mehr als 99 % der Zeit einwandfreie Weltraumsignale (Status „healthy“) im offenen Dienst von Galileo. Die typische Leistung ist den [Galileo-Leistungsberichten](#) zu entnehmen, aus denen die Statistiken der typischen GNSS-Entfernungsmessfehler hervorgehen. Weitere Informationen zum offenen Dienst von Galileo sind dem [Dokument mit der Dienstdefinition](#) zu entnehmen.

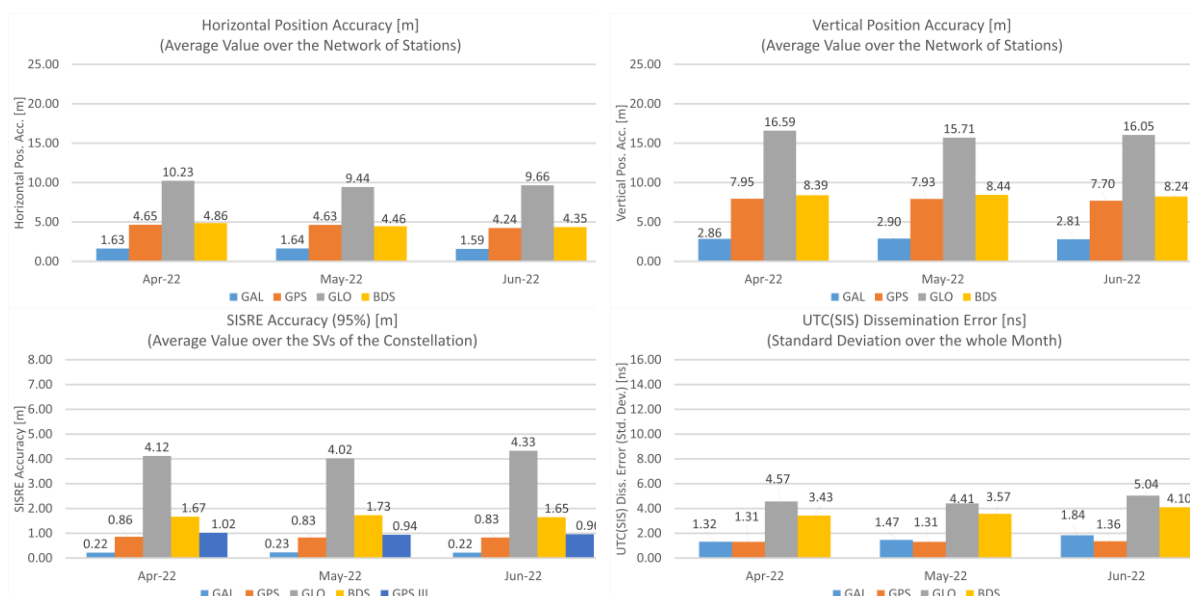


Abbildung 8 – Genauigkeit der Positions- und Zeitbestimmung von Galileo im Vergleich zu anderen GNSS (GPS, GLONASS und BeiDou)

3.2.1.1 Authentisierung von Navigationsnachrichten im offenen Dienst (OSNMA)

Als Teil einer Reihe von innovativen Diensten zur Aufnahme von Authentifizierungsfunktionen wird eine einzigartige Funktion – die Authentisierung von Navigationsnachrichten im offenen Dienst (OSNMA) – in Galileo eingeführt. Damit soll dem eindeutigen Bedarf an **robusteren und vertrauenswürdigeren GNSS-Lösungen** entsprochen werden. Die Nutzer können von dieser erweiterten Galileo-Funktion profitieren, wenn sie einen GNSS-Empfänger oder ein Nutzerterminal verwenden, das die OSNMA-Daten verarbeiten kann.

Die Galileo-OSNMA ist eine auf kryptographischen Vorgängen basierende **Datenauthentisierungsfunktion**, die für Nutzer weltweit kostenfrei zugänglich ist und den Empfängern gegenüber die Gewähr bietet, dass die empfangenen Galileo-Navigationsdaten vom System selbst stammen und nicht verändert wurden. Durch die OSNMA wird die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass Spoofing-Angriffe auf Datenebene erkannt werden, womit ein erheblicher Beitrag zur **Sicherheit der Lösung** geleistet wird. Die OSNMA-Daten, die zum Teil nicht vorhersehbar sind, können auch von den Empfängern genutzt werden, um einen gewissen Schutz gegen Signal-Replay-Angriffe zu bieten.

Die OSNMA bietet die Möglichkeit, mehrere Galileo-Datensätze durch eine spezielle Nachricht zu authentisieren, die innerhalb der **I/NAV-Navigationsnachricht** auf der **E1-B-Signalkomponente** übertragen wird.

Tabelle 2 – Leistungsziele für die Galileo-OSNMA

Merkmal	OSNMA
Mindestfunktionen des GNSS-Empfängers	Einzelfrequenz E1
Gegenstand der Authentifizierung	Navigationsdaten (E1B I/NAV und E5b I/NAV)
Erforderliche Komponenten	E1B
Notwendigkeit der Speicherung von GNSS-Rohsignalen auf der Empfängerseite	Notwendigkeit von I/NAV-Daten
Entschlüsselung von Navigationssignalen durch GNSS-Empfänger	Nein
Authentifizierung	Taktgeber- und Ephemeridendaten, Ionosphärenkorrektur, Verzögerung der Sendegruppe, Statuskennzeichen und Zeitparameter (Zeitversatz GPS bis Galileo und UTC), verzögert
Zeit bis zur ersten Authentifizierung	Eine bis wenige Minuten
Verfügbarkeit der Authentifizierung	Hoch, voraussichtlich mehr als 95 %
Sonstige Anforderungen	Zeitsynchronisierung

Die **öffentliche Testphase** für die OSNMA **begann im Jahr 2021**. Hersteller von Empfängern, Anwendungsentwickler oder Forschende haben die Möglichkeit, das Protokoll zu implementieren und zu testen und Rückmeldungen zum Galileo-Programm zu geben. Die **Diensterklärung** für die OSNMA **wird bis Ende 2023** erwartet.

Mit der zweiten Generation von Galileo (**G2G**) werden der **Umfang und die Robustheit** der OSNMA verbessert und die Authentifizierungsfunktion wird um die Authentifizierung von Entfernungen erweitert.

Weiterführende Informationen zur Galileo-OSNMA finden sich in folgenden Dokumenten: [OSNMA User ICD for Test Phase und OSNMA Receiver Guidelines](#) (OSNMA-Nutzer-ICD für die Testphase und OSNMA-Empfängerleitlinien).

3.2.1.2 Weltraumdienstvolumen

Ursprünglich für die Bereitstellung von Ortungs-, Navigations- und Zeitgebungsdiensten für terrestrische Nutzer konzipiert, haben sich **GNSS** auch als **wertvolles Werkzeug für Weltraumanwendungen** bewährt. Die Echtzeitnavigation von Raumfahrzeugen auf der Grundlage von GNSS-Empfängern entwickelt sich zu einer gängigen Technik für erdnahe Umlaufbahnen (LEO) und geostationäre Umlaufbahnen (GEO), die es den **Satelliten** ermöglicht, **ihre Position mithilfe von GNSS selbst zu bestimmen** und so die Abhängigkeit von Bodenstationen zu verringern. Die Ableitung von **Erdbeobachtungsmessungen** aus GNSS-Signalen wird ebenfalls immer üblicher und ergänzt die Liste der etablierten und potenziellen Anwendungen von GNSS im Weltraum.

Angesichts der ständig wachsenden Zahl von Raumfahrzeugen und der kontinuierlichen Entwicklung von GNSS-Weltraumlösungen wird im Rahmen der zweiten Generation von Galileo ein Dienst für Weltraumnutzer – **Galileo-Weltraumdienstvolumen (Space Service Volume, SSV)** angeboten, der sich über drei Regionen erstrecken wird.

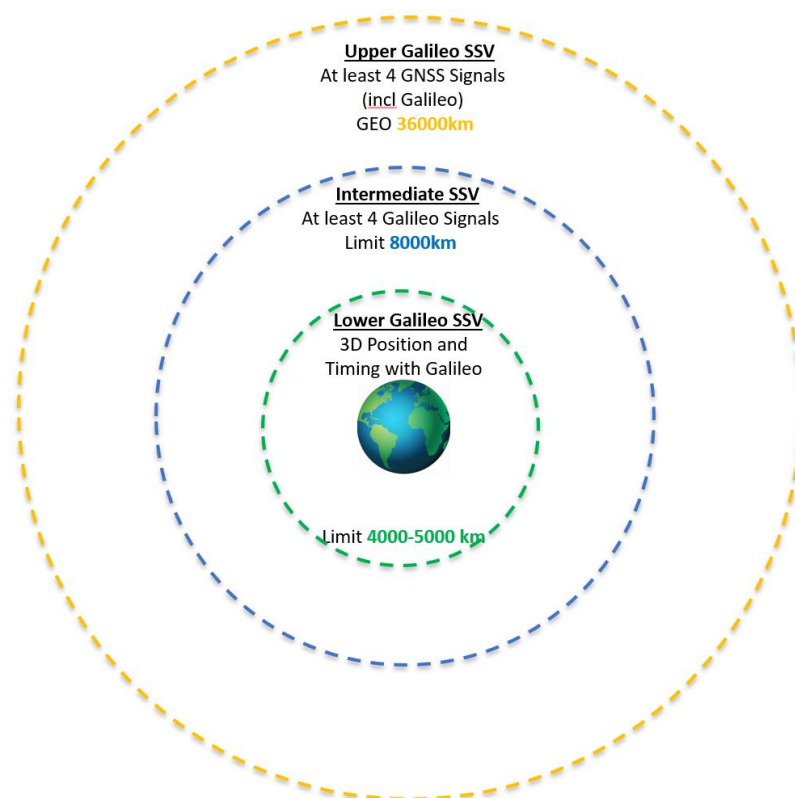


Abbildung 9 – Galileo-Weltraumdienstvolumen: Regionen

Über **Galileo-Weltraumdienstvolumen** wird dank der höheren Umlaufbahnen der Galileo-Satelliten **bis zu einer Höhe von etwa 8000 km** (höher als die 3000 km, die im GPS-SSV definiert sind) ein **autonomer Dienst** bereitgestellt, während für größere Höhen eine GNSS-SSV-Multikonstellationslösung erforderlich ist. Dadurch wird [der Großteil des Leistungsbedarfs der Weltraumnutzer in Bezug auf Ortung und Zeitgebung gedeckt](#).

Darüber hinaus arbeitet die internationale Gemeinschaft an der Definition eines interoperablen GNSS-Weltraumdienstvolumens auf der Grundlage der Ergebnisse der Arbeiten der [Arbeitsgruppe B des Internationalen Ausschusses für GNSS \(ICG\) der Vereinten Nationen](#). Im Rahmen der laufenden Tätigkeiten prüft die Arbeitsgruppe derzeit die Zweckmäßigkeit der Entwicklung von Normen zur Unterstützung der GNSS-Weltraumnutzer.

3.2.2 Hochpräzisionsdienst (HAS)

Galileo ist die erste GNSS-Konstellation, die **weltweit einen hochpräzisen Ortungsdienst** für Anwendungen bereitstellt, die eine höhere Leistung erfordern, als der offene Dienst von Galileo bietet. Der Hochpräzisionsdienst von Galileo basiert auf der Bereitstellung von **PPP-Korrekturen** (Umlaufbahn, Taktgeber, Verzerrungen, atmosphärische Korrekturen) mit einer Höchstgeschwindigkeit von 448 bps pro Galileo-Satellit, der an eine Uplink-Station angeschlossen ist, sodass der Nutzer unter nominalen Nutzungsbedingungen eine Ungenauigkeit der **horizontalen Positionsbestimmung von weniger als 20 cm (95 % Genauigkeit)** erreichen kann.

Der Hochpräzisionsdienst von Galileo umfasst zwei Dienstebenen:

- **Dienstebene 1 (service level 1)** mit **globaler Abdeckung** und hochpräzisen Korrekturen (Umlaufbahnen, Taktgeber) und Verzerrungen (Code und Phase) für Galileo- und GPS-Signale;
- **Dienstebene 2 (SL2)** mit **regionaler Abdeckung** und **SL1-Korrekturen plus atmosphärischen Korrekturen** (zumindest ionosphärische) und möglichen zusätzlichen Verzerrungen.

Neben den Korrekturen des Hochpräzisionsdienst von Galileo über das Weltraumsignal (E6b) ist vorgesehen, dass die **Korrekturen auch über einen terrestrischen Kanal ausgestrahlt** werden, um den Nutzern (sowohl SL1 als auch SL2) eine alternative oder ergänzende Eingabequelle für das Weltraumsignal zu bieten.

Der Hochpräzisionsdienst von Galileo wird in zwei Phasen umgesetzt:

- Erklärung der **ersten Dienste** am 24. Januar 2023: Bereitstellung der Dienstebene 1 mit eingeschränkter Leistung, da nur auf der Verarbeitung von Daten des Galileo-Systems beruhend;
- **vollständiger Dienst** ab 2026: Bereitstellung der Dienstebenen 1 und 2, die die Zielleistung erfüllen.

Tabelle 3 – Leistungsziele für den Hochpräzisionsdienst von Galileo

HAS-Merkmal	Phase 1 (erste Dienste)	Phase 2 (vollständiger Dienst)
Abdeckung	SL1: EU	SL1: Weltweit SL2: EU
Art der Korrekturen	PPP – Umlaufbahn, Taktgeber, Verzerrungen (Code und Phase)	SL1: wie Phase 1 SL2: SL 1 + atmosphärischen Korrekturen
Format der Korrekturen	Offenes Format ähnlich Compact-SSR (CSSR)	Wie Phase 1
Unterstützte Konstellationen und Frequenzen	Galileo E1/E5a/E5b/E6; E5 AltBOC GPS L1/L5; L2C	Wie Phase 1
Horizontale/vertikale Genauigkeit (95 %)	< 20 cm/< 40 cm	Wie Phase 1
Konvergenzzeit	< 300 s	SL1: < 300 s SL2: < 100 s
Verfügbarkeit	> 99 %	Wie Phase 1

Mit der zweiten Generation von Galileo (**G2G**) wird der Hochpräzisionsdienst verbessert, indem zusätzlich zu E6 **Umlaufbahn- und Taktgeberkorrekturen in anderen Bändern** bereitgestellt **und verschiedene Aspekte verbessert werden** (z. B. höhere Bitrate, schnellere Erfassung zusätzlicher GNSS-Konstellationen und kürzere Konvergenzzeit).

Weiterführende Informationen zum Hochpräzisionsdienst von Galileo finden sich in folgenden Programmdokumenten bzw. auf folgender Website: [Galileo HAS SIS ICD](#), [Galileo HAS Info note](#) und [GSC – HAS](#) (Schnittstellenkontrolldokument (ICD) für das Weltraumsignal, HAS-Informationsvermerk und GSC-Website zum HAS).

3.2.3 Kommerzieller Authentifizierungsdienst (CAS)/Signalauthentifizierungsdienst (SAS)

Der kommerzielle Authentifizierungsdienst von Galileo basiert auf der **vollständigen Verschlüsselung des E6C-Signals** und ermöglicht **dem Nutzer eine PVT-Authentifizierung** auf der Grundlage von E6C-verschlüsselten Entfernungangaben und OSNMA-authentifizierten Navigationsdaten. Der Dienst wird in einem halb-unterstützten Modus, als unterstützter CAS (**ACAS**), angeboten.

Das ACAS-Konzept, das die **Autonomie** des Nutzers **zwischen den Serververbindungen** (je nach Nutzer stunden- oder tagelang) ermöglicht, basiert auf der OSNMA und erfordert daher eine lose Synchronisierung des Empfängers mit der Galileo-Systemzeit.

Die Funktion der Entfernungauthentifizierung beruht darauf, dass auf dem Server E6C-Replikat abgerufen werden, die mit einem OSNMA-Schlüssel neu verschlüsselt wurden, anschließend Momentaufnahmen des übertragenen E6C-Signals zu vordefinierten Zeitpunkten gespeichert werden und, sobald der OSNMA-Schlüssel bekannt ist, die E6C-Replikat entschlüsselt werden und die Korrelation mit den Momentaufnahmen durchgeführt wird, um a posteriori authentifizierte Entfernungsmessungen zu erhalten.

Der kommerzielle Authentifizierungsdienst von Galileo wird in zwei Phasen mit folgenden Zielen implementiert:

- **erste Dienste** (ab 2024), wobei die ACAS-Dienste auf den bereits vorhandenen oder in der Entwicklung befindlichen Galileo-Fähigkeiten (E6C-Verschlüsselung, OSNMA) sowie auf den in die Galileo-Diensteinrichtungen integrierten Unterstützungsdiensten beruhen;
- **vollständiger Dienst** (ab 2026) mit Fertigstellung der Bodeninfrastruktur.

Darüber hinaus wird derzeit die Durchführbarkeit eines **eigenständigen CAS** auf der Grundlage von Marktanalysen und der Annahme des ACAS geprüft. Dies würde die Speicherung eines symmetrischen geheimen Schlüssels im Empfänger erfordern und eine Authentifizierung in Echtzeit ermöglichen.

Mit der zweiten Generation von Galileo wird die Leistung dieser Authentifizierungsfunktionen verbessert, und die Bezeichnung wird in „**Signalauthentifizierungsdienst (SAS)**“ geändert.

Weiterführende Informationen zum kommerziellen Authentifizierungsdienst von Galileo finden sich auf der [Website des Europäischen GNSS-Dienstezentrums](#).

3.2.4 Öffentlicher regulierter Dienst (PRS)

Der öffentliche regulierte Dienst von Galileo ist ein **verschlüsselter Navigationsdienst** für staatlich autorisierte Nutzer und sensible Anwendungen, die eine hohe Kontinuität erfordern. Es ist der sicherste der Galileo-Dienste und bietet autorisierten Nutzern **weltweit unbegrenzte und ununterbrochene PNT-Funktionen**, selbst in Krisensituationen.

Der Zugang zu dem Dienst ist **auf die Teilnehmer des Galileo-PRS beschränkt**, d. h. die Mitgliedstaaten, den Europäischen Rat, die Europäische Kommission und den Europäischen Auswärtigen Dienst sowie die Agenturen der Europäischen Union, Drittländer und internationale Organisationen, sofern sie ordnungsgemäß autorisiert wurden. Drittländer und internationale Organisationen können vorbehaltlich des Abschlusses internationaler Abkommen PRS-Teilnehmer werden (die genauen Bedingungen für den Zugang zum Galileo-PRS sind im [Beschluss Nr. 1104/2011/EU](#) festgelegt).

Die **Mitgliedstaaten haben die volle Souveränität über die nationalen Nutzer**, die zum Zugang zum öffentlichen regulierten Dienst von Galileo berechtigt sind, sowie über die Anwendungsfälle und Anwendungsbereiche.

Nur vom [Gremium für die Sicherheitsakkreditierung](#) autorisierte Stellen dürfen **Galileo-PRS-Nutzerempfänger** entwickeln und herstellen. Galileo-PRS-Ausrüstungen und -Technologien unterliegen der Ausfuhrkontrolle.

Der öffentliche regulierte Dienst von Galileo bietet **seit Dezember 2016 erste Dienste** an, unter anderem zu Demonstrationszwecken, zur Unterstützung der Technologieentwicklung im PRS-Nutzersegment und zur Förderung der Nutzerakzeptanz.

Weiterführende Informationen zum öffentlichen regulierten Dienst von Galileo finden sich auf der [GSC-Website zum PRS](#) sowie auf der [Navipedia-Website zum PRS](#).

3.2.5 Notfalldienst

Im Rahmen des Notfalldienstes von Galileo, auch Notfallwarndienst genannt, werden **Warnmeldungen zur Warnung der Bevölkerung vor Naturkatastrophen oder anderen Notfällen** in die Galileo-Signale aufgenommen. Die Galileo-Empfänger, die in verschiedenen Geräten (Smartphones, Smartwatches, tragbaren Geräten, Werbetafeln usw.) installiert sind, empfangen und dekodieren diese Warnmeldungen und zeigen sie auf dem Bildschirm zur sofortigen Information an.

Dieser Dienst bietet den Katastrophenschutzbehörden einen **zusätzlichen Mechanismus** zur Warnung der Bevölkerung und leistet einen unmittelbaren Beitrag zu den Zielen des [Sendai-Rahmens für Katastrophenvorsorge der Vereinten Nationen](#).

Der Notfalldienst von Galileo zeichnet sich durch folgende **Hauptmerkmale** aus:

- weltweite Abdeckung;
- Übertragung über das Galileo-Frequenzband E1 (und künftig auch über das Frequenzband E5);
- unempfindlich gegen Bodenzerstörung, da unabhängig von terrestrischen Kommunikationsnetzen;
- Abdeckung mehrerer Gefahren (z. B. Tornados, Erdbeben, Nuklearkatastrophen, Terroranschläge);
- frühzeitiges Erreichen der Bevölkerung (d. h. 2–3 Minuten), unabhängig von der Größe des Gebiets;
- Angabe des Zeitpunkts des Beginns des Notfalls, der voraussichtlichen Dauer und Hinweise für die Bürgerinnen und Bürger;
- nur relevante Zielgruppen aufgrund des in der Nachricht kodierten Geostandorts;
- Untersuchung einer interoperablen Lösung in Zusammenarbeit mit Japan und Indien.

Das **Betriebskonzept** des Notfalldienstes von Galileo ist wie folgt (siehe nachstehende Abbildungen):

- Die autorisierten nationalen Notrufzentralen erzeugen eine Warnmeldung und senden sie über eine spezielle gesicherte Schnittstelle an das Galileo-System.
- Das Galileo-System erzeugt eine Notfallwarnmeldung mit einer Ellipse zur Festlegung des Zielgebiets. Die Nachricht wird auf zwei Galileo-Satelliten hochgeladen und über die Galileo-Navigationsnachrichten zur Erde gesendet. Zudem wird die Warnmeldung zur weiteren Verwendung sowie zu Überwachungs-/Archivierungszwecken auf einem Server zur Verfügung gestellt.
- Das Nutzersegment, das mit einem mit dem Notfalldienst von Galileo kompatiblen Gerät ausgestattet ist, empfängt, dekodiert und zeigt die Notfallmeldung an. Die Nachricht wird nur den Nutzern angezeigt, die sich im Notfallgebiet befinden.

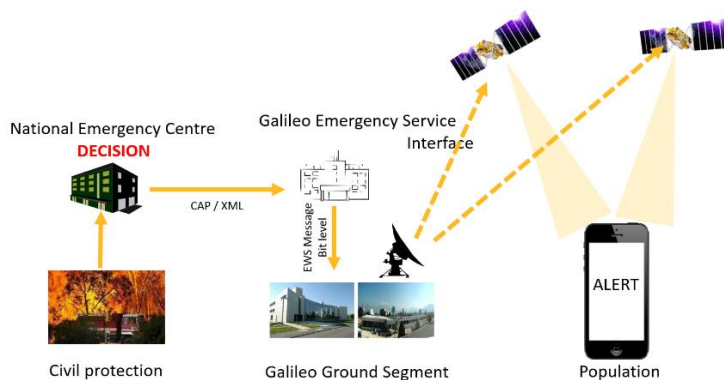


Abbildung 10 – Betriebskonzept

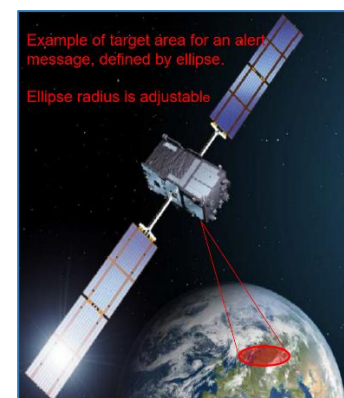


Abbildung 11 – Zielgebiet als Ellipse

Die **öffentliche Demonstrationsphase** soll **2023** beginnen, und der **Notfalldienst** von Galileo, der im Rahmen der zweiten Generation von Galileo weiterentwickelt wird, wird ab **Ende 2024** aktiv sein.

3.2.6 Zeitgebungsdienst

Obwohl es sich um einen kleinen Markt handelt, sind Zeitgebungsdienste **für kritische Infrastrukturen** wie Telekommunikation, Energie und Finanzen **von größter Bedeutung**. Zeitgebungsdienste werden auch in vielen anderen Bereichen wie der Luftfahrt, der Metrologie, der Fernerkundung und der Atmosphärenforschung genutzt.

Der Zeitgebungsdienst von Galileo wird eine **exakte und robuste Bezugszeit** bereitstellen und **die koordinierte Weltzeit umsetzen**, wodurch die Entwicklung von Zeitgebungsanwendungen auf der Grundlage von Galileo sowie die Verwendung in kritischen Anwendungen erleichtert werden.

Der offene Dienst von Galileo ermöglicht bereits die Zeitstempelung eines Ereignisses in Bezug auf die Galileo-Systemzeit und die koordinierte Weltzeit (UTC). Darüber hinaus können **Zeitquellen** anhand von [Zeitverteilungsmethoden](#) untereinander (und mit einem absoluten Zeitbezug) synchronisiert werden.

Durch den Zeitgebungsdienst von Galileo werden die derzeitigen Funktionen des offenen Dienstes von Galileo erweitert, um den Bedürfnissen der Nutzer besser gerecht zu werden. Der Zeitgebungsdienst zeichnet sich durch die folgenden **Hauptmerkmale** aus:

- Synchronisierung mit höherer Genauigkeit durch die Galileo-Systemzeit im Vergleich zu anderen GNSS-Systemen. Die derzeitige typische Genauigkeit der Zeitbestimmung ist besser als 5 ns (95 %) und wird durch die Entwicklung der zweiten Generation von Galileo beibehalten und sogar noch verbessert werden;
- erhöhte Robustheit des Zeitgebungsdienstes von Galileo und mehr Vertrauen in diesen, da es sich um das erste GNSS handelt, das
 - von der Authentifizierung der Galileo-Navigationsnachrichten profitiert;
 - spezielle Kennzeichen für Nutzer des Zeitgebungsdienstes von Galileo bereitstellt;
 - eine spezielle Überwachung mit verschiedenen Überwachungsstufen durchführt.

Ergänzend zum Zeitgebungsdienst von Galileo wird eine **europäische Norm für GNSS-Zeitempfänger** entwickelt. Dies wird die erste Norm für Zeitempfänger sein und zu einem grundlegenden Element für die Gewährleistung der End-to-End-Nutzerleistung des Zeitgebungsdienstes von Galileo werden.

Der Zeitgebungsdienst von Galileo wird in der zweiten Generation von Galileo ab **2026** zur Verfügung stehen.

3.2.7 Beitrag zum Such- und Rettungsdienst (SAR)

Die Galileo-Unterstützung für den Such- und Rettungsdienst (SAR) ist der **Beitrag Europas zu der internationalen kooperativen [COSPAS-SARSAT-Initiative](#)** zu humanitären Such- und Rettungsaktionen. Such- und Rettungsdienste erkennen und orten Notfunkbaken, die von Personen, Luftfahrzeugen oder Schiffen in Not aktiviert wurden, und leiten diesen Notruf an die Behörden weiter, die die Rettungsmaßnahmen einleiten. Der Such- und Rettungsdienst von Galileo verkürzt die Zeit, die benötigt wird, um eine Notfunkbake nach ihrer Aktivierung zu erkennen, erheblich (**< 10 Minuten**) und erhöht die Lokalisierungsgenauigkeit (Unsicherheitsradius **< 5 km** und in Zukunft **< 100 m**).

In Bezug auf Anlagen des Boden- und des Weltraumsegments leistet der Such- und Rettungsdienst von Galileo mit mehr als 24 SAR-Transpondern in der Umlaufbahn⁴ und vier **MEOLUT-Bodenstationen**, die den Notruf an die SAR-Behörden weiterleiten, den größten Beitrag zur im Rahmen von COSPAS-SARSAT geschaffenen Satellitenkonstellation MEOSAR (MEOSAR steht dabei für „Medium Earth Orbit Search and Rescue system“ – SAR-System in der mittleren Erdumlaufbahn). Der Such- und Rettungsdienst von Galileo umfasst zwei Dienste:

- Im Rahmen des **Sendekanalendienstes von Galileo** nehmen die Galileo SAR-Transponder die von Notfunkbaken im 406-MHz-Band ausgesendeten Signale auf und senden diese Informationen im L-Band bei 1544,1 MHz an spezielle Bodenstationen (MEOLUT). Diese von den Galileo-SAR-Nutzlasten gesendeten Downlink-Signale werden von den MEOLUT genutzt, um den Standort der Funkbake zu bestimmen, der dann über spezielle COSPAS-SARSAT-Missionskontrollzentren an die Ersthelfer weitergeleitet wird.

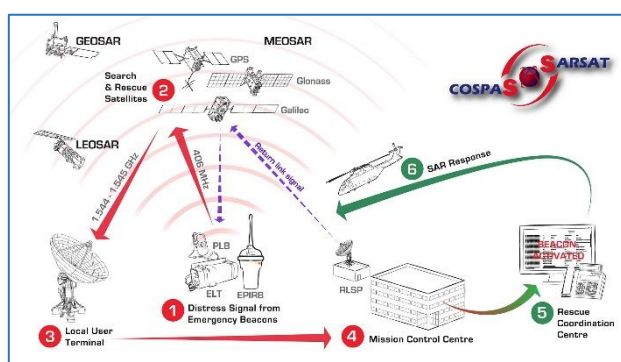


Abbildung 12 – Betriebskonzept

- Der **Rückkanaldienst (RLS) von Galileo** ermöglicht es, über das Galileo-L1-Navigationssignal eine Bestätigungsnachricht an den Absetzer des Notrufs zu senden, aus der deutlich wird, dass der Notruf erkannt und lokalisiert wurde. Er bietet mehrere zusätzliche Funktionen wie die **Fernaktivierung von Funkbaken**, die es autorisierten Nutzern (Luftfahrzeugbetreibern, Seenotrettungsleitstellen) ermöglicht, eine Notfunkbake aus der Ferne zu aktivieren, wenn z. B. ein Luftfahrzeug verschwunden oder ein Schiff überfällig ist. Diese Funktion für Luftfahrtanwendungen wurde durch das [Dokument ED-277 der European Organization for Civil Aviation Equipment](#) (Europäische Organisation für Zivilluftfahrt-Ausrüstung, EUROCAE) genormt.

Ferner wird derzeit die Möglichkeit einer **Zweiweg-Sprechfunkverbindung** über den Rückkanaldienst geprüft. Diese Funktion wird es den Rettungsdiensten ermöglichen, Nachrichten über vorcodierte Fragen und Antworten auszutauschen und (Verhaltens-)Anweisungen an die mit COSPAS-SARSAT-Funkbaken ausgestatteten Nutzer in Not zu senden. In ähnlicher Weise würde ein künftiger **Notruf-Positionsaustauschdienst** es den Rettungsdiensten ermöglichen, die Position des Absetzers des Notrufs mit anderen Nutzern in der Nähe zu teilen und so schnellere Rettungsmaßnahmen zu ermöglichen.

Das [Dokument mit der Dienstdefinition zum Such- und Rettungsdienst von Galileo](#) enthält eine Beschreibung der Merkmale und der Leistung des Dienstes, während in den [vierteljährlichen Leistungsberichten für den Such- und Rettungsdienst von Galileo](#) die Leistung des Such- und Rettungsdienstes von Galileo in Bezug auf die im Dokument mit der Dienstdefinition festgelegten Zielwerte für das Mindestleistungsniveau dargelegt ist.

Weiterführende Informationen zu diesem Thema sind im [SAR-SDD](#) auf der [GSC-Website zum Such- und Rettungsdienst](#) erhältlich.

⁴ Im Jahr 2022 verfügte Russland über zwei SAR-Transponder, während die USA ihren ersten einsatzfähigen L-Band-Such- und Rettungssender ab dem GPSIII-Block B haben werden – die derzeitigen US-Transponder senden nicht in dem von COSPAS-SARSAT zugewiesenen Frequenzband.

3.2.8 Beitrag zu sicherheitskritischen Diensten

Galileo trägt zu standardisierten **Integritätsüberwachungsdiensten oder sicherheitskritischen Diensten** bei, indem Signale im offenen Dienst und spezielle Informationen bereitgestellt werden, die mit [Augmentationssystemen](#) kombiniert werden:

- satellitengestützte Augmentationssysteme (SBAS), z. B. EGNOS;
- luftfahrzeuggestütztes Augmentationssysteme (ABAS), z. B. autonome empfängerseitige Integritätsüberwachung (receiver autonomous integrity monitoring, RAIM) und moderne autonome empfängerseitige Integritätsüberwachung (ARAIM);
- bodengestützte Augmentationssysteme (GBAS).

Die Nutzung von GNSS-Signalen sowie der entsprechenden Augmentationsdienste ist eine **grundlegende Technologie in der Luftfahrt** und wurde von der Internationalen Zivilluftfahrt-Organisation (ICAO) genormt. Die ICAO plant Weiterentwicklungen der derzeitigen Navigationssysteme unter Nutzung der Vorteile der Multikonstellationsumgebung mit Zweifrequenzsignalen (in den Bändern E1 und E5a).

Die **ARAIM** ist die Weiterentwicklung der derzeitigen **RAIM**, die auf GPS und einer einzigen Frequenz basiert, zu einem Multikonstellations- und Mehrfrequenzsystem.

Das ARAIM-Konzept wurde von der Arbeitsgruppe C (EU/USA) entwickelt und später auf internationaler Ebene im Rahmen des Navigation System Panel (NSP) der ICAO formalisiert. Während der Entwicklung des Konzepts veröffentlichte die Arbeitsgruppe C drei Berichte, von denen der letzte der [Milestone 3 Report](#) (Bericht zum Etappenziel 3) ist.

Die Einführung der ARAIM erfolgt schrittweise:

- Zunächst wird die **horizontale ARAIM (H-ARAIM)** die Streckennavigation unterstützen und in die erste Version der Mindestbetriebsleistungsnorm (MOPS) für Zweifrequenz-Multikonstellationen (DFMC) aufgenommen.
- Anschließend wird die **vertikale ARAIM (V-ARAIM)** die vertikale Navigation für den LPV-200-Betrieb unterstützen.

Tabelle 4 – Hauptmerkmale der RAIM gegenüber der V-ARAIM

	RAIM	ARAIM
Betrieb	bis RNP 0,1	LPV 200
Gefahrenkategorie	Sehr gefährlich	Gefährlich
Signale	L1CA	L1CA/E1-L5/E5a
Bedrohungsmodell	Nur ein Fehler	Mehrfache Fehler
Nominales Fehlermodell	Gaußsche, mit Bound-Daten von GPS	Gaußsche + nominale/maximale Abweichung, validiert durch unabhängige Bodenüberwachung
Konstellationen	GPS	Multikonstellation

Der ARAIM-Betrieb wird vertikale Anflüge bis CAT I/LPV-200 und damit Redundanz in Gebieten ermöglichen, die von SBAS bedient werden. Er wird auch über eine **globale Abdeckung** verfügen, was die arktische Navigation unterstützen kann.

Durch die notwendigen Verpflichtungen im offenen Dienst, die sich in der Galileo-Programmdokumentation (Dokument mit der Dienstdefinition für den offenen Dienst, Schnittstellenkontrolldokument für das Weltraumsignal) sowie in den Luftfahrtnormen (Richtlinien und Empfehlungen (SARPS) der ICAO) widerspiegeln, leistet Galileo, soweit erforderlich, formelle Unterstützung für die ARAIM.

3.2.9 Beitrag zu Weltraumwetterinformationen

Weltraumwetterereignisse, die mit der Sonnenaktivität und der Wechselwirkung mit der Erdmagnetosphäre zusammenhängen, können sowohl boden- als auch weltraumgestützte Infrastrukturen beeinträchtigen, was zu **Unterbrechungen oder Leistungsminderungen** von Satellitendiensten auf der ganzen Welt führen kann und manchmal auch Schäden an Geräten und Systemen verursacht.

GNSS können durch elektromagnetische Phänomene beeinträchtigt werden, insbesondere durch solche, die in der Ionosphäre auftreten. Die Auswirkungen auf die GNSS-Navigation können eine PNT-Beeinträchtigung, eine vorübergehende Störung der Positions- und Zeitbestimmung oder den vollständigen Verlust der Sichtbarkeit eines oder mehrerer Satellitensignale umfassen. In Anbetracht der zunehmenden Abhängigkeit von der Satellitennavigation wird es immer wichtiger, potenzielle Beeinträchtigungen vorherzusehen und die Nutzer darüber zu informieren bzw. darauf aufmerksam zu machen.

EGNOS bietet bereits heute eine Echtzeit-Ionosphärenmodellierung für Europa, einschließlich VTEC-Daten (Gesamtelektronengehalt entlang der Vertikalen) und deren Begrenzung, während **Galileo** ein weltweites Ionosphärenmodell in Echtzeit liefert, das viel genauer ist als das Klobuchar-Modell in der GPS-Navigationsnachricht.

Darüber hinaus wird Galileo eine **integrierte Funktion zur Überwachung und Vorhersage** des Weltraumwetters bieten, die Folgendes ermöglicht:

- Quantifizierung, Vorhersage und Prognose potenzieller Auswirkungen der GNSS-Leistung der Endnutzer durch Überwachung und Prognose
 - von solaren und geomagnetischen Indizes wie F10.7, R12, Kp, Ap, Dst als Parameter zur Charakterisierung von Sonnenereignissen und des erwarteten Teilchenflusses zur Erde;
 - von ionosphärischen Aktivitätsparametern wie dem Gesamtelektronengehalt und seinen Derivaten sowie von Szintillationsereignissen;
 - der GNSS-Leistung auf Nutzerebene, z. B. Fehler bei der Positions- und Zeitbestimmung, sowie der Wahrscheinlichkeit eines Aufschaltungsausfalls;
- rechtzeitige Warnung der GNSS-Nutzer vor bevorstehenden schwerwiegenden Ereignissen, die zu einer Beeinträchtigung oder Unterbrechung der GNSS-Dienste führen können, um eine rechtzeitige Reaktion auf die Gefahr und die Aktivierung von Abhilfestrategien zu ermöglichen.

Bei diesem Dienst werden **große Mengen externer Daten** verarbeitet, die wiederum in die Überwachungs- und Prognosealgorithmen einfließen. Zu den relevanten Sensorkategorien gehören geodätische Netze (z. B. IGS, EUREF), Sonnen- und Heliosphärenmissionen, weltraumgestützte Sensoren für Radio-Okkultationsdaten-Methoden, andere bodengestützte Sensoren oder Netze (z. B. Ionosonden) sowie interne Daten der Galileo-/EGNOS-Systeminfrastruktur (z. B. Galileo-Sensorstationen).

Weltweit gibt es mehrere universelle Plattformen zur Überwachung des Weltraumwetters, die Bulletins für eine Vielzahl von Weltraumnutzern bereitstellen, die im Vorfeld ihrer Operationen über das Weltraumwetter informiert werden müssen: bemannte Weltraumflüge, Trägerraketen, Weltraumüberwachung, usw. Dieser Galileo-Dienst wird als reine **Galileo-Plattform eingesetzt, die ihren GNSS-Nutzern Leistungsprognosen liefert**.

Im Rahmen des Galileo-Programms wird diese Funktion derzeit als webbasierte Plattform in das Portal des Galileo-Dienstezentrums eingeführt.

Die Erklärung der ersten Dienste soll **2024** erfolgen, und der Fahrplan sieht regelmäßige Weiterentwicklungen vor, um der Verbesserung der Vorhersagealgorithmen oder neuen Methoden der Datenerhebung Rechnung zu tragen.

3.2.10 Fahrplan für Galileo-Dienste

Figure 13 liefert einen Überblick über die Ziele der Europäischen Kommission für die verschiedenen Galileo-Dienste im Zeitraum 2023–2025.

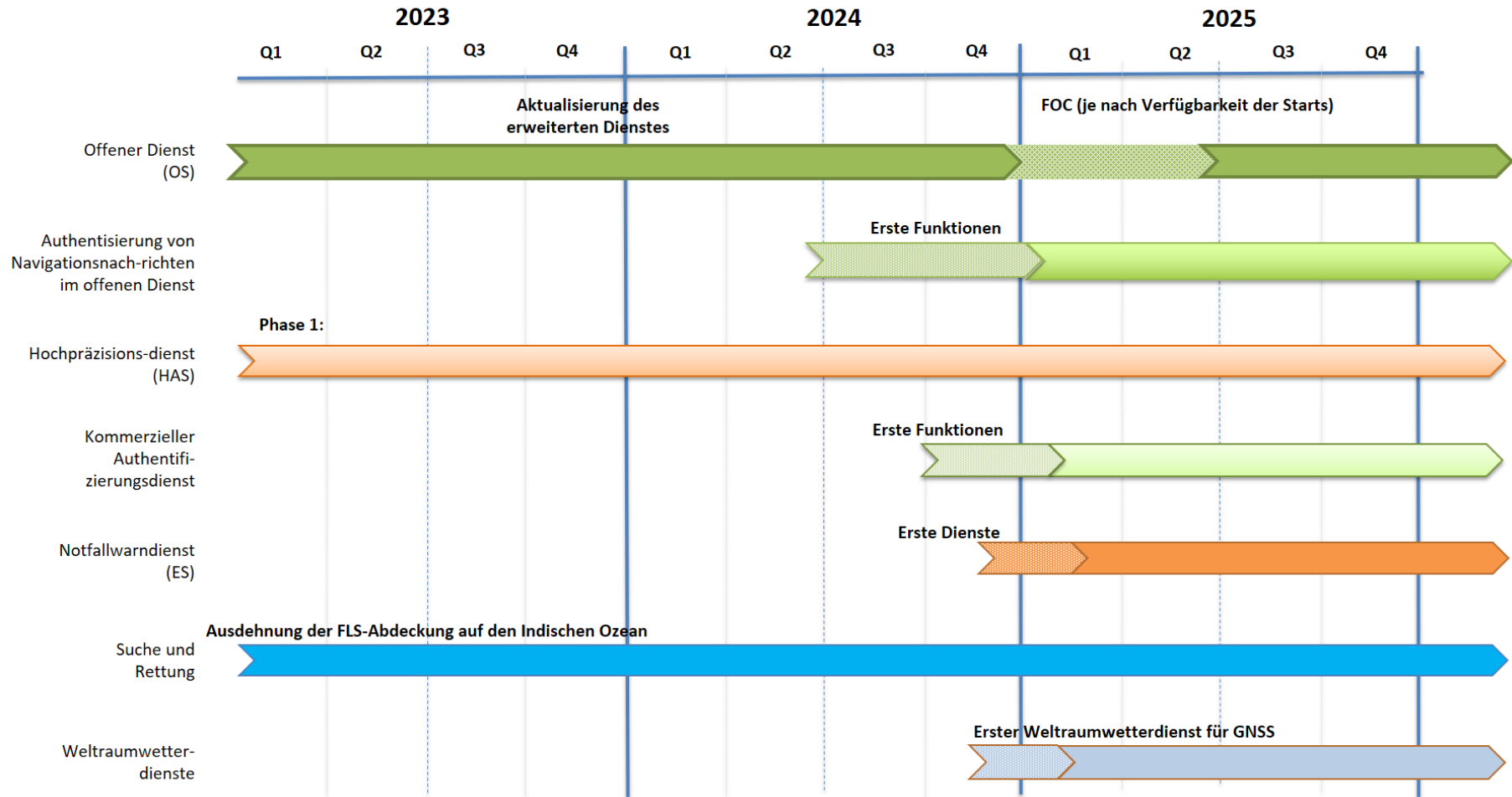


Abbildung 13 – Fahrplan für Galileo-Dienste

3.3 EGNOS-Dienste

EGNOS (Europäische Augmentation des geostationären Navigationssystems) ist der **europäische satellitengestützte Augmentationsdienst (SBAS)**, der die Satellitennavigationsdienste des GPS (und künftig von Galileo) ergänzt.

EGNOS besteht aus einem Weltraumsegment (geostationäre Satelliten), einem Bodensegment (Referenzstationen, Hauptstationen und Sendestationen), einem Nutzersegment (Nutzerempfänger, die die SBAS-Signale verarbeiten) und einem Unterstützungssegment (zur Unterstützung der Erbringung der SBAS-Dienste).

Die EGNOS-Referenzstationen, die geografisch vorwiegend über Europa verteilt sind, empfangen GNSS-Signale, die sie an die Hauptstationen weiterleiten. Da die Standorte der Referenzstationen genau bekannt sind, können die Hauptstationen weiträumige Korrekturen genau berechnen. Diese Korrekturen werden an spezielle Stationen zur Sendung an die EGNOS-Satelliten übertragen. Die Satelliten leiten die Korrekturen dann an GNSS-Empfänger im gesamten SBAS-Abdeckungsgebiet weiter.

Zu den von EGNOS bereitgestellten Diensten gehören:

- ein **offener Dienst (OS)**, für den Nutzer keine direkten Gebühren entrichten und der Ortungs- und Synchronisierungsinformationen bereitstellt, die hauptsächlich für von Verbrauchern genutzte Massen Anwendungen der Satellitennavigation bestimmt sind;
- der **Datenübertragungsdienst (EDAS)**, für den Nutzer keine direkten Gebühren entrichten und der Ortungs- und Synchronisierungsinformationen bereitstellt, die vor allem für Satellitennavigationsanwendungen für professionelle oder kommerzielle Zwecke bestimmt sind; dieser Dienst bietet eine bessere Leistung und liefert Daten mit einem höheren Mehrwert als der offene Dienst von EGNOS;
- einen **sicherheitskritischen Dienst (SoL)**, für den Nutzer keine direkten Gebühren entrichten und der mit hoher Kontinuität, Verfügbarkeit und Genauigkeit Ortungs- und Zeitsynchronisierungsinformationen bereitstellt, darunter auch Integritätswarmmeldungen an Nutzer bei einem Ausfall bei Galileo oder einem anderen GNSS oder bei einem von Galileo oder einem anderen GNSS gesendeten Toleranzüberschreitungs signal, die von EGNOS im Abdeckungsgebiet verstärkt werden, und der in erster Linie für auf Sicherheit angewiesene Nutzer – insbesondere für Flugsicherungsdienste gemäß den ICAO-Normen im Bereich der zivilen Luftfahrt oder auch in anderen Verkehrsbereichen – bestimmt ist.

Die **EGNOS-Dokumente mit der Dienstdefinition (SDD)** für den [offenen Dienst](#), den [Datenübertragungsdienst](#) und den [sicherheitskritischen Dienst](#) enthalten eine Beschreibung der Merkmale und der Leistung der EGNOS-Dienste.

Die [monatlichen EGNOS-Leistungsberichte](#) liefern detaillierte Informationen über die Leistung des offenen Dienstes, des Datenübertragungsdienstes und des sicherheitskritischen Dienstes in Bezug auf die in den jeweiligen Dokumenten mit der Dienstdefinition festgelegten Zielwerte für das Mindestleistungsniveau.

Die derzeitigen EGNOS-Dienste (EGNOS V2) bieten eine Verbesserung des GPS-L1-Signals.

Durch die zweite Generation von EGNOS (EGNOS V3) werden die GPS- und Galileo-L1- und -L5-Signale erweitert. Die **technischen und betrieblichen Spezifikationen für EGNOS V3** sind in einem [Durchführungsbeschluss der Kommission](#) festgelegt.

Weiterführende Informationen zu den einzelnen Diensten finden sich in den nächsten Abschnitten sowie auf der [Website des EGNOS-Diensteanbieters](#) und in den jeweiligen Dokumenten mit der Dienstdefinition.

3.3.1 Offener Dienst (OS) von EGNOS

Der offene Dienst von EGNOS, der seit dem **1. Oktober 2009** verfügbar ist, bietet **Ortungs- und Zeitgebungsdienste** für Nutzer von Einzelfrequenzen, die mit einem SBAS-kompatiblen Empfänger ausgestattet sind.

Das Hauptziel des offenen Dienstes von EGNOS besteht in der **Verbesserung der erreichbaren Genauigkeit der GNSS-Positionsbestimmung** durch Erhöhung der Entfernungsgenauigkeit der GNSS-Signale. Eine solche Erhöhung der Genauigkeit ist möglich, da EGNOS verschiedene Fehler bei der GNSS-Entfernungsmessung korrigiert: Taktgeber oder Umlaufbahnen der Satelliten oder ionosphärische Effekte. Darüber hinaus kann EGNOS auch Verzerrungen erkennen, die die von GNSS übertragenen Signale beeinträchtigen, und verhindern, dass die Nutzer gestörte (Status „unhealthy“) oder irreführende Signale verfolgen, die zu einer ungenauen Positionsbestimmung führen könnten.

Zu den typischen **Leistungen** des offenen Dienstes von EGNOS für die EU-Gebiete gehören eine horizontale und vertikale Genauigkeit von besser als 3 m bzw. 4 m (95 %) und eine Genauigkeit der Zeitbestimmung von besser als 20 ns (3 Sigma) für mehr als 99 % der Zeit.

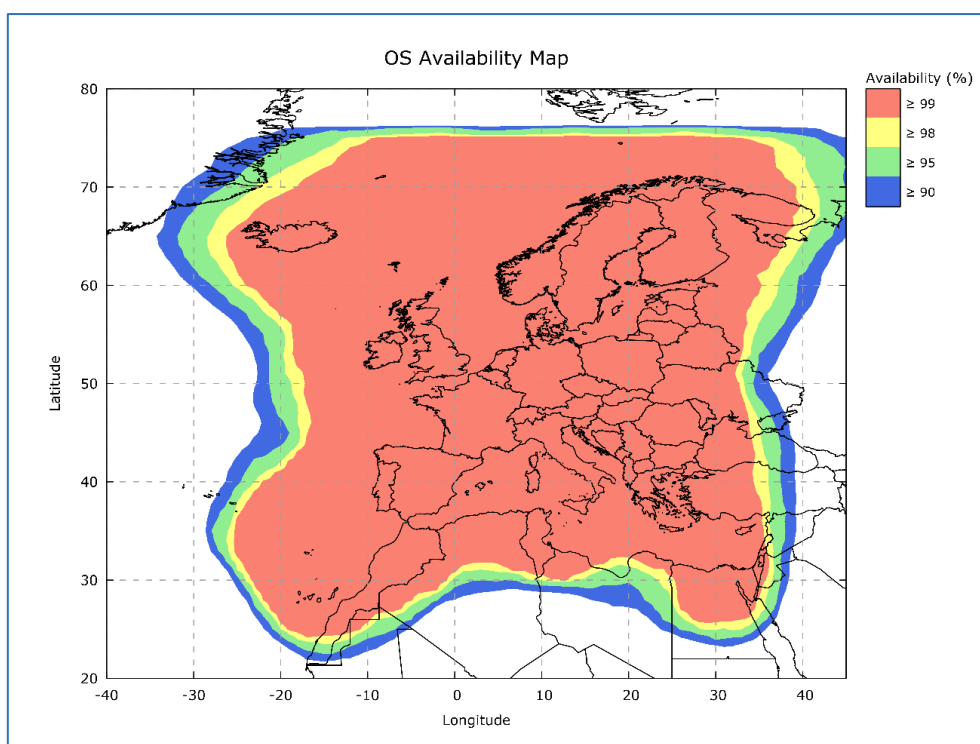


Abbildung 14 – Verfügbarkeit des offenen Dienstes von EGNOS (Quelle: [Dokument mit der Dienstdefinition für den offenen Dienst von EGNOS](#))

Der offene Dienst von EGNOS wird für **nicht sicherheitskritische Zwecke** genutzt (d. h. das Fehlen oder die Unrichtigkeit von Informationen des offenen Dienstes von EGNOS kann keine direkten oder indirekten Personenschäden, einschließlich Körperverletzungen oder Tod, verursachen).

Hauptsächlich **genutzt** wird der offene Dienst von EGNOS in der Präzisionslandwirtschaft, in Verkehrsanwendungen wie dem See-, Schienen- oder Straßenverkehr und im Allgemeinen von all jenen, die an einer besseren Genauigkeit der Positionsbestimmung interessiert sind.

3.3.2 Sicherheitskritischer Dienst (SoL) von EGNOS

Der sicherheitskritische Dienst (SoL) von EGNOS bietet allen SoL-Nutzergemeinschaften, die **verbesserte und garantierte Leistungs- und Integritätswarninformationen** benötigen, das strengste Leistungsniveau für Weltraumsignale.

Er ist auf **sicherheitskritische Verkehrsanwendungen** zugeschnitten und wird heute für den Luftverkehr und in Zukunft auch für den Seeverkehr und andere Bereiche bereitgestellt.

3.3.2.1 Sicherheitskritischer Dienst von EGNOS für den Luftverkehr

Der seit dem **2. März 2011** verfügbare sicherheitskritische Dienst von EGNOS soll in erster Linie der Unterstützung des Flugbetriebs in der Zivilluftfahrt bis zu den Minima für Landeanflugverfahren mit vertikaler Führung (localiser performance with vertical guidance, LPV) dienen.

Zwei Dienststufen des sicherheitskritischen Dienstes von EGNOS ermöglichen den folgenden SBAS-basierten Betrieb in Übereinstimmung mit [ICAO-SARP Anhang 10 Band I](#):

- Nichtpräzisionsanflugbetrieb (non-precision approach, NPA) und sonstiger Flugbetrieb zur Unterstützung anderer PBN-Navigationsspezifikationen als RNP APCH, nicht nur für Anflüge, sondern auch für andere Flugphasen;
- Anflugbetrieb mit vertikaler Führung (APV-I) zur Unterstützung der PBN-Navigationsspezifikation RNP APCH bis zu LPV-Minima von bis zu 250 ft;
- Präzisionsanflugbetrieb der Kategorie I mit einer vertikalen Alarmgrenze (VAL) von 35 m zur Unterstützung der PBN-Navigationsspezifikation RNP APCH bis zu LPV-Minima von bis zu 200 ft.

Für die betriebliche Nutzung des sicherheitskritischen Dienstes von EGNOS kann eine besondere Autorisierung der zuständigen Zivilluftfahrtbehörden erforderlich sein.

Der sicherheitskritische Dienst von EGNOS ist für jeden Nutzer zugänglich, der mit einem **EGNOS-zertifizierten Empfänger** ausgestattet ist, der der SBAS-Mindestbetriebsnorm (MOPS) [DO-229](#)⁵ der Funktechnischen Kommission für die Luftfahrt (RTCA) entspricht, und sich innerhalb des entsprechenden Gebiets des sicherheitstechnischen Dienstes von EGNOS befindet, das der Flugphase entspricht, in der der Dienst genutzt wird (wie im Dokument mit der Dienstdefinition für den sicherheitskritischen Dienst von EGNOS angegeben).

Das Signal im sicherheitskritischen Dienst von EGNOS deckt auch Gebiete außerhalb der EU ab. In diesem Fall liegt die Autorisierung und Sicherheitsaufsicht für die Nutzung von EGNOS in der Zivilluftfahrt in der alleinigen Verantwortung des jeweiligen Drittlandes. Die **EU unterstützt die betriebliche Nutzung von EGNOS-basierten Verfahren** in Drittländern mit einem dem einheitlichen europäischen Luftraum gleichwertigen Sicherheitsniveau, sofern ein Abkommen zwischen der EU und dem Drittland über die Nutzung des sicherheitskritischen Dienstes von EGNOS besteht.⁶

Die typische **Leistung** des sicherheitskritischen Dienstes von EGNOS beinhaltet eine Verfügbarkeit des NPA-Dienstes von über 99,9 % für den europäischen Luftraum und von über 99 % für die APV-I- und LPV-200-Dienste (mit Ausnahme der Azoren und teilweise einiger Teile der Kanarischen Inseln sowie Zyperns und Nordskandinaviens).

⁵ RTCA MOPS DO 229 (Revisionen C, D Änderung 1 oder E).

⁶ Anfang 2023 wurden in den folgenden Nicht-EU-Staaten EGNOS-basierte Operationen durchgeführt: Norwegen, Schweiz, Vogtei Guernsey, Vogtei Jersey, Island, Serbien und Montenegro.

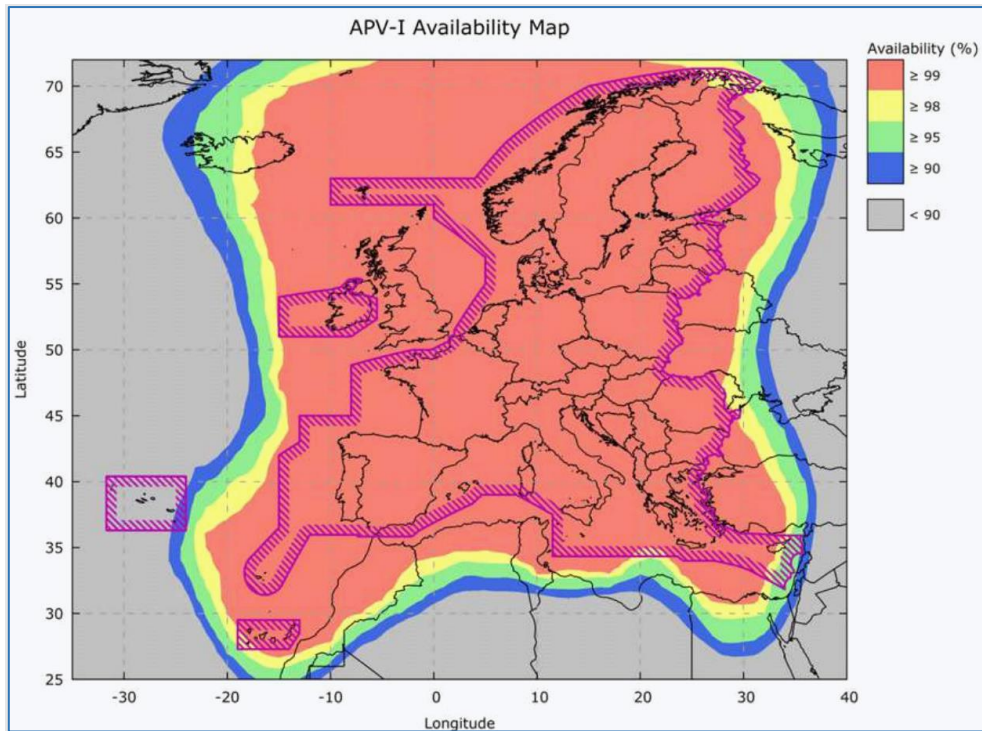


Abbildung 15 – Verfügbarkeit des sicherheitskritischen Dienstes von EGNOS (Quelle: [Dokument mit der Dienstdefinition für den sicherheitskritischen Dienst von EGNOS](#))

EGNOS V3 (d. h. die nächste EGNOS-Generation) wird verbesserte Dienste nach folgendem Umsetzungskonzept bereitstellen:

- **EGNOS v3.1** (Inbetriebnahme vor 2030) zielt auf die **vollständige Einhaltung der ICAO-Anforderungen in allen EU-Gebieten** bei der Nutzung von GPS-L1-Signalen ab.
- **EGNOS v3.2** (Inbetriebnahme etwa 2030) hat Folgendes zum Ziel:
 - Bereitstellung von DFMC-Diensten (Zweifrequenz L1/L5, Multikonstellation GPS/Galileo) mit erhöhter Verfügbarkeit von 99,9 % für die LPV-200-Dienststufe und einer neuen Dienststufe, die auf VAL = 10 m abzielt, was die Genehmigung zusätzlicher operativer Fähigkeiten ermöglichen kann;
 - Ausweitung der GPS-L1-Legacy-Dienste auf die südlichen⁷ und östlichen⁸ von der Europäischen Nachbarschaftspolitik erfassten Gebiete.

Darüber hinaus wird die **Authentifizierung der SBAS-Nachrichten** derzeit in die DFMC-SBAS-Norm aufgenommen, wodurch die Resilienz von DFMC-SBAS-Diensten erhöht wird.

⁷ Algerien, Ägypten, Israel, Jordanien, Libanon, Libyen, Marokko, Palästina, Tunesien.

⁸ Armenien, Aserbaidshan, Belarus, Georgien, Moldau und Ukraine.

3.3.2.2 Sicherheitskritischer Dienst von EGNOS für den Seeverkehr

Die Bereitstellung von EGNOS-Diensten für Nutzer im Seeverkehr erfolgt in drei Phasen:

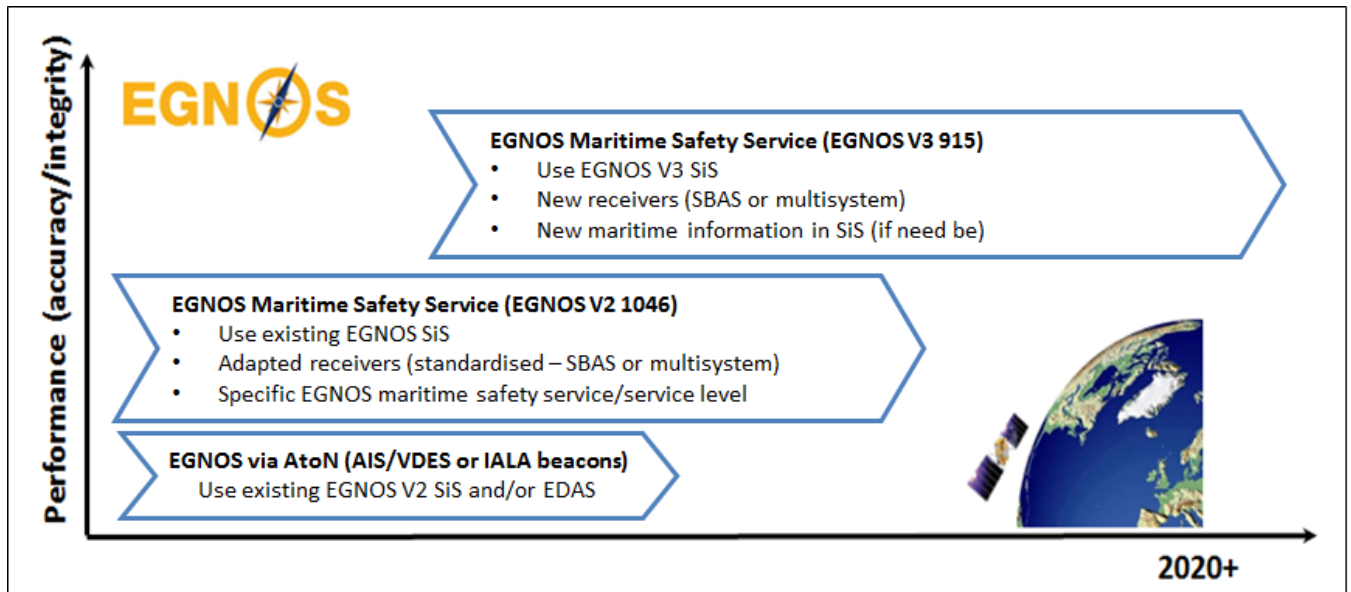


Abbildung 16 – Umsetzungsphasen des sicherheitskritischen Dienstes von EGNOS für den Seeverkehr

- Phase 1: Übermittlung von EGNOS-Korrekturen über bestehende Navigationshilfen (AtoN)**
 Der derzeitige sicherheitskritische L1-Dienst von EGNOS wird als Quelle für die differenziellen Korrekturen verwendet, die über die bestehenden Funkbaken des Internationalen Verbands der Seezeichenverwaltungen (IALA) und AIS-Stationen (AtoN) gemäß den [IALA-Richtlinien G1129 „The retransmission of SBAS corrections using MF radiobeacon and AIS“](#) (Weiterübertragung von SBAS-Korrekturen mithilfe von Mittelfrequenz-Funkbaken und AIS) übertragen werden.
- Phase 2: EGNOS-L1-Dienst für den Seeverkehr + spezielle L1-Empfänger**
 Der derzeitige sicherheitskritische L1-Dienst von EGNOS wird auf Nutzer im Seeverkehr zugeschnitten, indem die folgenden **zusätzlichen Informationen** bereitgestellt werden:
 - Weltraumsignal-Verpflichtungen in Bezug auf die Reichweite (Umlaufbahnen + Taktgeber) und ionosphärische Fehler;
 - Integritätswarnungen (Systemwarnungen, Satellitenwarnungen, Ionosphärenwarnungen);
 - Informationen über die Sicherheit im Seeverkehr zur Mitteilung geplanter/ungeplante Ausfälle.
 Darüber hinaus wird derzeit eine **IEC-Prüfnorm für SBAS in schiffsgestützten Empfängern** ([IEC 61108-7](#)) entwickelt, die die Erlangung der Empfänger-Typenbescheinigung für die Verarbeitung dieses EGNOS-L1-Dienstes für den Seeverkehr ermöglichen wird.
 Dieser Dienst wird von schiffsgestützten Empfängern genutzt, um eine Navigationslösung zu berechnen, die den betrieblichen Anforderungen der [IMO-Entscheidung A.1046](#) für die Seeschifffahrt in Meeresgewässern, Hafeneinfahrten, Hafenzufahrten und Küstengewässern entspricht.

Tabelle 5 – Betriebliche Anforderungen der IMO-Entscheidung A.1046

	Meeresgewässer	Hafeneinfahrten, Hafenzufahrten und Küstengewässer
Genauigkeit (95 %)	100 m	10 m
Systemintegrität (Zeit bis Alarm)	So bald wie möglich durch Informationen über die Sicherheit im Seeverkehr	Binnen 10 s

	Meeresgewässer	Hafeneinfahrten, Hafenzufahrten und Küstengewässer
Signalverfügbarkeit	99,8 %	99,8 %
Kontinuität	Keine Angabe	99,97 % (über 15 Minuten)

Die Erklärung dieses EGNOS-Dienstes für den Seeverkehr ist bis **Ende 2023** geplant.

- **Phase 3: EGNOS-DFMC-Dienst für den Seeverkehr + spezielle neue schiffsgestützte Mehrsystem-Funknavigationsempfänger**

Der künftige EGNOS-DFMC-Dienst wird eine **verbesserte Navigation** gemäß den IMO-Entschlüssen [A.915\(22\)](#) und [A.1046\(27\)](#) für die Seeschifffahrt in Hafeneinfahrten, Hafenzufahrten und Küstengewässern ermöglichen, wenn er von maßgeschneiderten schiffsgestützten Mehrsystem-Funknavigationsempfängern verarbeitet wird.

3.3.2.3 EGNOS-Eisenbahndienst für die Zugortung

Die Einführung von EGNOS-Diensten für **sicherheitsrelevante Anwendungen** im Eisenbahnverkehr **dürfte für mehr Sicherheit sorgen**, eine Steigerung der Kapazitäten des Eisenbahnnetzes bewirken und gleichzeitig zur Senkung der Betriebskosten beitragen.

Die Einbeziehung von EGNOS in das europäische Eisenbahnverkehrsleitsystem (ERTMS) und die Definition dieses EGNSS-Eisenbahndienstes für die Zugortung werden derzeit geprüft.

3.3.3 EGNOS-Datenübertragungsdienst (EDAS)

Der EDAS ist die **zentrale Stelle für den bodengestützten Zugang zu EGNOS-Daten**, einschließlich der Daten, die von der EGNOS-Bodeninfrastruktur erzeugt werden, vor allem von den Stationen zur Entfernungsmessung und Integritätsüberwachung (ranging and integrity monitoring stations, RIMS) und den Navigations-Land-Erdfunkstellen (navigation land earth stations, NLES).

Die EDAS-Dienste sind **über das Internet zugänglich**, unabhängig davon, ob EGNOS-GEO in Sichtweite ist. Dies ist besonders wichtig in Bezug auf Straßenschluchten, Gebirgsregionen oder anderen Gebieten mit eingeschränkter Sichtbarkeit der GEO-Satelliten.

Der EDAS ist **für registrierte Nutzer** in den EGNOS-Teilnehmerländern (Mitgliedstaaten, Norwegen, Schweiz und Island) sowie für andere Nutzer nach Registrierung und Autorisierung durch die Europäische Kommission **zugänglich**.

Darüber hinaus kann die bestehende Übertragungsinfrastruktur für den See- und Binnenschiffsverkehr (IALA-Funkbaken und/oder AIS-Basisstationen) auf die **Weiterübertragung von DGPS-Korrekturen auf der Grundlage des EDAS** zurückgreifen.

Der EDAS ist seit dem **26. Juli 2012** kostenfrei verfügbar und kann nur für nicht sicherheitskritische Zwecke genutzt werden.

3.4 Strategien und empfohlene Maßnahmen zu PNT in der EU

Dieser Abschnitt befasst sich mit den wichtigsten Strategien und Maßnahmen der EU im Zusammenhang mit PNT und beinhaltet

1. eine **Zusammenfassung der wichtigsten EU-Initiativen, die für PNT relevant sind**, nach Marktsegmenten, wobei die Rolle der europäischen GNSS-Dienste besonders hervorgehoben wird;
2. **Empfehlungen**, auch in Bezug auf Regulierung oder Normung, die auf Folgendes abzielen:
 - die Erleichterung der Nutzung von Galileo und EGNOS in den betreffenden Marktsegmenten;
 - die Erhöhung der Resilienz von PNT-Diensten, insbesondere für kritische Infrastrukturen.

In diesem Abschnitt wird auch auf die Empfehlung 4-c des [Sonderberichts Nr. 07/2021](#) des Europäischen Rechnungshofs eingegangen. Die Zeitpläne für jedes relevante Marktsegment, in dem eine Regulierung oder Normung die Nutzung von Galileo erleichtern kann, sind im Einzelnen in [APPENDIX C: Regulations and Standards](#) aufgeführt. Künftige Fassungen des ERNP werden die Weiterentwicklung der Nutzung von Galileo in verschiedenen Marktsegmenten widerspiegeln.

Bevor die Strategien für PNT in der EU für die einzelnen Marktsegmente erörtert werden, zeigt [Figure 17](#), wie PNT-Systeme typischerweise in den verschiedenen Marktsegmenten eingesetzt werden:

- Ausgehend vom **inneren Kreis** werden die Dienste der **globalen und regionalen GNSS-Systeme** heute in allen Marktsegmenten umfassend genutzt und können als Rückgrat für alle PNT-Dienste angesehen werden. Grund hierfür sind die relativ niedrigen Kosten, die herausragende Leistung sowie die Nutzerfreundlichkeit der GNSS-Empfänger.
- Der zweite Kreis zeigt die Dienste der **GNSS-Augmentationssysteme**, die ebenfalls alle Marktsegmente bedienen und eine verbesserte Leistung für Mehrwertdienste bieten (z. B. Integrität für sicherheitskritische Anwendungen oder hohe Genauigkeit bei der PPP).
- Der äußere Kreis zeigt, dass **konventionelle PNT-Systeme** vor allem im Luft- und Seeverkehr eingesetzt werden, während neue Technologien das Potenzial haben, alle Marktsegmente zu bedienen, einschließlich solcher Umgebungen, in denen sich die Nutzung von GNSS-Diensten als schwieriger erweist (z. B. in Innenräumen).

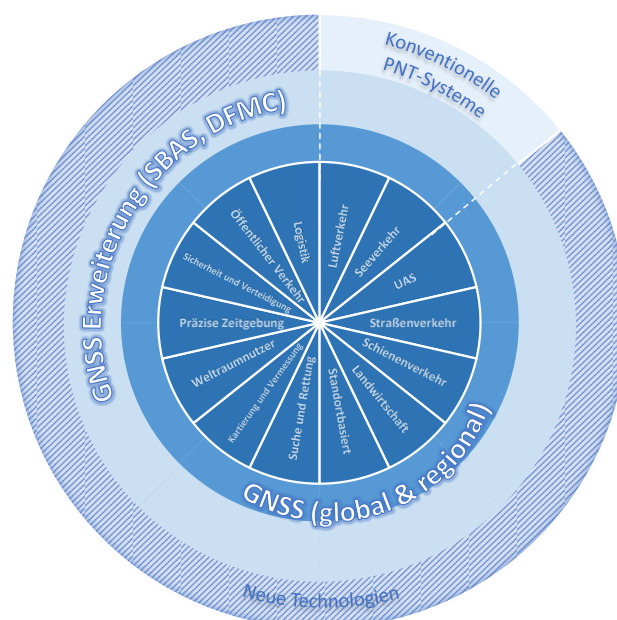


Abbildung 17 – Überblick über die Technologien nach Bereichen

3.4.1 Resilienz kritischer europäischer Infrastrukturen

Die Gewährleistung der **Resilienz von Einrichtungen, die zur Erbringung grundlegender Dienste kritische Infrastrukturen nutzen**, steht weiterhin ganz oben auf der Agenda der Europäischen Union und ihrer

Mitgliedstaaten. Sowohl in der [EU-Strategie für eine Sicherheitsunion](#) 2020–2025 als auch in der [EU-Agenda für Terrorismusbekämpfung](#) wird die Bedeutung der Resilienz kritischer Infrastrukturen gegenüber physischen und digitalen Risiken betont. Die COVID-19-Pandemie hat gezeigt, dass die Dienste, von denen das Leben der europäischen Bürgerinnen und Bürger und das reibungslose Funktionieren des Binnenmarktes abhängen, vor großen komplexen Bedrohungen stehen. Die Resilienz kritischer Infrastrukturen wird in wichtigen politischen Erklärungen hervorgehoben, z. B. in der von den Staats- und Regierungschefs der EU angenommenen [Erklärung von Versailles](#).

Die [Europäische Kommission unterstützt die Mitgliedstaaten](#) bei der Gewährleistung der Resilienz auf verschiedenen Ebenen:

- [Richtlinie \(EU\) 2022/2557 über die Resilienz kritischer Einrichtungen](#) (critical entities resilience, CER-Richtlinie), in der Verpflichtungen zur Ermittlung kritischer Einrichtungen in verschiedenen Sektoren festgelegt sind, um deren Resilienz zu erhöhen und die ungehinderte Erbringung von Diensten im Binnenmarkt zu gewährleisten, die für die Aufrechterhaltung wichtiger gesellschaftlicher Funktionen oder wirtschaftlicher Tätigkeiten unerlässlich sind.

Durch die Richtlinie soll die Resilienz gegenüber einer Reihe von Bedrohungen gestärkt und **sichergestellt werden, dass kritische Einrichtungen in der Lage sind, Störfälle zu verhindern, abzuwehren, aufzufangen und sich von ihnen zu erholen**, unabhängig davon, ob sie durch Naturkatastrophen, terroristische Angriffe, Insider-Bedrohungen oder Sabotage oder durch Notfälle im Bereich der öffentlichen Gesundheit wie die jüngste COVID-19-Pandemie verursacht wurden. Die Richtlinie spiegelt die immer komplexer werdende betriebliche Realität und den Perspektivenwechsel von „Schutz“ zu „Resilienz“ in Wissenschaft, Industrie und Politik wider. Cybersicherheitsrisiken fallen nicht unter die CER-Richtlinie.

Vor dem Hintergrund einer immer komplexeren Risikolandschaft hat die Richtlinie einen breiteren sektoralen Anwendungsbereich, der es den Mitgliedstaaten und kritischen Einrichtungen ermöglichen wird, sich besser mit den gegenseitigen Abhängigkeiten und den potenziellen Kaskadeneffekten eines Sicherheitsvorfalls auseinanderzusetzen. **Erfasst sind elf Sektoren:** Energie, Verkehr, Bankwesen, Finanzmarktinfrastrukturen, Gesundheit, Trinkwasser, Abwasser, digitale Infrastruktur, öffentliche Verwaltung, Weltraum sowie Produktion, Verarbeitung und Vertrieb von Lebensmitteln.

PNT-Dienste und ihre Resilienz sind für viele Sektoren relevant, die unter die Richtlinie fallen, insbesondere für die Sektoren Verkehr, Energie, Telekommunikation und Finanzen, und sollten daher im Rahmen der von kritischen Einrichtungen durchzuführenden **Risikobewertungen** beurteilt werden, wobei bei Bedarf **Maßnahmen zur Erhöhung der Resilienz** ergriffen werden sollten. Da die CER-Richtlinie auch die Bodensegmente der von den Mitgliedstaaten oder privaten Betreibern betriebenen Weltrauminfrastruktur abdeckt, wird sie auch zur Erhöhung der Resilienz der Einrichtungen beitragen, die PNT für andere Wirtschaftszweige bereitstellen.

Schließlich bildet die Richtlinie den Grundstein für eine **engere Zusammenarbeit auf EU-Ebene** und dient auch für Gesetzgebungs- und Regulierungsmaßnahmen zu kritischen Infrastrukturen außerhalb der EU als Bezugspunkt.

- [Richtlinie \(EU\) 2022/2555](#) (NIS-2-Richtlinie), in der Maßnahmen für ein hohes gemeinsames Cybersicherheitsniveau in der EU für dieselben Einrichtungen festgelegt sind, die auch in der CER-Richtlinie genannt werden. Durch die Richtlinie soll das allgemeine Cybersicherheitsniveau in der EU erhöht werden, indem eine sektorübergreifende Sicherheitskultur gefördert wird und die Bereitschaft und Zusammenarbeit der Mitgliedstaaten sichergestellt werden (z. B. durch die Einrichtung von Computer-Notfallteams und einer [Kooperationsgruppe](#) zur Unterstützung und Erleichterung der strategischen Zusammenarbeit und des Informationsaustauschs zwischen den Mitgliedstaaten).
- Im Oktober 2022 nahm die Europäische Kommission einen [Vorschlag für eine Empfehlung des Rates zur Stärkung der Resilienz kritischer Infrastruktur in der EU](#) an. Vorrang sollten die Schlüsselbereiche Energie, digitale Infrastruktur, Verkehr und Weltraum erhalten.
- [Delegierte Verordnung \(EU\) 2022/30 der Kommission](#), mit der Anforderungen an die Cybersicherheit, den Schutz der Privatsphäre und den Schutz vor Betrug für bestimmte Kategorien von Funkanlagen, einschließlich solcher, die in kritischen Infrastrukturen eingesetzt werden, als Voraussetzung für ihr Inverkehrbringen in der EU auferlegt werden. Die Weiterentwicklung dieses Rechtsakts wird das [Cyberresilienzgesetz](#) sein.

3.4.2 Europäischer Grüner Deal

Europa hat sich verpflichtet, die **globale Herausforderung des Klimawandels und der Umweltzerstörung** anzugehen, und wird bei der Umkehrung der Schäden durch den Schutz, die Erhaltung und die Wiederherstellung der biologischen Vielfalt und der Ökosysteme sowie der Abmilderung der Auswirkungen des vom Menschen verursachten Klimawandels bei gleichzeitiger Unterstützung der Erholung des Planeten eine entscheidende Rolle spielen. Das Engagement Europas wurde im Laufe der Jahre durch mehrere Abkommen, Initiativen, Strategien und Verordnungen deutlich gemacht. Die wegweisende Strategie für nachhaltiges Wachstum, bekannt als [europäischer Grüner Deal](#), und die zugehörigen Initiativen zielen darauf ab, bis 2050 auf gerechte und integrative Weise Klimaneutralität zu erreichen und eine kohlenstoffarme und klimaresiliente Wirtschaft zu fördern. Der europäische Grüne Deal leistet einen Beitrag zu den Fortschritten hin zu einer Wirtschaft des Wohlergehens, in der dem Planeten mehr zurückgegeben als genommen wird, sowie zur Beschleunigung des Übergangs zu einer schadstofffreien Kreislaufwirtschaft, in der das Wachstum regenerativ ist und Ressourcen effizient und nachhaltig genutzt werden.

Im Rahmen des europäischen Grünen Deals werden Kapazitäten, Instrumente und Dienste zur Überwachung der anthropogenen Kohlenstoffemissionen, aber auch zur Überwachung, Analyse, Vorhersage und Abschwächung der Auswirkungen menschlicher Tätigkeiten auf die Qualität von Boden, Luft und Wasser gefordert. Die Nutzung von **Erdbeobachtungsdaten und meteorologischen Daten** zusammen mit In-situ-Daten (z. B. Bodensensoren usw.) und anderen nicht satellitengestützten Daten (z. B. Mobilfunkdaten, Statistiken usw.) bietet eine einzigartige Möglichkeit, den Zustand und die Veränderungen der Umwelt auf globaler Ebene und dennoch präzise genug zu überwachen, um Informationen für politische Maßnahmen und weitere Minderungs- und Anpassungsmaßnahmen bereitzustellen.

Die GNSS-Radio-Okkultation liefert In-situ-Wasserdampfprofile und wird zur **Verbesserung meteorologischer Vorhersagen** verwendet, und GNSS-Beobachtungen ermöglichen die Schätzung geodätischer Eigenschaften der Erde (Magnetfeld, Atmosphäre) zur **Unterstützung der Klimamodellierung**. GNSS ermöglicht auch die präzise Bestimmung der Umlaufbahn von LEO-Umweltsatelliten, die den Klimawandel auf der Erde überwachen.

Das EU-Weltraumprogramm ist eine tragende Säule des weltraumgestützten Wandels hin zu einem gesünderen Planeten, auch dank der **fortschrittlichen PNT-Daten**, die von Galileo und EGNOS bereitgestellt werden. Es bringt Umweltvorteile mit sich, die sich positiv auf die Ziele und Tätigkeiten des europäischen Grünen Deals auswirken, zum Beispiel durch Folgendes:

- Im **Luft- und Seeverkehr** ermöglichen GNSS eine effiziente Routenplanung, was zu einer **Verringerung** des Treibstoffverbrauchs und der damit verbundenen **Treibhausgasemissionen** führt, da beispielsweise ankommende Flugzeuge weniger Zeit mit dem Umkreisen von Flughäfen verbringen müssen, während sie auf eine Landebahn warten.
Überdies würden durch eine genaue Überwachung der Flugzeugposition sowie der Wetterbedingungen und des Vorkommens von eisübersättigten Gebieten die Bildung **persistenter Kondensstreifen und die damit verbundenen Nicht-CO₂-Effekte** verringert.
- In der **Landwirtschaft** ermöglichen GNSS die automatische Steuerung von landwirtschaftlichen Maschinen und bewirken eine Verringerung der Bodenverdichtung, wodurch die Gesundheit des Bodens und seine Fähigkeit zur Speicherung von Kohlenstoff verbessert werden.
- Im **Eisenbahnsektor** optimieren GNSS-gestützte Fahrerassistenzsysteme das Führen von Zügen und reduzieren den Verbrauch von Traktionsenergie und damit die Treibhausgasemissionen.
- Im **Straßenverkehr** ermöglichen GNSS kürzere und effizientere Fahrten, was zu einer geringeren Einschaltdauer des Fahrzeugmotors und damit zu einer geringeren Kohlenstoffbelastung pro Fahrt führt.
- Im **Bereich der Stromverteilung** ermöglichen GNSS eine genaue Zeitgebung und Synchronisierung der Stromübertragungsinfrastruktur. Dies ist von grundlegender Bedeutung für die Verbreitung intelligenter Netze und die Aufrechterhaltung einer genauen Spannungsfrequenz, die aufgrund der verstärkten Nutzung erneuerbarer Energien für den ökologischen Wandel erforderlich sind.
- Bei der **Überwachung von Offshore-Infrastrukturen** (z. B. Windturbinen oder Ölplattformen) ermöglichen GNSS einen effizienteren Drohnenbetrieb als mit herkömmlichen Mitteln, was die Treibhausgasemissionen drastisch reduziert.

3.4.3 Bemannte Luftfahrt

PNT (insbesondere GNSS und ihre Augmentationen SBAS, ABAS und GBAS) **spielen in der Luftfahrt eine zentrale Rolle** im Hinblick auf Systeme und Anwendungen für Kommunikation, Navigation und Überwachung (CNS), die das Flugverkehrsmanagement (ATM) unterstützen und die Flughafenkapazitäten sowie die ökologische und wirtschaftliche Effizienz erhöhen (z. B. geringere Lärmbelastung, effizientere Streckenführung, Treibstoff- und Emissionseinsparungen), während zugleich die Sicherheit gewährleistet wird:

- **In der Kommunikation** ist eine **vertrauenswürdige Zeitreferenz**, wie die auf GNSS basierende, der Schlüssel für Anwendungen wie die Synchronisierung von Bodennetzen und die Lotse-Pilot-Datenlinkverbindung, welche die Kommunikation in der Flugverkehrskontrolle (ATC) über eine Datenverbindung ermöglicht.
- Bei der **Überwachung** nutzt das gesamte Überwachungssystem, von den Sensoren bis zur ATC, eine **einzige Zeitreferenz**, wodurch sichergestellt wird, dass die ATC-Entscheidungen auf der Grundlage zuverlässiger Überwachungsinformationen getroffen werden (der Nachteil ist, dass GNSS zur einzigen Ausfallsquelle werden, wodurch der Bedarf an alternativen Zeitgebungsdiensten steigt). Die Vorteile der GNSS-Leistung werden durch die Integration von GNSS-Informationen in die automatische bordabhängige Flugüberwachung – Rundsendebetrieb (ADS-B) anerkannt. So ist beispielsweise im [US-amerikanischen Mandat für ADS-B](#) de facto der Einsatz von SBAS vorgeschrieben, um die Durchführbarkeit des Betriebs zu gewährleisten. Schließlich kann ADS-B auf der Grundlage der GNSS-Ortung die Rationalisierung der SSR-Infrastruktur ermöglichen.
- In der **Navigation** sind GNSS von wesentlicher Bedeutung für die Umsetzung der leistungsbasierten Navigation (PBN). Im Navigationsbetrieb sind RNP-Anflüge bis zu LPV-Minima, sog. **LPV-Anflüge** (d. h. 3D-Anflüge mit lateraler und vertikaler Führung ähnlich wie bei ILS-CAT-I-Anflügen, jedoch ohne eigene Funknavigations-Bodeninfrastruktur), die wichtigste Funktion der SBAS-Technologie. Wenn die Mindestanflughöhe unterhalb der Wolkendecke/Wolkenuntergrenze liegen kann, ist der Anflugbetrieb durchführbar und **Störungen** (d. h. Annullierungen, Verspätungen oder Umleitungen zu anderen Flughäfen) **werden minimiert und die Sicherheit, Effizienz und Anfliegbarkeit werden verbessert**. Auf Landebahnen für Nicht-Präzisionsanflüge und für Präzisionsanflüge können Minima bis zu 250 ft bzw. 200 ft erreicht werden, und in beiden Fällen ist im Endanflugsegment eine Flughöhe von nur 100 ft möglich und die Landung kann sogar ohne Sichtkontakt mit der Landebahnumgebung erfolgen, wenn **die Nutzung von SBAS mit Luftfahrzeugen kombiniert wird, die mit einem verbesserten Flugsichtsystem** (enhanced flight vision system, EFVS) **ausgerüstet sind**, vorausgesetzt, das EFVS an Bord verfügt über die entsprechenden Eigenschaften und es liegt eine Sondergenehmigung der zuständigen nationalen Behörde vor.

Es sei darauf hingewiesen, dass GNSS nicht nur einen Mehrwert für die Bodensysteme bieten, sondern auch von **Bordsystemen** und Anwendungen im Luftfahrzeug ausgiebig genutzt werden, insbesondere zu Zeitmessungszwecken.

Weitere Vorteile der Nutzung von GNSS sind im [Report on Aviation User Needs and Requirements](#) (Bericht über die Bedürfnisse und Anforderungen von Nutzern in der Luftfahrt) näher beschrieben, z. B. [SBAS-gestützte Anflüge auf Nicht-Instrumentenlandebahnen](#) in der allgemeinen Luftfahrt (normalerweise kleine Flugplätze mit Sichtflugbetrieb), der [Betrieb mit Drehflüglern](#) unter oft nicht optimalen Bedingungen für Suche und Rettung (SAR) oder Luftrettungsdienste (helicopter emergency medical services, [HEMS](#)) und die [Nutzung der geometrischen Höhe](#) auf der Grundlage von SBAS für die Entwicklung verbesserter Bodenwarnsysteme wie der verbesserten Bodenannäherungswarnanlage (enhanced ground proximity warning system, [EGPWS](#)) gegenüber dem klassischen Hinderniswarnsystem (terrain avoidance warning system, [TAWS](#)) sowie die Überwachung von barometrischen Höhen.

In Zukunft wird die Einbeziehung von **Galileo- und EGNOS-DFMC zusätzliche Vorteile** für die Luftfahrt bringen, z. B. Leistungssteigerungen (wie verbesserte Verfügbarkeit und Kontinuität), größere SBAS-Dienstbereiche, niedrigere Schutzniveaus im Sinne eines fortschrittlicheren Betriebs, die Fähigkeit, den CAT-III-Betrieb auf der Grundlage von GBAS in allen Breitengraden zu unterstützen, erhöhte Robustheit gegenüber RFI oder Abschwächung von Schwachstellen in der Ionosphäre oder Unterstützung künftiger Anwendungen wie 4D-Navigation durch GNSS-Zeitgebung.

Um die Nutzung von GNSS für das europäische Flugverkehrsmanagement zu erleichtern, wurden einige wichtige Initiativen ins Leben gerufen. Im [europäischen ATM-Masterplan](#) ist der **Fahrplan für die Nutzung von EGNOS und Galileo in Kombination mit GPS für verschiedene Flugphasen** (als Teil der CNS-Systeme) festgelegt. Der CNS-Fahrplan enthält Etappenziele für die betriebliche Nutzung von Systemen zur Augmentation von GPS und Galileo: EGNOS V3 (DFMC-SBAS), ARAIM und GBAS.

In der [Durchführungsverordnung \(EU\) 2018/1048 der Kommission](#) (PNB-Verordnung) ist die schrittweise Einführung von Strecken und Anflugverfahren auf Grundlage der **leistungsbasierten Navigation** (PBN) vorgeschrieben, um die Luftraumgestaltung zu verbessern und so einen sichereren, umweltfreundlicheren und effizienteren Flugbetrieb zu unterstützen und gleichzeitig die Kosteneffizienz zu verbessern. Die PNB-Verordnung enthält auch eine Vorschrift, dass ab 2030 alle Standard-Instrumenten-Abflugverfahren und Standardanflugstrecken ausschließlich PBN-basiert sein müssen, mit GNSS als Hauptnavigationsmittel, und SBAS werden zum Hauptnavigationsmittel für den CAT-I-Betrieb. Ferner wird die **Einführung von PBN-Anflugverfahren einschließlich EGNOS-Verfahren** (LPV-Verfahren) für alle europäischen Pistenenden von Instrumentenlandebahnen (instrumental runway end, IRE) bis 2020 (IRE ohne Präzisionsanflug) bzw. 2024 (IRE mit Präzisionsanflug) vorgeschrieben.

Zusätzlich und mit dem Ziel, die **Rationalisierung der konventionellen Navigationsinfrastruktur** zu ermöglichen und ein Mindestmaß an Diensten mit einem akzeptablen Sicherheitsniveau im Falle einer Störung (z. B. eines GNSS-Ausfalls) zu gewährleisten, ist nach der Durchführungsverordnung die Nutzung konventioneller Navigationsverfahren ab dem 6. Juni 2030 ausdrücklich ausgeschlossen, außer im Falle von PBN-Notfällen, d. h. Situationen, in denen aus unerwarteten Gründen, die sich der Kontrolle der Anbieter von Flugverkehrsmanagement-/Flugsicherungsdiensten entziehen, GNSS oder andere für die leistungsbasierte Navigation verwendete Methoden nicht mehr verfügbar sind. Für diese Ausnahmefälle soll ein Mindestbetriebsnetz (MON) aus konventionellen Navigationshilfen (z. B. Instrumenten-Landesystem (ILS), UKW-Drehfunkfeuer (VHF omnidirectional radio range, VOR), Entfernungsmessgeräte (distance measuring equipment, DME)) aufrechterhalten werden, um zu gewährleisten, dass die Navigationsdienste weiterhin erbracht werden können, ohne dass die Sicherheit in Notfällen beeinträchtigt wird.

Daher werden GNSS ab dem 6. Juni 2030 das nominale Navigationsmittel im europäischen Luftraum für alle Flugphasen bis einschließlich CAT I sein, ergänzt durch GBAS und ILS-CAT-II/III-Landesysteme, sofern erforderlich ([Übergang zum PBN-Betrieb](#)).

Zusätzlich zu den regulatorischen Maßnahmen wie der PNB-Verordnung unternimmt die Europäische Union Folgendes, um den Eingang von PNT und der europäischen GNSS in die Luftfahrtpolitik zu erleichtern:

- **Unterstützung, einschließlich Finanzierung, der Umsetzung und Einhaltung der Durchführungsverordnung** durch verschiedene Maßnahmen, die darauf ausgerichtet sind, sowohl die Ausrüstung der europäischen Flotte mit GNSS-fähigen Empfängern als auch die Umsetzung GNSS-gestützter Verfahren durch die Anbieter von Flugsicherungsdiensten zu erleichtern;
- **Augmentation des Anwendungsbereichs der EGNSS** für den Betrieb mit Drehflüglern, SBAS-gestützte Anflüge auf Nicht-Instrumentenlandebahnen sowie Entwicklung von [Instrumenten zur Unterstützung der Durchführung von EGNOS](#);
- **Finanzierungsprogramme** zur Förderung der Forschung und Entwicklung in Bezug auf GNSS-Anwendungen, darunter das SESAR-Projekt;
- Arbeiten an der Aufnahme **von Galileo- und EGNOS- Mehrfrequenz-Multi-Konstellationen (DFMC) in die Luftverkehrsnormen** der ICAO für das Weltraumsignal (Anhang 10 Band I) und die EUROCAE-Normen für Empfänger (für SBAS, ARAIM und GBAS-Augmentationen).

Darüber hinaus gibt es in Europa laufende Maßnahmen (z. B. SESAR, EUROCAE, Eurocontrol) zur Festlegung **komplementärer PNT-Technologien für sichere und resiliente PNT**, die **im Falle einer GNSS-Störung als wirksames Backup** genutzt werden können, wodurch die Betriebskontinuität gewährleistet wird. Kurzfristig liegt der Schwerpunkt dabei auf der Verbesserung der DME-Infrastruktur und der Bereitstellung von Diensten, was wahrscheinlich RNP 1) unterstützen wird. Langfristig sollte ein geeigneter Mix aus komplementären PNT-Systemen Sicherheit für PNT gewährleisten und Schutz vor entsprechenden Sicherheitsbedrohungen bieten, während gleichzeitig die Nutzung des Funkspektrums dieser Systeme im Einklang mit der [Entschließung A41-8C der ICAO-Versammlung](#) optimiert wird.

3.4.4 Unbemannte Luftfahrt

Der Markt für unbemannte Luftfahrtsysteme (unmanned aircraft system (UAS) oder Drohnen) ist in den letzten Jahren schnell gewachsen. Die ICAO hat ein Gremium für ferngesteuerte Luftfahrzeugsysteme (Remotely Piloted Aircraft Systems Panel, [RPASP](#)) eingerichtet, um die erforderlichen **Normen für internationale Flüge** zu entwickeln, sowie eine Beratungsgruppe für unbemannte Luftfahrtsysteme (Unmanned Aircraft Systems Advisory Group, [UAS-AG](#)) eingesetzt, die das ICAO-Sekretariat bei der Entwicklung von Leitlinien beraten soll. Die ICAO ist außerdem im Begriff, eine Studiengruppe für fortgeschrittene Luftmobilität einzurichten, die ähnliche Leitlinien zur Unterstützung der Entwicklung der fortgeschrittenen und städtischen Luftmobilität bereitstellen soll. PNT wird für viele UAS-Anwendungen eine Schlüsselrolle spielen, ähnlich wie in der bemannten Luftfahrt (z. B. PNT-Unterstützung für CNS-Anwendungen).

In Europa wurde mit der [Verordnung \(EU\) 2018/1139](#) (EASA-Grundverordnung) der Zuständigkeitsbereich der Europäischen Agentur für Flugsicherheit (EASA) auf alle unbemannten Luftfahrzeuge, unabhängig von deren Gewicht und Größe, ausgeweitet und ein risikobasierter, betriebszentrierter Ansatz für die Sicherheitsregulierung der Luftfahrt, insbesondere für Drohnen, eingeführt. In der nachfolgenden [Durchführungsverordnung \(EU\) 2019/947](#) und [Delegierten Verordnung \(EU\) 2019/945](#) ist der **Rechtsrahmen für den sicheren Betrieb von zivilen Drohnen im europäischen Luftraum** festgelegt, wobei je nach dem verbundenen Betriebsrisiko zwischen drei Kategorien für den UAS-Betrieb unterschieden wird: Kategorie „**offen**“ (Betrieb mit geringem Risiko), Kategorie „**speziell**“ (Betrieb mit mittlerem Risiko) und Kategorie „**zulassungspflichtig**“ (Betrieb mit höherem Risiko, einschließlich der Beförderung von Personen oder gefährlichen Gütern).

Für die Kategorie „zulassungspflichtig“ gelten für (zulassungspflichtige) unbemannte Luftfahrzeuge, die nach Instrumentenflugregeln fliegen, dieselben Anforderungen an die Luftraumnutzung und Betriebsverfahren wie für bemannte Luftfahrzeuge; diese Regeln werden derzeit überprüft, um sicherzustellen, dass alle Besonderheiten von Drohnen angemessen berücksichtigt werden. Ein Großteil des vorherigen Abschnitts [3.4.3](#) über die bemannte Luftfahrt würde in Bezug auf PNT daher auch für diese unbemannten Luftfahrzeuge gelten. Dies ist die Kategorie mit den anspruchsvollsten PVT-Leistungen, insbesondere für den Betrieb außerhalb direkter Sicht (BVLOS).

Für Drohnen der Kategorien „offen“ und „speziell“ gelten dagegen derzeit keine besonderen Anforderungen an die Navigationsleistung. Es liegt in der Verantwortung des UAS-Betreibers sicherzustellen, dass extern bereitgestellte Dienste, die für die Sicherheit des UAS-Betriebs erforderlich sind, z. B. GNSS-Dienste, ein für den Betrieb angemessenes Leistungsniveau erreichen und für die gesamte Dauer des Betriebs aufrechterhalten werden. In der Kategorie „speziell“ muss der Antragsteller jedoch den Risikobereich für die Durchführung des Betriebs festlegen, der das Betriebsvolumen, bestehend aus dem Fluggebiet und dem Notfallvolumen, umfasst. **Bei der Bestimmung des Betriebsvolumens sollte der Antragsteller der Fähigkeit des UAS zum Halten der Position im 4D-Raum (Breitengrad, Längengrad, Höhe und Zeit) Rechnung tragen**, und daher sollte die Genauigkeit der Navigationslösung bei dieser Bestimmung in Betracht gezogen und berücksichtigt werden; **je nach Betrieb (spezifischer Sicherheits- und Integritätsstufe – specific assurance and integrity Level, SAIL) kann auch die Integrität eine wichtige Rolle spielen, wenn es darum geht sicherzustellen, dass die GNSS-PNT-Lösung für den beabsichtigten Betrieb als Input für das Navigationssystem der Drohne zuverlässig ist.**

In diesem Sinne haben die Europäische Kommission und die EASA wichtige Schritte unternommen, um die Drohnenindustrie durch die Veröffentlichung klarer Vorschriften zu unterstützen, die die Grundlage für den aktuellen und zukünftigen innovativen Betrieb bilden. Mit der Annahme des ersten Rechtsrahmens für den **U-Space** (Durchführungsverordnungen (EU) [2021/664](#), [2021/665](#) und [2021/666](#) der Kommission) wurden Bestimmungen für UAS-Betreiber, Anbieter von U-Space-Diensten, Anbieter gemeinsamer Informationsdienste und betroffene Anbieter von Flugsicherungsdiensten sowie die obligatorischen U-Space-Dienste festgelegt, die überall dort zu erbringen sind, wo ein U-Space-Luftraum ausgewiesen ist. Die Mitgliedstaaten sind dafür verantwortlich, die Leistungsanforderungen in einem ausgewiesenen U-Space-Luftraum auf der Grundlage einer Luftraum-Risikobewertung vor der Ausweisung des U-Space festzulegen.

Derzeit gibt es keine harmonisierten Anforderungen an die Nutzung des U-Space in Bezug auf die Navigationsfähigkeiten und -leistungen, aber es wird davon ausgegangen, dass **GNSS eine Rolle bei der Verbesserung der U-Space-Dienste spielen können**, da Dienste wie Netzidentifizierung, Geo-Sensibilisierung,

Fluggenehmigung und Verkehrsinformationen von der GNSS-Nutzung profitieren können, auch im Hinblick auf die Unterstützung der Umsetzung des [Konzepts für die urbane Luftmobilität \(UAM\)](#).

Auch wenn GNSS bereits den UAS-Betrieb unterstützen und zu U-Space-Diensten und zur urbanen Luftmobilität beitragen, arbeitet die Europäische Kommission daran, die Nutzung von EGNSS-Diensten für den Drohnenbetrieb weiter zu erleichtern, und zwar gemäß einem internen **Fahrplan für die Nutzung von EGNSS-Diensten für Drohnen**, der den aufstrebenden Drohnenmarkt durch die Entwicklung geeigneter EGNSS-Dienste unterstützen soll. Erstens sieht der Fahrplan die folgende Zuordnung von EGNSS-Diensten zu den jeweiligen Kategorien von Drohnen vor:

EGNSS SERVICES UAS OPS CATEGORIES		GALILEO*				EGNOS**		*Alone or in combination with GPS **With GPS †Support to EGNOS V3 and ARAIM
		OS	HAS	OSNMA	Support to SoL Applications†	OS	SOL	
OPEN		✓	✓	✓		✓		Low Risk
SPECIFIC	L	✓	✓	✓		✓		
	M	✓	✓	✓			✓	Medium Risk
	H				✓		✓	
CERTIFIED					✓		✓	High Risk

Abbildung 18 – Zuordnung von EGNSS-Diensten zu den jeweiligen Kategorien von Drohnen

Da der UAS-Betrieb ein enormes Spektrum an Anwendungsfällen und Betriebsumgebungen umfasst, wird eine schrittweise Methodik verfolgt, die sich zunächst mit dem Betrieb mit geringem Risiko befasst (der heute fast einen akzeptablen Reifegrad erreicht hat), dann mit dem Betrieb mit mittlerem Risiko (der hinsichtlich der Anforderungen anspruchsvoll ist, aber aufgrund einer verbesserten regulatorischen und normativen Unterstützung bald verwendungsbereit sein dürfte) und schließlich mit dem Betrieb mit höherem Risiko (der die anspruchsvollsten künftigen Anwendungen wie Lufttaxis im Rahmen des UAM-Konzepts unterstützt):

- Für den Betrieb mit geringem Risiko werden die EGNSS-Informationen und die Unterstützung von UAS-Nutzern (z. B. Websites, Helpdesk) verbessert.
- Für den Betrieb mit mittlerem Risiko wird ein Modell für die Bereitstellung von EGNSS-Diensten auf der Grundlage bestehender oder geplanter EGNSS-Dienste, gegebenenfalls einschließlich spezieller SDD-Verpflichtungen, sowie ein Betriebs-/Integritätskonzept für die EGNSS-Navigation entwickelt.
- Für den Betrieb mit mittlerem Risiko werden spezielle EGNSS-Dienste für Drohnen eingerichtet, um spezielle SDD-Verpflichtungen zu erklären.

Daneben wird die EGNSS-Normung unterstützt, vor allem durch die EUROCAE, die über ihre Arbeitsgruppe 105 bereits eine Reihe von sachdienlichen Unterlagen vorschlägt. Insbesondere laufen die folgenden GNSS-Initiativen:

- ED-301 „Guidelines for the Use of Multi-GNSS Solutions for UAS Specific Category – Low Risk Operations SAIL I and II“ (Leitlinien für die Nutzung von Multi-GNSS-Lösungen für die UAS-Kategorie „speziell“ – Betrieb mit geringem Risiko auf SAIL I und II), in denen spezifische Aspekte der Nutzung von GNSS für den Betrieb mit geringem Risiko behandelt werden (Veröffentlichung: 2022);
- Aufstellung der „Guidelines for the use of multi-GNSS solutions for UAS: Medium Risk“ (Leitlinien für die Nutzung von Multi-GNSS-Lösungen für UAS: mittleres Risiko) zur Ausdehnung der Nutzung von GNSS durch UAS-Betreiber im Rahmen der Kategorie „speziell“ auf den Betrieb mit mittlerem Risiko (Veröffentlichung: 2024).

Schließlich finanziert die Europäische Kommission im Rahmen der Programme [Horizont 2020](#) und [Horizont Europa](#) eine Reihe von Projekten zur Untersuchung der Navigationsleistung unbemannter Luftfahrzeuge (z. B. [REALITY](#) oder [EGNSS4RPAS](#)), die wertvolle Beiträge zu Normungs- und Regulierungsinitiativen liefern.

3.4.5 Navigation in der See- und der Binnenschifffahrt

Die [Internationale Seeschifffahrtsorganisation \(IMO\)](#) hat in der [IMO-EntschlieÙung A.1046\(27\)](#) die grundlegenden Parameter für die vorgeschriebene Navigationsleistung für das weltweite Funknavigationssystem (WWRNS) festgelegt. Der [Internationale Verband der Seezeichenverwaltungen \(IALA\)](#) definiert die entsprechenden Normen, Empfehlungen und Leitfäden für Seebehörden unter Berücksichtigung der festgelegten Anforderungen und Vorschriften für den Seeverkehr, auf die im IMO-Übereinkommen zum Schutz des menschlichen Lebens auf See (SOLAS) verwiesen wird. Da der Seeverkehr ein globaler Wirtschaftszweig ist, sind diese Normen, Empfehlungen und Leitlinien von entscheidender Bedeutung. [Galileo ist seit 2016 als Bestandteil des WWRNS anerkannt](#), während die IMO im Juni 2017 erklärte, dass **SBAS** nicht in den Anwendungsbereich der IMO-EntschlieÙung A.1046(27) fallen und daher keine IMO-Anerkennung für den Einsatz im Seeverkehr erforderlich ist.

Die [IMO-EntschlieÙung A.915\(22\)](#) enthält eine **Liste von** geregelten und nicht geregelten **Anwendungen im Seeverkehr, die die Kenntnis der Position oder Geschwindigkeit des Fahrzeugs für die allgemeine Navigation oder für andere Zwecke erfordern**. Diese EntschlieÙung, die in Zukunft möglicherweise aktualisiert werden muss, ist die international vereinbarte Referenz, in der die Bedürfnisse der Nutzer im Seeverkehr in Bezug auf die Positionsbestimmung zusammengefasst sind. Insbesondere **legt die IMO die Anforderungen an GNSS im Seeverkehr fest** und definiert allgemeine, betriebliche und institutionelle Anforderungen sowie Übergangsvorschriften.

Der Schiffsverkehr findet in verschiedenen Umgebungen oder Phasen der Schifffahrt statt:

- **Seeschifffahrt:** jenseits des Festlandsockels und mehr als 50 Seemeilen von Land entfernt;
- **Küstenschifffahrt:** über dem Festlandsockel oder in einem Umkreis von 50 Seemeilen von der Küste;
- **Hafenzufahrten, Hafeneinfahrten und BinnenwasserstraÙen:** normalerweise in begrenzten Gewässern, in denen die Schiffe durch genau definierte Kanäle fahren müssen.

Die Navigationsanforderungen für die allgemeine Schifffahrt hängen von der Phase der Schifffahrt ab (weiterführende Informationen sind dem [Report on Maritime and Inland Waterways User Needs and Requirements](#) (Bericht über die Bedürfnisse und Anforderungen von Nutzern im See- und Binnenschiffsverkehr) der EUSPA zu entnehmen).

Die IMO begann 2006 im Schiffssicherheitsausschuss (Maritime Safety Committee, MSC) mit der Entwicklung des [Konzepts der e-Navigation](#), definiert als „harmonisierte(r) Erfassung, Integration, Austausch, Darstellung und Analyse von Seeverkehrsinformationen an Bord und an Land mit elektronischen Mitteln zur Verbesserung der Navigation von Liegeplatz zu Liegeplatz und der damit verbundenen Dienste für die Sicherheit auf See und den Schutz der Meeresumwelt“. Dieses Konzept beruht auf robusten PNT-Diensten, die eine ausreichende Redundanz bieten. Resiliente PNT-Dienste sind eine der sieben Säulen der e-Navigation-Architektur der IMO. Das e-Navigation-Konzept dient dazu, die Nutzung von Multikonstellations-GNSS-Empfängern zu verbreiten und durch alternative Systeme Resilienz zu gewährleisten.

Für die [Seeschifffahrt](#) wird gemäß Anhang III der [Richtlinie 2002/59/EG](#) (in der geänderten Fassung) ein gemeinschaftliches Überwachungs- und Informationssystem für den Schiffsverkehr eingerichtet, bei dem die **über Satellit gesammelten Daten des automatischen Identifizierungssystems (AIS)** eine der Schnittstellen des zentralen Systems für den Austausch von Informationen für die Sicherheit des Seeverkehrs (SafeSeaNet) bilden und somit als **Datenquelle für die elektronischen Nachrichten einschließlich Informationen wie der Position des Schiffes** dienen. Dieses gemeinschaftliche System ist ein wichtiges Element für die Überwachung des Schiffsverkehrs und trägt somit zur Sicherheit und Leichtigkeit des Seeverkehrs bei.

In Bezug auf die [Sicherheit](#) hat die IMO hochrangige [Leitlinien für das Cyberrisikomanagement im Seeverkehr](#) (MSC-FAL.1/Circ.3) herausgegeben, die durch weitere Empfehlungen von Schifffahrtsverbänden, dem Internationalen Verband der Klassifikationsgesellschaften und dem Internationalen Verband der Seehäfen ergänzt wurden. In den von den Schifffahrtsverbänden aufgestellten [Guidelines on Cyber Security Onboard Ships](#) (Richtlinien zur Cybersicherheit an Bord von Schiffen) wird hervorgehoben, dass „Cybervorfälle ... durch den Verlust oder die Manipulation von externen Sensordaten [entstehen können], die für den Schiffsbetrieb entscheidend sind. Dazu gehören unter anderem globale Satellitennavigationssysteme (GNSS) ... Ein Cybervorfall kann bis zur Dienstverweigerung oder Manipulation reichen und daher alle mit der Navigation verbundenen Systeme betreffen.“ **Es bedarf der Authentifizierung und Integrität der Genauigkeit der Schiffposition**, um die Brücke bei einer Gefahrensituation zu alarmieren.

Im Rahmen der EGNSS-Programme wird an verschiedenen Initiativen gearbeitet, um zusätzliche Informationen für die Integrität und Authentifizierung im Seeverkehr bereitzustellen (siehe [3.3.2.2](#) für die verschiedenen Phasen):

- Die **Verwendung von EGNOS-Korrekturen** im RTCM-Format **über Mittelfrequenz-Funkbaken und die AIS-VDL-Meldung 17** ist bereits möglich, und in den [IALA-Leitlinien G-1129](#) wird die Durchführung dieser Weiterübertragung erläutert.
- Was die **Integrität** anbelangt, so wird ein erster **EGNOS-Dienst für den Seeverkehr entwickelt, der in Verbindung mit der RAIM** eine genauere Positionsbestimmung einschließlich Warnmeldungen an die Brücke ermöglicht. Die [IALA-Leitlinien G1152](#) enthalten Informationen für die Küstenschiffahrtsbehörden darüber, wie SBAS als Seeverkehrsdienst genutzt werden sollen. Von der IEC wird derzeit eine neue Norm für die Prüfung von SBAS-Empfängern an Bord von Schiffen ([IEC 61108-7](#)) ausgearbeitet, die 2023 veröffentlicht werden soll.
- Was die **Authentifizierung** betrifft, so wird in zwei Projekten, die im Rahmen der Grundelemente [GSA/GRANT/02/2019](#) finanziert werden, die Authentisierung von Navigationsnachrichten im offenen Dienst von Galileo (OSNMA) für Empfänger an Bord von Schiffen umgesetzt.

Im Zusammenhang mit diesen Initiativen müssen **bestimmte Normen und Vorschriften aktualisiert** werden:

- [IMO Resolution MSC233 \(82\) – Adoption of the performance standards for shipborne Galileo receiver equipment](#) (IMO-Entscheidung MSC233 (82) – Annahme der Leistungsnormen für Galileo-Empfängerausrüstung an Bord von Schiffen): Der IMO-Unterausschuss Navigation, Kommunikation, Suche und Rettung (Navigation, Communications and Search and Rescue, NCSR) erörtert derzeit ein neues Konzept zur Vereinfachung dieser Leistungsnormen. Bei der Aktualisierung von [IEC 61108-3 – Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems](#) (IEC 61108-3 – Navigations- und Funkkommunikationsausrüstungen und -systeme für den Seeverkehr) werden dann spezifische Empfehlungen für GALILEO-Empfängergeräte an Bord von Schiffen aufgenommen (dies soll 2023 geschehen).
- Die IMO wird aufgefordert, Leistungsnormen für DFMC-SBAS und die ARAIM zu entwickeln. Die Arbeiten könnten 2025 abgeschlossen werden, und in der Folge sollte eine neue IEC-Prüfnorm für DFMC-SBAS mit dem Ziel entwickelt werden, sie zwei Jahre später fertigzustellen.
- [Durchführungsverordnung \(EU\) 2022/1157 der Kommission mit Vorschriften hinsichtlich der Entwurfs-, Bau- und Leistungsanforderungen sowie der Prüfnormen für Schiffsausrüstung](#): Aufnahme neuer und aktualisierter Leistungs- und Prüfnormen für Empfänger an Bord von Schiffen, sowohl für Galileo als auch für DFMC-SBAS und die ARAIM. Dies sollte bei der nächsten jährlichen Aktualisierung nach Verfügbarkeit der Normen geschehen.

Im Hinblick auf resiliente PNT-Dienste arbeitet der Internationale Verband der Seezeichenverwaltungen (IALA) unter maßgeblicher Beteiligung mehrerer Mitgliedstaaten an einem **Backup-System für Küsten- und Hafengebiete mit der Bezeichnung R-MODE** (oder „Ranging Mode“), das Signale von Mittelfrequenz-Funkbakenstationen und Stationen des automatischen Identifikationssystems (AIS) bzw. des Datenaustausch-System auf UKW-Kanälen (VDES) nutzt. Unter dem Projekt [R-MODE Baltic2](#), das von der Europäischen Union im Rahmen der Interreg-Initiative für den Ostseeraum kofinanziert wird, wurde ein Testbett in der Ostsee eingerichtet (für weiterführende Informationen zu R-MODE siehe Anhang A Abschnitt [5.3.5](#)). In den [IALA-Leitlinien G1158](#) wird erläutert, dass die **GNSS-Zeitgebung** an Land als eine der Zeitquellen für die Synchronisierung der **für den R-MODE** erforderlichen VDES-Signale **verwendet werden kann**. Dazu bedarf es der Gewähr, dass das von den Stationen empfangene GNSS-Signal nicht von Spoofing betroffen ist (z. B. durch Verwendung verschlüsselter GNSS-Signale und Überprüfung der GNSS-Integrität in den Stationen).

Im Rahmen der [von der EU geförderten Forschung und Innovation auf dem Gebiet der maritimen Sicherheit im zivilen Bereich](#) wurden PNT- und GNSS-Dienste auch für die Entwicklung von Fähigkeiten zum Schutz von maritimen Gütern und Personen vor natürlichen oder internationalen Bedrohungen und der Fähigkeiten der Küstenwache sowie für zivile Aufgaben der Marine genutzt.

Die **Binnenschifffahrt** erfordert **Positionsgenauigkeit, auch im vertikalen Bereich**, um die Durchfahrthöhe von Brücken, Schleusen usw. zu berechnen und die Verkehrssituation zu überwachen. Zur Erhöhung der GNSS-Leistung wurden in gewissem Umfang IALA-DGPS-Stationen eingerichtet, um auch die Binnenwasserstraßen abzudecken. Darüber hinaus erfolgt die Verbreitung von DGPS-Daten über die AIS-Nachricht 17 in vielen Gebieten mithilfe von Basisstationen des automatischen Identifikationssystems für Binnenschiffe (Inland-AIS),

die Schiffe zur Verfügung stehen, die mit einem Inland-AIS-Transponder ausgestattet sind (der mit dem Transponder des AIS für die Seeschifffahrt kompatibel ist).

Im Vergleich zur Seeschifffahrt steht die Binnenschifffahrt vor größeren **Schwierigkeiten im Zusammenhang mit der Blockierung von Satellitensignalen** aufgrund von Landabschattung, Bergen oder Behinderungen durch künstliche Objekte wie Brücken und Schleusen. Leider kann es an Orten, an denen höchste Positionsgenauigkeit erforderlich ist, auch zu einer Blockierung des GNSS-Signals kommen (z. B. wenn ein Schiff in eine Schleuse einfährt). In Bezug auf Integrität, Genauigkeit und Zuverlässigkeit würden die Nutzer in der Binnenschifffahrt daher von der **Multikonstellationsnavigation** profitieren, da mehr Satelliten zur Verfügung stehen.

Nutzer in der Binnenschifffahrt könnten vom **Hochpräzisionsdienst** von Galileo und den künftigen speziellen **EGNOS-Diensten** für den Seeverkehr profitieren, wenn die Ortungsgeräte an Bord von Binnenschiffen ordnungsgemäß installiert sind. Für ein höheres Maß an automatisierter Binnenschifffahrt werden jedoch zusätzlich zu den GNSS-Sensoren **weitere Nahfeldsensoren** wie LIDAR-Sensoren und Radarsensoren benötigt. Die **Verarbeitung mehrerer Antennen** könnte auch genutzt werden, um die Robustheit und Sicherheit der Navigation zu erhöhen.

In der [Richtlinie 2005/44/EG über harmonisierte Binnenschifffahrtsinformationssysteme auf den Binnenwasserstraßen \(RIS-Richtlinie\)](#) wird der Einsatz von Satellitenortungstechnologien empfohlen. Die [Durchführungsverordnung \(EU\) 2019/838 der Kommission über die technischen Spezifikationen für Schiffsverfolgungs- und -aufspürungssysteme](#) enthält **genaue Anforderungen und technische Spezifikationen** für Schiffsverfolgungs- und -aufspürungssysteme im Einklang mit den Bestimmungen der RIS-Richtlinie und unter Wahrung der folgenden Grundsätze:

- Festlegung der Anforderungen an Systeme und von Standardnachrichten und -verfahren, sodass ihre Übermittlung automatisiert ist;
- Unterscheidung zwischen Systemen, die für die Erfordernisse der taktischen Verkehrsinformation, und Systemen, die für die Erfordernisse der strategischen Verkehrsinformation geeignet sind, sowohl im Hinblick auf die Genauigkeit der Positionsbestimmung als auch auf die erforderliche Aktualisierungsrate;
- Beschreibung der einschlägigen technischen Systeme für die Schiffsverfolgung und -aufspürung wie dem automatischen Identifikationssystem für Binnenschiffe (Inland-AIS);
- Kompatibilität der Datenformate mit dem AIS für die Seeschifffahrt.

Die Richtlinie 2005/44/EG über Binnenschifffahrtsinformationssysteme (river information services – RIS-Richtlinie) wird derzeit überarbeitet und soll 2023 angenommen werden. Bei der Überarbeitung wird die Arbeit des Europäischen Ausschusses zur Ausarbeitung von Standards im Bereich der Binnenschifffahrt berücksichtigt, der im April 2021 den ersten Satz an RIS-Standards angenommen hat ([Europäischer Standard für Binnenschifffahrtsinformationssysteme \(ES-RIS 2021/1\)](#)). Der ES-RIS 2021 gibt die derzeit geltenden technischen Spezifikationen wieder, die in den EU-Durchführungsverordnungen zur RIS-Richtlinie enthalten sind. Künftige Entwicklungen der technischen Spezifikationen, einschließlich derjenigen für Schiffsverfolgungs- und -aufspürungssysteme, werden durch die alle zwei Jahre stattfindenden Überarbeitungen des ES-RIS abgedeckt und durch sekundäre Rechtsvorschriften im Rahmen der überarbeiteten RIS-Richtlinie in Kraft gesetzt.

Besondere Bestimmungen über PNT und GNSS können künftig auch im ES-RIS erfasst werden.

Ferner sind in der [Inland-AIS-Prüfnorm](#) alle in der Reihe 61108 enthaltenen IEC-Normen für interne GNSS-Empfänger festgelegt. Heute umfassen diese Galileo (Teil 3) und ermöglichen die Nutzung von EGNOS, sobald Teil 7 veröffentlicht ist (voraussichtlich Mitte 2023). Die Verwendung von EGNOS-Korrekturen, die im RTCM-Format über die VDL-Nachricht 17 übermittelt werden, ist bereits möglich.

Schließlich entwickelt sich der Binnenschiffsverkehr weiter und macht sich neue Technologien zunutze, die die Branche sicherer, digitaler und nachhaltiger machen. Der autonome Schiffsbetrieb wird neue Geschäftsmöglichkeiten (auch für die Seeschifffahrt) schaffen – aber auch neue Herausforderungen mit sich bringen – und einen Beitrag zur Überwindung der Digitalisierungs- und Nachhaltigkeits Herausforderungen in der EU leisten. Die Europäische Kommission beabsichtigt, im Jahr 2023 eine **vorbereitende Maßnahme zu EU-Weltraumdaten für autonome Schiffe auf Binnenschifffahrtsstraßen** mit einer Laufzeit von drei Jahren einzuleiten, um zu bewerten, wie die EU-Weltraumdaten von Galileo, EGNOS und Copernicus diesen Wandel maßgeblich unterstützen können, indem sie zuverlässige und robuste Positionsdaten und harmonisierte Bilder der Fahrinnen und der Umgebung liefern, die für einen sicheren und umweltfreundlichen autonomen Betrieb erforderlich sind.

3.4.6 Straßenverkehr

Der Erfolg der Satellitenortung in Anwendungsplattformen für Fahrzeuge und tragbaren Navigationsgeräten, der auf die Positionsgenauigkeit und fortschrittliche Navigationsfähigkeit dieser Plattformen und Geräte zurückzuführen ist, wurde in letzter Zeit durch das Aufkommen von nutzerfreundlichen Navigationsanwendungen und Karten auf Smartphones verstärkt, wie im [Report on Road User Needs and Requirements](#) (Bericht über die Bedürfnisse und Anforderungen von Nutzern im Straßenverkehr) der EUSPA beschrieben.

Die **vorherrschende Stellung von GNSS-Anwendungen für den Straßenverkehr** im Markt wird durch die Entscheidungen der Behörden und das Aufkommen vernetzter Fahrzeuge bestätigt, die in Verbindung mit der ständigen Kurzstreckenkommunikation zwischen Fahrzeugen, anderen Verkehrsteilnehmern und der Infrastruktur (Vehicle-to-Everything-Kommunikation) eine nahezu unbegrenzte Reihe von Anwendungen bieten, die zur Verbesserung sowohl der Verkehrssicherheit als auch der Verkehrseffizienz beitragen. Überdies werden GNSS in Verbindung mit anderen bordeigenen Sensoren und 3D-Kartierung eine Schlüsselrolle bei **autonomen Fahrzeugen** spielen, da für diese sehr hohe Anforderungen an die Positionsgenauigkeit, Verfügbarkeit und Robustheit gestellt werden.

Der **intelligente Fahrtenschreiber**, der durch die [Verordnung \(EU\) Nr. 165/2014](#) eingeführt wurde, ist eine Weiterentwicklung des digitalen Fahrtenschreibers, der insbesondere eine Anbindung an einen GNSS-Empfänger, eine Ausrüstung zur Früherkennung per Fernkommunikation und eine Schnittstelle zu intelligenten Verkehrssystemen umfasst. Die Verwendung von Fahrtenschreibern, die an ein **GNSS** angebunden sind, ist ein **geeignetes und kostengünstiges** Mittel für die automatische Aufzeichnung des Standorts des Fahrzeugs an bestimmten Punkten während der täglichen Arbeitszeit zur Unterstützung der Kontrolleure bei ihren Kontrollen. Die **technischen Spezifikationen** für den intelligenten Fahrtenschreiber sind in der [Durchführungsverordnung \(EU\) 2016/799 der Kommission](#) festgelegt, und intelligente Fahrtenschreiber werden seit 2019 in neu zugelassene Fahrzeuge eingebaut.

Die technischen Spezifikationen wurden in der [Durchführungsverordnung \(EU\) 2021/1228 der Kommission](#) aktualisiert, um die Erfassung der Anfangs- und der Endposition der Arbeitstage von Fahrern von Nutzfahrzeugen sowie Grenzübertritte und Be- und Entladevorgänge abzudecken. GNSS und das Geofencing an Grenzübergängen ermöglichen es den Durchsetzungsbehörden, den grenzüberschreitenden Verkehr von Straßenverkehrsunternehmen anhand der EU-Markt- und Sozialvorschriften effizienter zu kontrollieren. Diese **zweite Version** des intelligenten Fahrtenschreibers wird voraussichtlich auch **den OSNMA-Dienst von Galileo nutzen**, sobald dieser für betriebsbereit erklärt wurde. Dieser Fahrtenschreiber wird ab August 2023 in neu zugelassene Fahrzeuge eingebaut. Alle Fahrzeuge, die im grenzüberschreitenden Verkehr eingesetzt werden und in den Anwendungsbereich der Verordnung (EU) Nr. 165/2014 fallen, werden bis spätestens August 2025 mit einem intelligenten Fahrtenschreiber der zweiten Version nachgerüstet.

Was die **elektronische Maut** anbelangt, so wird der Einsatz von GNSS für die Erhebung von Straßenbenutzungsgebühren, die darin besteht, dass ein Benutzer (d. h. ein Fahrzeug) auf der Grundlage seiner gemeldeten Position belastet wird, durch die [Richtlinie \(EU\) 2019/520 über die Interoperabilität elektronischer Mautsysteme](#) geregelt. Die Richtlinie ermöglicht die **satellitengestützte Mauterhebung** für schwere und leichte Nutzfahrzeuge, wodurch die physischen Mautstationen auf den Autobahnen abgeschafft werden können, wodurch wiederum die Warteschlangen entfallen und der Endbenutzer Zeit spart, während gleichzeitig die Privatsphäre der Benutzer durch Anonymisierung der Daten gewahrt bleibt. Ab Oktober 2021 müssen alle neu in Betrieb genommenen elektronischen Mautsysteme mit Satellitenortung mit EGNOS und Galileo kompatibel sein. Darüber hinaus müssen ab 2028 alle neuen elektronischen Mautsysteme für Personenkraftwagen mit GNSS kompatibel sein.

In Bezug auf **intelligente Verkehrssystem (IVS)** heißt es in der [Richtlinie 2010/40/EU zum Rahmen für die Einführung intelligenter Verkehrssysteme im Straßenverkehr](#), dass für IVS-Anwendungen und -Dienste, für die eine präzise und garantierte Zeitgebung und Ortung erforderlich ist, satellitengestützte Infrastrukturen oder andere Technologien, die einen vergleichbaren Präzisionsgrad gewährleisten, wie die von EGNOS und Galileo bereitgestellten, genutzt werden sollten. Mehrere in diesem Rahmen erlassene delegierte Verordnungen wie die [Delegierte Verordnung \(EU\) 2015/962 der Kommission hinsichtlich der Bereitstellung EU-weiter Echtzeit-Verkehrsinformationsdienste](#) regeln den Zugang zu und den Austausch von Daten, die dank der genauen Ortung erzeugt wurden, einschließlich der im Fahrzeug erzeugten Daten.

Im [Vorschlag der Kommission zur Änderung der Richtlinie 2010/40/EU \(COM\(2021\) 813\)](#) wird vorgeschlagen, die Kompatibilität von IVS-Anwendungen und -Diensten, die auf Zeitgebung oder Ortung beruhen, zumindest mit den von EGNOS und Galileo bereitgestellten Navigationsdiensten, einschließlich der OSNMA, zu gewährleisten.

Im Jahr 2020 wurden zwei **einschlägige PNT-Normen** für [sichere IVS-Kommunikation \(CEN/ISO TS 21176\)](#) und ungeschützte Verkehrsteilnehmer ([ETSI TS 103 300-1](#), [ETSI TS 103 300-2](#), [ETSI TS 103 300-3](#)) veröffentlicht. [DATEX II](#) ist die Norm für den Datenaustausch für IVS-Stationen, die Verkehrsinformationen zwischen Behörden und Diensteanbietern austauschen: Verkehrsunfälle, Straßenbauarbeiten usw. Seit 2021 enthält DATEX II v.3.2 ein Standortdatenmodell, das die Registrierung der GNSS-Authentifizierung erfordert.

In Bezug auf **eCall** enthält die [Verordnung \(EU\) 2015/758](#) die Anforderungen für die Typgenehmigung zur Einführung des auf dem 112-Notruf basierenden bordeigenen eCall-Systems in Fahrzeugen. Die Bereitstellung präziser und verlässlicher Positionsdaten ist ein wesentliches Element für den effektiven Betrieb des auf dem 112-Notruf basierenden bordeigenen eCall-Systems. Gemäß dieser Verordnung tragen die eCall-Hersteller dafür Sorge, dass die **Empfänger** in den auf dem 112-Notruf basierenden bordeigenen eCall-Systemen mit den von **Galileo und EGNOS** erbrachten Ortungsdiensten **kompatibel** sind. In der [Delegierten Verordnung \(EU\) 2017/79 der Kommission](#) sind die Prüfverfahren und Leistungsanforderungen für die Typgenehmigung von GNSS festgelegt.

Im Jahr 2018 trat die [UN-Regelung Nr. 144](#) in Kraft, mit der ein harmonisiertes Verfahren für die Typgenehmigung von eCall-Systemen, -Geräten oder -Bauteilen eingeführt wurde, das in mehr als 50 Ländern, darunter Japan, Korea und Russland, gilt. Es ist die Kompatibilität mit GPS, GLONASS, Galileo und allen bestehenden SBAS vorgeschrieben.

Im Jahr 2021 begann die Europäische Kommission mit der Aktualisierung der derzeitigen eCall-Spezifikationen sowohl für Fahrzeuge als auch für öffentliche Notrufabfragestellen, um den derzeitigen Rechtsrahmen an die Weiterentwicklung der Telekommunikationsnetze hin zu paketvermittelten Netzen anzupassen.

In Bezug auf [Sicherheitssysteme für Kraftfahrzeuge](#) und im Rahmen der neuen [Verordnung \(EU\) 2019/2144 über die allgemeine Sicherheit](#) von Kraftfahrzeugen ist in der [Delegierten Verordnung \(EU\) 2021/1958 der Kommission](#) über intelligente Geschwindigkeitsassistenten, bei denen eine Kombination aus Kamerasystem, GNSS und digitalen Karten zum Einsatz kommt, vorgeschrieben, dass diese Geschwindigkeitsassistenten, wenn sie mit Ortungsfunktionen ausgestattet sind, **mindestens mit Galileo und EGNOS kompatibel** sein müssen.

Im Jahr 2021 trat die [UN-Regelung Nr. 155](#) in Kraft, in der einheitliche Bedingungen für das Cybersicherheitsmanagement in autonomen Fahrzeugen festgelegt sind. GNSS-Spoofing wird als Bedrohung angesehen, und als Schutzmaßnahme ist die Verwendung authentifizierter Nachrichten vorgeschrieben.

Mit der Norm [CEN/CENELEC EN 16803](#) wurden die GNSS-Prüfverfahren und -methoden für die Ermittlung und Bewertung der Leistung in hoch anspruchsvollen Straßenanwendungen wie autonomen Fahrzeugen festgelegt. Die Veröffentlichung einer kompatiblen ISO-Norm steht noch aus.

Schließlich kann die **Digitalisierung der Durchsetzungsverfahren** in den nächsten Jahren wahrscheinlich mehr Möglichkeiten für den Einsatz der EGNSS bieten und zu wirksameren Kontrollen von Fahrzeugen und Fahrern führen. In der Tat ist die Durchsetzung von Vorschriften im Straßenverkehr der Schlüssel zur Gewährleistung der Straßenverkehrssicherheit und eines gut funktionierenden Marktes, sei es in Bezug auf Lenk- und Ruhezeiten, Gewichte und Abmessungen von Fahrzeugen, die Entsendung von Fahrern oder den Besitz und die Einhaltung von Beförderungsgenehmigungen, Lizenzen und Erlaubnissen usw. Genaue und zuverlässige Standortinformationen könnten in Kombination mit elektronischen Frachtbeförderungsinformationen beispielsweise zum Management vorrangiger Güter bei Zoll- und Grenzkontrollen beitragen.

Im Straßenverkehr würden die folgenden **Normen** die Einführung von EGNSS-Diensten erleichtern:

- Aktualisierung der [3GPP-Norm](#) für die Verbreitung von DFMC-GNSS-Signalen über das Mobilnetz;
- [Prüfnorm für GNSS und den HAS](#) durch RTCM SC134.

3.4.7 Schienenverkehr

Die **europäische Strategie für den Schienenverkehr** zielt darauf ab, das Schienennetz offen und interoperabel zu gestalten, wozu auch gehört, die nationalen Zugsicherungssysteme durch das [europäische Eisenbahnverkehrsleitsystem \(ERTMS\)/europäische Zugsicherungs- und Zugsteuerungssystem \(ETCS\)](#), ein standardisiertes System, das speziell für die Bedürfnisse im europäischen Schienenverkehr entwickelt wurde, zu ersetzen. Dieses System nutzt GNSS in seiner derzeitigen Form nicht, da seine Kernarchitektur 1989/90 entwickelt wurde. Es wurden verschiedene Initiativen auf den Weg gebracht, um GNSS in das ETCS einzubeziehen, da es über das Potenzial verfügt, die streckenseitige Infrastruktur durch die Abschaffung von [Eurobalisen](#) als Positionsreferenzmarker zu reduzieren. Dies würde nicht nur die Kosten für die Signalgebung senken, sondern auch die Verfügbarkeit erhöhen, den technischen Aufwand und den Wartungsbedarf verringern und die Gefahr von Diebstahl, Vandalismus usw. mindern.

Darüber hinaus werden derzeit weitere neue Funktionen für das ERTMS/ETCS untersucht, die sich in hohem Maße auf GNSS stützen könnten, z. B. die **Überwachung der Zugintegrität**, eine Funktion innerhalb des [ERTMS-Level-3-Systems](#), die es dank der absoluten Positionierung der Züge ermöglichen würde, den Abstand zwischen den Zügen zu verringern, den Verkehr zu optimieren und positive Auswirkungen auf die Umwelt zu erzielen.

Die **größten technischen Herausforderungen** bei der Nutzung von GNSS auf Eisenbahnstrecken liegen in der Umgebung, die sich deutlich von jener bei Anwendungen im Luft- und Seeverkehr unterscheidet. Die Hauptunterschiede sind eine begrenzte und sich ständig ändernde Satellitensichtbarkeit, Signalabschwächung, elektromagnetische Störungen und erhebliche Mehrwegeeffekte. An manchen Orten, z. B. in städtischen Gebieten und in Bergregionen, können diese Effekte gleichzeitig auftreten. Weiterführende Informationen sind dem [Report on Aviation User Needs and Requirements](#) (Bericht über die Bedürfnisse und Anforderungen von Nutzern im Schienenverkehr) der EUSPA zu entnehmen.

Heute werden GNSS-Systeme im Schienenverkehr überwiegend für **nicht sicherheitsrelevante Anwendungen** eingesetzt. Fahrgastinformationssysteme sind die wichtigsten Anwendungen, wobei das Asset Management an Bedeutung gewinnt. In den kommenden Jahren werden zunehmend sicherheitsrelevante Anwendungen wie Signalgebung und Zugsteuerung auf der Grundlage von GNSS entwickelt werden, um die traditionellen Technologien zu ergänzen. Im Bereich **sicherheitskritische Anwendungen** hat die EUSPA einen [Fahrplan für die Einführung der EGNSS im Schienenverkehr](#) aufgestellt, der von den wichtigsten Interessenträgern aus dem Schienenverkehrssektor und der Weltraumwirtschaft gebilligt wurde. Er enthält eine Zusammenfassung der wichtigsten Tätigkeiten zur Erreichung eines EGNSS-fähigen ERTMS und dient als grundlegender Leitfaden auf dem Weg zu diesem Ziel.

Im Jahr 2022 wurde in der [Entschließung des Europäischen Parlaments zur Eisenbahnsicherheit und Signalgebung im Eisenbahnverkehr: Bewertung des Sachstands in Bezug auf die Einführung des Europäischen Eisenbahnverkehrsleitsystems \(ERTMS\)](#) darauf hingewiesen, dass möglichst rasch für Synergieeffekte zwischen dem ERTMS und den EGNSS gesorgt werden muss. Dies zeigt sich auch im Schienenverkehrssektor, wo derzeit beispielsweise der Prototyp einer fahrzeugseitigen Zugortungseinheit entwickelt wird ([Horizont-2020-Projekt CLUG](#)).

Die Europäische Kommission untersucht auch weiterhin die Möglichkeiten zur Nutzung bzw. Weiterentwicklung von EGNSS-Diensten für sicherheitskritische Anwendungen im Schienenverkehr. Derzeit laufen zwei Missionsstudien ([EGNSS-R](#) und [IMPRESS](#)) zur Präzisierung der Parameter eines eisenbahnspezifischen EGNSS-Dienstes, der die Nutzeranforderungen für die Signalgebung im Schienenverkehr und das ERTMS erfüllen könnte.

In den [technischen Spezifikationen für die Interoperabilität \(TSI\)](#) sind die technischen und betrieblichen Normen festgelegt, denen die einzelnen Teilsysteme oder Teile davon im Hinblick auf die Erfüllung der grundlegenden Anforderungen und die Gewährleistung der Interoperabilität des Eisenbahnsystems der Europäischen Union genügen müssen. Insbesondere **ist die Aufnahme von GNSS in die TSI „Zugsteuerung, Zugsicherung und Signalgebung“ auch eine Voraussetzung für den breiten Einsatz von GNSS zur ausfallsicheren Zugortung in der Europäischen Union**. Die letzte Änderung dieses Dokuments wurde im Juni 2019 angenommen, und die nächste Veröffentlichung soll im Laufe des Jahres 2023 erfolgen. Darüber hinaus ist für 2026 eine Freigabe der TSI vorgesehen, mit einer aktualisierten Version mit neuen Funktionen im Jahr 2028/2029.

3.4.8 Landwirtschaft

Das prognostizierte Wachstum der Weltbevölkerung auf 9,7 Milliarden Menschen bis 2050, verbunden mit einem höheren Kalorienverbrauch von immer wohlhabenderen Menschen und dem daraus resultierenden Anstieg der Lebensmittelnachfrage, erfordert zwingend eine Intensivierung der Lebensmittelproduktion, wie im [Report on Agricultural User Needs and Requirements](#) (Bericht über die Bedürfnisse und Anforderungen von Nutzern in der Landwirtschaft) der EUSPA beschrieben. Es bedarf einer umfassenden globalen Strategie für die Ernährungssicherheit, bei der **informationstechnologiegestützte Lösungen** eine Schlüsselrolle spielen. **Während GNSS eine vorherrschende Stellung einnehmen**, haben andere Technologien wie das geografische Informationssystem (GIS), die Fernerkundung durch Satelliten oder unbemannte Luftfahrzeugsysteme (UAS), optische Sensoren für den Stickstoffgehalt und den Zustand von Baumkronen, maschinelle Sichtsysteme, Gamma-radiometrische Bodensensoren usw. in ein breites Spektrum von Anwendungen Einzug gehalten. Die Nutzung der verschiedenen Grundlagentechnologien und die Kombination der verschiedenen Arten von Daten, die sie erzeugen, haben die **Präzisionslandwirtschaft** hervorgebracht, die nachweislich zur Steigerung von Ertrag und Produktivität bei gleichzeitiger Kostenkontrolle und Verringerung der Umweltauswirkungen landwirtschaftlicher Tätigkeiten beigetragen hat.

Die Marktakzeptanz **GNSS-gestützter Anwendungen für die Präzisionslandwirtschaft** wird mit der Notwendigkeit einer gesteigerten Lebensmittelproduktion zunehmen. Genauigkeit bleibt der wichtigste GNSS-Parameter für Landwirte. Für bestimmte Anwendungen ebenfalls relevant werden Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Authentizität und Abdeckung sein. **SBAS-gestützte Lösungen**, die die Genauigkeit, Integrität und Verfügbarkeit der grundlegenden GNSS-Signale verbessern, sind in der Präzisionslandwirtschaft zunehmend verfügbar und häufig die bevorzugte Option für Landwirte, die in den Markt für Präzisionslandwirtschaft eintreten. SBAS-gestützte Lösungen, die ohne Abonnementgebühren oder zusätzliche Investitionskosten über den gesamten Kontinent verfügbar sind, sind bei Landwirten, die eine Genauigkeit im Submeterbereich benötigen, weitverbreitet. Für die Automatisierung sind **hochpräzise Lösungen (im Subdezimeterbereich)** erforderlich, die von kommerziellen oder institutionellen RTK-/Netzwerk-RTK-Diensten und Echtzeit-PPP-Diensten wie dem Hochpräzisionsdienst von Galileo bereitgestellt werden.

Die Integration der GNSS-Ortung in **Informationssysteme für die landwirtschaftliche Betriebsführung (farm management information systems, FMIIS)** in Verbindung mit der Nutzung zusätzlicher Informationen von verschiedenen Sensoren, einschließlich der Erdbeobachtung, dürfte die Präzisionslandwirtschaft revolutionieren und ihre Verbreitung weiter vorantreiben. Bei FMIS handelt es sich um Systeme zur Erfassung, Verarbeitung, Speicherung und Bereitstellung von Daten, die den Landwirten eine fundierte Entscheidungsfindung sowie die Ausarbeitung von betriebswirtschaftlichen Strategien ermöglichen. **GNSS verknüpfen diese Daten mit bestimmten geografischen Koordinaten.**

Trotz der unterschiedlichen Erfolge und der unterschiedlichen Akzeptanz der verschiedenen technologiegestützten Lösungen für die Landwirtschaft müssen bei der Durchsetzung und Ausweitung ihrer Anwendung **mehrere technologische, wirtschaftliche und wahrnehmungsbezogene Herausforderungen bewältigt werden**. Kürzlich hat die im Rahmen der Europäischen Innovationspartnerschaft „Landwirtschaftliche Produktivität und Nachhaltigkeit“ eingesetzte [Fokusgruppe „Mainstreaming der Präzisionslandwirtschaft“](#) die Notwendigkeit, dass „Landwirte und Genossenschaften ... eine wichtige Rolle bei Innovation und Forschung in Bezug auf Entscheidungshilfesysteme und technische Lösungen für aktuelle Probleme spielen“, ganz oben auf ihre Empfehlungsliste gesetzt.

Es gibt mehrere Initiativen, um den Eingang der EGNSS in die europäische Landwirtschaft zu erleichtern.

EGNSS4CAP ist eine **Mobiltelefonanwendung** für Android und iOS zur **Digitalisierung der Verfahren**, mit denen **Landwirte** in der Europäischen Union ihren Meldepflichten im Rahmen der aktuellen und der nach 2020 anstehenden Reform der [Gemeinsamen Agrarpolitik \(GAP\)](#) nachkommen können.

Die neuen Vorschriften, die die Europäische Kommission für die derzeitige und die künftige GAP erlassen hat, ermöglichen den **Einsatz** einer Reihe moderner **satellitengestützter Technologien** bei der Verwaltung und Kontrolle **flächenbezogener Zahlungen**. So können beispielsweise automatische Überwachungsverfahren unter Verwendung von Daten und Signalen sowohl des Copernicus- als auch des Galileo-Programms genutzt werden, um die Zahl der Vor-Ort-Kontrollen zu verringern. Diese Verfahren sind Teil des Mechanismus „Kontrollen durch Monitoring“ und werden in bestimmten Mitgliedstaaten auf freiwilliger Basis angewandt.

Für die **neue GAP** wird das Flächenüberwachungssystem (AMS) eingeführt. Nach diesem Mechanismus müssen alle Mitgliedstaaten **100 % der flächenbezogenen Zahlungen überwachen**. Der Einsatz dieser Technologien ist Teil der laufenden Bemühungen der Europäischen Kommission, die Prozesse des integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystems (InVeKoS) im Rahmen der GAP zu modernisieren und zu vereinfachen.

Die EGNSS4CAP-Anwendung wird EGNSS-Unterscheidungsmerkmale nutzen, um Landwirte in die Lage zu versetzen, georeferenzierte Fotos und Updates des Systems zur Identifizierung landwirtschaftlicher Parzellen (Land Parcel Identification System, LPIS) zu liefern, die einen Copernicus-Sentinel-basierten Überwachungsansatz für die GAP unterstützen und ergänzen.

Es handelt sich um ein Open-Source-Tool, das kostenfrei verfügbar ist und bei diversen Android- oder iOS-Entwicklungen integriert werden kann. Es wird auf Massenmarktgeräten wie Smartphones und Tablets möglich sein, die Anwendung auszuführen und GNSS zu nutzen, um den Standort und den Zeitpunkt des Fotos zu bestimmen und die erforderliche Genauigkeit und Authentifizierung für die Meldung an die Zahlstellen zu gewährleisten.

Das [Betriebsnachhaltigkeitsinstrument \(Farm Sustainability Tool, FaST\)](#) ist eine digitale Dienstleistungsplattform, über die EU-Landwirten, den Zahlstellen der Mitgliedstaaten sowie landwirtschaftlichen Beratern und Entwicklern digitaler Lösungen Funktionen in den Bereichen Landwirtschaft, Umwelt und Nachhaltigkeit zur Verfügung gestellt werden. FaST wird die Landwirte bei ihren administrativen Entscheidungsprozessen im Hinblick auf die Rentabilität des landwirtschaftlichen Betriebs und die ökologische Nachhaltigkeit unterstützen.

EGNSS werden ein integraler Bestandteil von FaST sein, da sie es den Landwirten ermöglichen werden, Erdbeobachtungsdaten mit Echtzeit-Positionsbestimmung zu kombinieren und georeferenzierte Informationen an die Behörden der Mitgliedstaaten zu übermitteln.

Auch wenn sie nicht als primäre Informationsquelle für das [System zur Identifizierung landwirtschaftlicher Parzellen \(LPIS\)](#) angesehen werden, leisten die vor Ort mithilfe von **GNSS** gesammelten Daten **einen wertvollen Beitrag** zur Aufrechterhaltung des LPIS. Die meisten Feldinformationen unter Verwendung von GNSS, die für das LPIS genutzt werden, werden im Rahmen der klassischen Vor-Ort-Kontrollen der Erklärungen der Betriebsinhaber gesammelt. Darüber hinaus sind die Prüfbeauftragten vor Ort verpflichtet, alle fehlerhaften Referenzparzellen und die Schicht der ökologischen Vorrangflächen zu melden. Einige Mitgliedstaaten führen auch gelegentlich systematischere Felderhebungen mithilfe von GNSS durch.

Das Projekt [A New IACS Vision in Action \(NIVA\)](#) (eine neue InVeKoS-Vision in Aktion) hat zum Ziel, das InVeKoS mithilfe von digitalen Lösungen und E-Tools zu modernisieren, indem zuverlässige Methoden und harmonisierte Datensätze für die Überwachung der landwirtschaftlichen Leistung geschaffen werden und gleichzeitig der Verwaltungsaufwand für Landwirte, Zahlstellen und andere Interessenträger verringert wird.

Der [Anwendungsfall UC4a „Geotagged Photos“](#) (georeferenzierte Fotos) des NIVA-Projekts besteht in der Konzeption und Entwicklung einer Anwendung für mobile Geräte, die es Landwirten und/oder Beratern ermöglicht, georeferenzierte Fotos als Nachweis für die Beantragung einer Regelung hochzuladen. Im Rahmen dieses Projekts werden neuartige GNSS-Funktionen zur Verhinderung von Standort-Spoofing (z. B. Authentifizierung innerhalb des Galileo-Signals) genutzt. Die App demonstriert die Möglichkeiten, Benachrichtigungen vom unterstützenden System zu erhalten, und die Fähigkeit, Landwirte zu benachrichtigen und anzuleiten, die gewünschten Punkte von Interesse erfolgreich zu lokalisieren, zu ordnen, einzurahmen und zu fotografieren.

Der Endnutzer profitiert insofern davon, dass er mehr Möglichkeiten hat, mit der Zahlstelle in Kontakt zu treten. Landwirte können dafür sorgen, dass weniger Vor-Ort-Kontrollen notwendig werden, indem sie fotografische Tätigkeitsnachweise hochladen oder zur Klärung von Rückfragen beitragen. Die Verwaltung verfügt so über eine elektronische Aufzeichnung der Antwort und ein umfassendes Profil der landwirtschaftlichen Tätigkeit auf der Parzelle.

Im Rahmen von Öko-Regelungen für die [Präzisionslandwirtschaft](#) könnten die EGNSS den Landwirten dabei helfen, die Nährstoffbewirtschaftungspläne zu verbessern, den Einsatz von Betriebsmitteln (Düngemittel, Wasser, Pflanzenschutzmittel) zu verringern und die Effizienz der Bewässerung oder die Überwachung des Einsatzes von Pestiziden zu verbessern, indem genau aufgezeichnet wird, wo die Pestizide ausgebracht wurden.

3.4.9 Standortgestützte Dienste

Das meistgenutzte Navigationsgerät ist unser Mobiltelefon, wobei PNT hauptsächlich für standortgestützte Dienste (LBS) verwendet wird. Im Kontext der globalen Urbanisierung und von „Smart City“ (intelligente Städte) **wird bei GNSS-gestützten LBS einigen der unmittelbarsten wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Anliegen Rechnung getragen**, darunter die Verbesserung der Arbeitsproduktivität, die Erleichterung der Fortbewegung, die Ortsverfolgung, die Verwaltung von Ressourcen und effektive Dienste zur Erleichterung von Verbrauchergeschäften ([Report on location-based Services User Needs and Requirements](#) (Bericht über die Bedürfnisse und Anforderungen von Nutzern von standortgestützten Diensten) der EUSPA).

GNSS-gestützte Lösungen decken eine Vielzahl von Anwendungen ab, darunter Navigation, Kartierung, das geografische Informationssystem (GIS), Geo-Marketing und -Werbung, Sicherheit und Notfälle, Sport, Spiele, Gesundheit, Tracking, erweiterte Realität, soziale Netzwerke und Infotainment. Mehrere dieser Anwendungen erfordern eine strenge horizontale und vertikale Genauigkeit und eine Authentifizierung der Position (z. B. standortbezogene Abrechnung zur Vermeidung von Betrug).

Die Normungstätigkeiten im Zusammenhang mit LBS lassen sich in die Bereiche **Signalgebung, Leistungsanforderungen** für die Positionsbestimmung, einschließlich GNSS und unterstützte GNSS (A-GNSS), und **Prüfverfahren** unterteilen. Die wichtigsten Normungsgremien sind: [3rd Generation Partnership Project \(3GPP\)](#) (Partnerschaftsprojekt für die 3. Generation), [Open Mobile Alliance \(OMA\)](#) (Zusammenschluss führender Dienstleistungs- und Produktanbieter aus dem Bereich Mobilfunk), [ETSI TC SES](#) sowie das Europäische Komitee für Normung (Comité Européen de Normalisation, CEN) bzw. das Europäische Komitee für elektrotechnische Normung (Comité Européen de Normalisation Électrotechnique, CENELEC).

Gemäß der [Delegierten Verordnung \(EU\) 2019/320 der Kommission](#) müssen ab dem 17. März 2022 alle **Smartphones, die auf dem europäischen Binnenmarkt in Verkehr gebracht werden**, die Möglichkeit bieten, vom Mobilgerät abgeleitete Standortinformationen unter Verwendung von Galileo-Signalen zusätzlich zu anderen GNSS-Signalen an den **Rettungsdienst** der nächstgelegenen Notrufabfragestelle zu senden. Damit soll die Ortung der [112-Notrufe](#) verbessert werden, um schnellere Reaktionszeiten zu ermöglichen und somit mehr Leben zu retten ([Report on location-based Services User Needs and Requirements](#)) (Bericht über die Bedürfnisse und Anforderungen von Nutzern von standortgestützten Diensten) der EUSPA). Ein Großteil der Smartphones erfüllt bereits die Anforderungen, die von den benannten Stellen im Rahmen von Konformitätsbewertungsverfahren anhand der von der Europäischen Kommission zur Verfügung gestellten [Leitlinien](#) bewertet werden. Diese Funktion wird länderspezifisch aktiviert, je nach technischer und betrieblicher Bereitschaft des Dienstes [Advanced Mobile Location \(AML\)](#).

Zwei Normen für 4G- und 5G-fähige Smartphones, die 2020 und 2021 von 3GPP veröffentlicht wurden ([3GPP TS 36.171 version 16.1.0 Release 16](#) und [3GPP TS 38.171 version 16.2.0 Release 16](#) – *Requirements for support of Assisted Global Navigation Satellite System (A-GNSS)*) sehen einen „konstellationsunabhängigen“ Ansatz vor (d. h. das System mit dem Satelliten mit dem höchsten Signalpegel wird vom Gerätehersteller ausgewählt). Dies ist ein wichtiger Sicherheitsschritt weg von einem „GPS-zentrierten Ansatz“, unabhängig von der Zeit bis zur ersten Positionsbestimmung, die von anderen Konstellationen bereitgestellt wird.

Infolge der [Verfügbarkeit von Pseudostrecken im Android-Betriebssystem](#) hat sich die [Raw Measurements Task Force](#) (Taskforce „Raw-Messungen“) zum Ziel gesetzt, die Wissenslücke zwischen Nutzern von Raw-Messdaten und der Industrie zu schließen. Darüber hinaus laufen **Testkampagnen der EUSPA bzw. der gemeinsamen Forschungsstelle (JRC)** zur Bewertung der Leistungs- und Funktionsmerkmale, die speziell auf Smartphones und andere Massenmarktgeräte ausgerichtet sind.

Schließlich leistet die [5G PNT Navigation Task Force](#) (Taskforce „5G-PNT-Navigation“) einen Beitrag zur Arbeit von 3GPP im Bereich PNT und fördert die Einbeziehung von **EGNSS in das 5G-PNT-Ökosystem**, um sicherzustellen, dass die von 3GPP erstellten technischen Spezifikationen auch der Möglichkeit Rechnung tragen, **EGNSS mit 5G zu ergänzen**, wenn keine GNSS-Abdeckung verfügbar ist (z. B. in Innenräumen), aber auch um die Genauigkeit der Positionsbestimmung unter nominalen Bedingungen zu verbessern. Darüber hinaus wurden die 5G-Positionsbestimmungsarchitektur und -protokolle in den letzten Jahren angepasst, um die Bereitstellung von Unterstützungsdaten zu fördern, die für hochpräzise GNSS-Techniken (z. B. RTK, PPP usw.) sowohl im Unicast- als auch im Broadcast-Verfahren benötigt werden, wobei die ersten Produkte und Dienste in Europa und in den USA aufkommen.

3.4.10 Suche und Rettung (search and rescue)

Ziel des globalen Such- und Rettungsdienstes (SAR-Dienst) ist es, in Not geratene Menschen schnell zu finden und ihnen zu helfen. Es ist eine zunehmende Verbreitung GNSS-fähiger Such- und Rettungsbaken zu beobachten

Das [COSPAS-SARSAT-Programm](#) ist ein internationales satellitengestütztes Such- und Rettungswarnsystem für Notfälle. Derzeit **leistet der SAR-Dienst von Galileo einen Beitrag** zu diesem System, indem er mithilfe spezieller Nutzlasten an Bord der Galileo-Satelliten und dreier in ganz Europa verteilter Bodenstationen Funkbakennotsignale an die entsprechenden SAR-Kräfte weiterleitet (siehe Abschnitt [3.2.7](#) für weiterführende Informationen). Der SAR-Dienst erfordert SAR-fähige Empfänger (Funkbaken).

Die Verfügbarkeit des SAR-Dienstes von Galileo kommt all jenen Sektoren zugute, in denen aufgrund der Art der jeweiligen Tätigkeit das Leben von Menschen auf dem Spiel steht, vor allem dem See- und Luftverkehr.

Für den **Seeverkehr** hat die IMO 1988 das [weltweite Seenot- und Sicherheitsfunksystem \(GMDSS\)](#) eingerichtet, um Schiffen stets die Übermittlung und den Empfang von Informationen über die Sicherheit im Seeverkehr zu ermöglichen. Das GMDSS war 1997 einsatzbereit.

Schiffe müssen mit Notfunkbaken zur Kennzeichnung der Notposition ausgestattet sein und es müssen am Körper zu tragende Notfunktaster zur Verfügung stehen, die, sobald sie aktiviert sind, die notwendigen Informationen an die Notrufstellen übermitteln. AIS-Such- und Rettungssender und AIS-Mann-über-Bord-Funkbaken übermitteln nicht nur die Position der in Not geratenen Person, sondern teilen diese Position über das automatische Identifikationssystem (AIS) auch mit Schiffen in der Nähe, indem sie ein AIS-Notsignal auf deren elektronisches Seekartendarstellungs- und Informationssystem übertragen.

Im **Luftverkehr** hat die ICAO nach den Tragödien im Zusammenhang mit dem Air-France-Flug 447 und dem Malaysia-Airlines-Flug 370 und angesichts der Zeit, die für die Ortung der Flugzeuge benötigt wurde, das [Global Aeronautical Distress and Safety System \(GADSS\)](#) (weltweites Not- und Sicherheitsfunksystem für den Luftverkehr) eingerichtet, um sicherzustellen, dass Flugzeuge verfolgt werden und dass stets ihre letzte bekannte, von einem GNSS abgeleitete Position aufgezeichnet wird, sodass eine aktuelle Aufzeichnung des Flugverlaufs vorliegt. Nach den derzeitigen Richtlinien und Empfehlungen für die Verfolgung von Flugzeugen müssen Flugzeuge unter normalen Flugbedingungen im 15-Minuten-Takt verfolgt werden. Die letzte Aktualisierung des ICAO-Anhangs 6 sieht eine autonome Positionsmeldung im Minutentakt vor, wenn sich das Luftfahrzeug in einer Notlage befindet. Die Norm für das GADSS-Element „Verfolgung in einer Notlage“ wird am 1. Januar 2025 für Flugzeuge mit einem ersten individuellen Lufttüchtigkeitszeugnis, das am oder nach dem 1. Januar 2024 ausgestellt wird, anwendbar sein.

Um im Falle eines Zwischenfalls die Such- und Rettungsmaßnahmen zu unterstützen, müssen Flugzeuge mit Notfunktastern oder am Körper getragenen Notfunktastern ausgestattet sein. In Übereinstimmung mit den Anforderungen des ICAO-Anhangs 10 (und den in ICAO-Anhang 6 festgelegten Normen) sowie der Umsetzung des GADSS stützen sich viele Notfunktaster für die Übermittlung der Position auf GNSS.

Schließlich werden SAR-Dienste auch an **Land** in großem Umfang genutzt. So wird Bergsteigern und Wanderern etwa empfohlen, für den Notfall einen Notfunktaster am Körper zu tragen.

Weitere Informationen über den SAR-Dienst von Galileo sind auf der [EUSPA-Website](#) erhältlich. Der [Marktbericht 2022 der EUSPA zu Erdbeobachtung und GNSS](#) enthält Informationen über den SAR-bezogenen Markt, und der [GNSS-Anwendertechnologie-Bericht der EUSPA](#) liefert einen Überblick über die bestehende Technologie.

3.4.11 Kartierung und Vermessung

Es wird davon ausgegangen, dass der Markt für Kartierung und Vermessung im Allgemeinen und die Nutzung von GNSS in diesem Markt in den kommenden Jahren ein **beträchtliches Wachstum aufweisen werden**, insbesondere in Regionen der Welt ohne alternative Altsysteme oder dichte geodätische Bodennetze. Ein erhebliches Wachstum wird auch in Regionen mit intensiver Bautätigkeit erwartet, wo die Bedeutung von Katastervermessungen in Abhängigkeit vom Anstieg des Bruttoinlandsprodukts und der Bevölkerungszahl ebenfalls zunehmen wird. In diesem Zusammenhang wird bei der GNSS-gestützten Erhebung einigen der dringlichsten wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Anliegen Rechnung getragen, darunter die zunehmende Verstädterung, die steigende Nachfrage nach Kohlenwasserstoffen und die Modernisierungserfordernisse im Verkehr, wie im [Report on Surveying User Needs and Requirements](#) (Bericht über die Bedürfnisse und Anforderungen von Nutzern im Bereich Erhebung) der EUSPA beschrieben.

GNSS-gestützte Lösungen decken ein breites Spektrum von Anwendungen ab, einschließlich Katastervermessung (Abgrenzung von Grundstücksgrenzen), Bauvermessung (genaue Absteckung von Gebäuden und Infrastruktur), Kartierung (Karten, die Punkte von Interesse enthalten und in der Regel in geografische Informationssysteme integriert sind), Bergbauvermessung und Meeresvermessung (Offshore- und Seevermessung).

Die Rolle der traditionellen GNSS-Vermessung unterliegt jedoch einem raschen Wandel aufgrund der Integration **neuer Anwendungen**, darunter: optische Anwendungen, Multispektral-Anwendungen oder Lasererfassung und Entfernungsmessung (LIDAR), terrestrisches Laserscanning, unbemannte Luftfahrtsysteme (UAS), Trägheitsplattformen (IMU), simultane Positionsbestimmung und Kartierung (simultaneous localisation and mapping, SLAM), erweiterte Realität (AR), mobile Anwendungen und Crowdsourced Mapping. Darüber hinaus sind diese neuen Geomatikanwendungen in erster Linie auf die Implementierung von Lösungen direkt in der Cloud ausgerichtet.

Dank der Digitalisierung werden [Gebäudedatenmodelle \(building information model, BIM\)](#) und [geografische Informationssysteme \(GIS\)](#) mittlerweile in eine einzige ganzheitliche Umgebung integriert, um digitale Zwillinge zu erzeugen. Der Prozess der präzisen 3D-Modellierung, der beiden gemeinsam ist, wird durch **hochpräzise GNSS-Ortungsdaten** unterstützt. Wenn GNSS-, GIS- und BIM-Daten in der Cloud gespeichert und verarbeitet werden, können die Beteiligten in der gesamten Baubranche Daten überall aus der Ferne verwalten und bessere Gebäude-/Infrastrukturkonzepte mit langfristigen Einsparungen erstellen.

Ein weiteres Beispiel ist die Städteplanung. Die SLAM-Technologie mit ihrer Laser-/IMU-/Kamera-Integration und die tragbaren Laserscanner haben ein riesiges Feld für die detaillierte realistische Modellierung innerhalb von Gebäuden eröffnet. In Kombination mit GNSS-Empfängern ermöglichen diese Systeme einen nahtlosen Übergang zwischen Innen- und Außenbereich.

Mit dem Aufkommen zahlreicher neuer Methoden und Instrumente steigt auch der **Bedarf an klar definierten Anforderungen und Normen**. Im Rahmen mobiler Kartierungssysteme würde eine Reihe von Normen die Fusion von GNSS mit LIDAR, optischen Kameras sowie Trägheits-, Laser- und Wegstreckenmessgeräten ermöglichen. Weitere wichtige Bereiche, die strenge Anforderungen und Normen erfordern, sind die nahtlose Positionsbestimmung im Innen- und Außenbereich und PPP-RTK. Auch die jüngste Entwicklung von Anwendungen der erweiterten Realität, die von der Genauigkeit und Verfügbarkeit von GNSS abhängig sind, würde von Normen profitieren.

In Bezug auf die strengen Genauigkeitsanforderungen bei der Kartierung und Vermessung (im Zentimeter- bzw. Millimeterbereich) sind Augmentationsdienste wie [Echtzeit-Kinematik \(RTK\)](#), [präzise Punktpositionierung \(PPP\)](#) und die kürzlich entstandene PPP-RTK von größter Bedeutung. Sowohl [RTK](#)- als auch PPP-Multi-GNSS-Korrekturen werden im Standardprotokoll der Funktechnikkommission für Seefunkdienste (RTCM) unterstützt, entweder für eine einzelne Referenzstation oder ein Netzwerk (NTRIP) oder PPP.

Die **PPP-RTK**-Implementierung innerhalb der RTCM ist noch nicht verfügbar. In der Folge wurde die Normung von PPP-RTK-Korrekturen durch neue Nachrichten innerhalb des RTCM-Protokolls stark vorangetrieben, während in der Zwischenzeit von verschiedenen Interessenträgern aus der Industrie und im Rahmen von wissenschaftlichen Initiativen andere Protokolle oder Normen vorgeschlagen wurden (z. B. IGS, Sapcorda, 3GPP usw.).

Um die Herausforderungen in Bezug auf den Mangel an Verfügbarkeit, Qualität, Organisation, Interoperabilität, Zugänglichkeit und Austausch von **Geodaten** zu bewältigen, die in vielen Sektoren und auf verschiedenen Ebenen der öffentlichen Verwaltung in Europa bestehen, hat die EU die [Richtlinie zur Schaffung einer Geodateninfrastruktur in der Europäischen Gemeinschaft \(Infrastructure for Spatial Information in the European Community, INSPIRE\)](#) verabschiedet. INSPIRE soll den **Austausch von Umweltgeodaten** zwischen Einrichtungen des öffentlichen Sektors fördern und den Zugang der Öffentlichkeit zu Umweltdaten in ganz Europa erleichtern. Kartierung und Vermessung, bei denen Geodatensammlungsdienste und -instrumente, einschließlich EGNSS-gestützte, genutzt werden, stehen in direktem Zusammenhang mit INSPIRE.

Auf dieser Grundlage muss unbedingt sichergestellt werden, dass Geodaten und -dienste aus verschiedenen Quellen (Dateninteroperabilität) in der gesamten EU ohne zusätzlichen Aufwand für Mensch oder Maschine in kohärenter Weise kombiniert werden können. Bei INSPIRE wird die Interoperabilität der Daten unter anderem durch die Vorschrift gewährleistet, dass **ein gemeinsames Koordinatensystem, das Europäische Terrestrische Referenzsystem 1989 (ETRS89), verwendet werden muss**. Dadurch wird sichergestellt, dass die EGNSS-abgeleiteten Geodaten vollständig kompatibel sind und in die Anwendungen der Endnutzer integriert werden können, wodurch die Nutzung der EGNSS beschleunigt wird.

Maschinensteuerung ist ein wichtiger und wachsender Teil des Vermessungsmarkts. Wie im [Report on Surveying User Needs and Requirements](#) (Bericht über die Bedürfnisse und Anforderungen von Nutzern im Bereich Vermessung) der EUSPA dargelegt, sind die wichtigsten Zielmärkte das **Baugewerbe** und der **Bergbau** (z. B. Steuerung und halbautomatische Führung von Fahrzeugen in Erdbewegungsmaschinen oder Bergbauausrüstungen), wo eine Genauigkeit im Zentimeterbereich erforderlich ist, um die Produktivität zu steigern und die Kosten zu senken. In jüngster Zeit entwickelt sich der **Trockenhafenbetrieb** zu einem neuen Markt. Dabei wird im Gegensatz zu den beiden anderen Segmenten, in denen die Maschinensteuerung von den Fahrzeugherstellern durchgeführt wird, der Hafenbetrieb von den Kranherstellern durchgeführt, die die Hardware mit der Logistik- und Hafenmanagementsoftware integrieren. Die Hauptvorteile liegen in der Verwaltung der Schiffsbeladung, der Logistik der Beladung, der erhöhten Betriebsgeschwindigkeit und der Sicherheit. In Verbindung mit der Nutzung von GNSS und verschiedenen PNT-Systemen ergibt sich daraus ein einzigartiges europäisches Fachwissen.

Die [Maschinenrichtlinie \(Richtlinie 2006/42/EG\)](#), in der Anforderungen an Maschinen, Sicherheitsbauteile, Lastaufnahmemittel (wie Ketten und Seile) und andere verwandte Produkte festgelegt sind, wird von Herstellern in der EU weitgehend genutzt, um ein einheitliches Sicherheitsniveau der in Verkehr gebrachten Maschinen zu gewährleisten und die gewerblichen Schutzrechte in der EU zu wahren.

3.4.12 Präzise Zeitgebung und Synchronisierung (Finanzbereich, Stromnetze, Kommunikation)

Stromübertragung, Betrieb von Telekommunikationsnetzen, Zeitstempel für Finanztransaktionen, Flugverkehrsmanagementsysteme, Verkehrssysteme, Satellitenplattformen, Wasser- und Abwassersysteme, wissenschaftliche Anwendungen (Astronomie, Teilchenphysik, Geophysik, Metrologie), digitale Fernsehübertragung, LTE-Kleinzellennetze (Femto-, Piko- und Mikrozellen) und das Internet der Dinge (IoT) sind nur einige Beispiele für die **unzähligen Anwendungen, die für Zeitgebungs- und Synchronisierungszwecke von GNSS abhängig sind** (weiterführende Informationen sind dem [Report on Time and Synchronisation User Needs and Requirements](#) (Bericht über die Bedürfnisse und Anforderungen von Nutzern in den Bereichen Zeitgebung und Synchronisierung) sowie dem [GNSS-Anwendertechnologie-Bericht](#) zu entnehmen).

Obwohl sie in der Öffentlichkeit relativ unbekannt sind, sind die **Zeitgebungs- und Synchronisierungsfunktionen von Satellitennavigationssystemen für kritische Infrastrukturen von entscheidender Bedeutung**. Die **Robustheit und Resilienz der Zeitgebungs- und Synchronisierungsdienste sind der Schlüssel** zur Vermeidung schwerwiegender Störungen des Betriebs kritischer Infrastrukturen. Da die Infrastrukturen in Europa stark miteinander verflochten sind, kann die Erhöhung der Resilienz des Netzes nicht von einem Mitgliedstaat allein erreicht werden.

Galileo – als primäre Quelle für Zeitgebungsinformationen oder als Redundanzlösung verwendet – wird zu einem **resilienteren GNSS-Zeitgebungsdienst beitragen**, indem es sowohl die Verfügbarkeit des Zeitgebungsdienstes (durch eine weitere unabhängige Konstellation) verbessert als auch weiteren Mehrwert bietet, z. B. Authentifizierung, wodurch die Resilienz gegenüber Spoofing erhöht wird.

EGNOS bietet Zeitinformationen, die von GEO-Satelliten oder über den terrestrischen EDAS gewonnen werden, sodass die Nutzer in Echtzeit und über zwei verschiedene Kanäle online auf die Daten zugreifen können.

Ein wichtiger Schritt in der EU war die formelle Einrichtung eines eigenständigen **Galileo-Zeitgebungsdienstes** als Teil des Auftrags der zweiten Generation von Galileo, der die intrinsischen Zeitgebungsfähigkeiten von Galileo als GNSS-System nutzt und zusätzliche Funktionen einbringt, um die spezifischen Anforderungen der Nutzer von Zeitgebungs- und Synchronisierungsdiensten besser zu erfüllen:

- **hohe Verfügbarkeit** des Zeitgebungsdienstes insgesamt;
- **verbesserte Genauigkeit** für alle Zeitgebungsparameter;
- **spezielle Anforderungen** an die Galileo-Systemzeit (Galileo system time, GST), wodurch sie zu einer sehr leistungsfähigen Referenz für Synchronisierungsanwendungen wird;
- **Überwachungsfunktion des Zeitgebungsdienstes von Galileo**, die zu einer erheblichen Stärkung der Robustheit des Zeitgebungsdienstes und des Vertrauens in die mit Galileo erzielten Zeitgebungslösungen beitragen wird. Im Rahmen der Überwachungsfunktion werden die Nutzer durch spezifische Hinweise über Störungen informiert, bei denen die Gefahr besteht, dass das Leistungsniveau des Zeitgebungsdienstes nicht mehr eingehalten werden kann. Dies ist besonders relevant für Anwendungen im Bereich kritische Infrastrukturen.

Das Konzept des Zeitgebungsdienstes von Galileo umfasst auch die Entwicklung einer **Norm für Galileo-Zeitempfänger**. Durch diese Norm soll der korrekte Beitrag des Nutzerempfängers als grundlegendes Element für die End-to-End-Leistung gewährleistet werden. Er wird auch die Implementierung lokaler Barrieren wie Zeit-RAIM umfassen, um die allgemeine Robustheit weiter zu verbessern. Die Entwicklung dieser Norm, bei der es sich um die erste Norm für GNSS-Zeitempfänger überhaupt handelt, ist bei CEN-CENELEC formell im Gange.

Schließlich wird präzise Zeitgebung auch durch Nicht-GNSS-Technologien ermöglicht, die die GNSS-gestützten Zeitgebungsdienste weiter verbessern oder als Backup dazu dienen, z. B. Langwellensysteme (Anhang A, Abschnitt 5.2.7) und neue Technologien (Anhang A, Abschnitt 5.3). Alternative Zeitgebungsdienste sind in der Europäischen Union bereits kommerziell verfügbar, wie eine von der Europäischen Kommission durchgeführte [Studie aus dem Jahr 2022](#) bestätigt. Auf dem Markt gibt es **ausgereifte alternative Zeitgebungsdienste**, die die genaue Zeit über große Entfernungen **verteilen**, während die EU über ein einzigartiges verteiltes Netz nationaler Metrologieinstitute (NMI) verfügt, das zur **Generierung** der genauen, mit der UTC(k) synchronisierten Zeit genutzt werden kann.

3.4.13 Weltraumnutzer

Der **weltraumbezogene GNSS-Markt hat sich** im letzten Jahrzehnt **extrem schnell entwickelt**, was zu einem tiefgreifenden Paradigmenwechsel in der Weltraumindustrie geführt hat. Wie die Öffnung des Sektors für nichtstaatliche und stärker geschäftsorientierte Akteure zeigt, hat sich ein disruptiver, kommerziell orientierter weltraumbezogener Ansatz herausgebildet, der in Verbindung mit bedeutenden technologischen Fortschritten eine Erhöhung der Zahl von Satelliten und Weltraumdiensten bewirkt hat. Zu Beginn des dritten Jahrtausends umkreisten etwa 800 Satelliten aktiv die Erde. Zwanzig Jahre später liegt diese Zahl bei über 3 000 und wird sich in den nächsten zehn Jahren voraussichtlich vervierfachen. Unter Hervorhebung der Demokratisierung des Weltraums in unserer Gesellschaft und der Konvergenz des Sektors mit den immer stärker digitalisierten menschlichen Tätigkeiten ist die Entwicklung neuer Mega-Satellitenkonstellationen in erdnahen Umlaufbahnen (LEO) ein Marker für diese neuen Ära.

Angesichts der Serienfertigung von Satelliten, der fast täglichen Starts, der Massenproduktion von Ausrüstungen und der Industrialisierung von Prozessen wird die Weltraumumgebung zunehmend als Gebrauchsgegenstand betrachtet, und **weltraumgestützte GNSS-Empfänger werden immer häufiger eingesetzt** und sind für Weltraumnutzer von LEO-Höhen (d. h. 300 km) bis hin zur Mondtransferbahn von Bedeutung.

Weltraumgestützte GNSS-Empfänger unterscheiden **sich nicht grundlegend von klassischen GNSS-Empfängern**. Sie führen dieselben Funktionen aus und bieten dieselben PVT-Dienste, müssen aber den **spezifischen Zwängen der Weltraumumgebung** Rechnung tragen (z. B. hohe Dynamik, reduzierte Signalleistung und Sichtbarkeit, Sonneneinstrahlung). Die Rolle des eingebetteten GNSS-Empfängers hängt von der Mission des entsprechenden Raumfahrzeugs ab. GNSS-Empfänger können als Teilsystem für die Lenkung und Navigationskontrolle (d. h. für die präzise Bestimmung der Umlaufbahn, die Bestimmung der Fluglage oder die Synchronisation) verwendet werden, aber auch als eine der Nutzlasten, die unmittelbar den Zielen der Mission dienen (z. B. Messungen der Radio-Okkultation).

Die **Vorteile von GNSS-gestützten Lösungen an Bord von Raumfahrzeugen** reichen von der Verringerung der Abhängigkeit der Raumfahrzeuge von Bodenstationen bis hin zu einer Verbesserung der Navigationsleistung. Auch die Sicherheit der Weltrauminfrastrukturen ist zu einer treibenden Kraft für weltraumgestützte Entwicklungen geworden, da die Bedrohung durch offensive Weltraumabwehrfähigkeiten zunimmt. Um Weltraumnutzern die Entwicklung von GNSS-Lösungen zu erleichtern, die von der kombinierten Nutzung bestehender globaler und regionaler Navigationssysteme profitieren, hat der [Internationale Ausschuss für globale Satellitennavigationssysteme \(International Committee on Global Navigation Satellite Systems, ICG\)](#) ein Dokument mit dem Titel [„The Interoperable Global Navigation Satellite Systems Space Service Volume“](#) herausgegeben, um die Vorteile bestehender globaler und regionaler Navigationssysteme zu nutzen, wenn diese zusammen verwendet werden, um bessere Kapazitäten bereitzustellen.

In der EU ist die wichtigste Initiative zur Erleichterung der Nutzung von Galileo durch Weltraumnutzer die formale Definition eines **Galileo-Weltraumdienstvolumens** als Teil der Mission **für die zweite Generation von Galileo** (siehe [3.2.1.2](#) für weiterführende Informationen). Dadurch wird sichergestellt, dass alle erforderlichen Maßnahmen durchgeführt werden, damit im Rahmen von Galileo Verpflichtungen hinsichtlich des Leistungsniveaus eingegangen werden können, das die Nutzer bei der Nutzung von Galileo-Signalen im Weltraum erreichen können. Es sei daran erinnert, dass die Galileo-Signale unter den GNSS-Systemen für Weltraumnutzer am besten geeignet sind, da die Galileo-Satelliten in größerer Höhe positioniert sind und die [Authentisierung von Navigationsnachrichten im offenen Dienst von Galileo](#) zur Verfügung steht.

Schließlich erfolgt im Rahmen des [Horizont-2020-Programms „In-Orbit-Demonstration/Validation \(IOD/IOV\)“](#) (Demonstration/Validierung im Orbit) derzeit eine **Validierung** der Leistung der **genauen Umlaufbahnbestimmung anhand von Galileo-Signalen** in einer typischen Konfiguration von kostengünstigen Empfängern.

Weitere Informationen sind dem [Report on Space User Needs and Requirements](#) (Bericht über die Bedürfnisse und Anforderungen von Weltraumnutzern) der EUSPA zu entnehmen.

3.4.14 Sicherheit und Verteidigung

Sicherheits- und Militäroperationen hängen in hohem Maße von weltraumgestützten Daten und Funktionen ab, einschließlich solchen mit Doppelnutzung, um sichere, zuverlässige und hochleistungsfähige Dienste in einem sich entwickelnden Bedrohungsumfeld bereitzustellen. Im [Strategischen Kompass für Sicherheit und Verteidigung](#) wurde der Weltraum als strategischer Bereich ermittelt und eine [EU-Weltraumstrategie für Sicherheit und Verteidigung](#) gefordert, die im März 2023 veröffentlicht wurde.

Das [EU-Programm für Sicherheitsforschung und Innovation](#) und die Maßnahmen im Bereich Forschung und Entwicklung (FuE) im Rahmen des [Clusters 3 „Zivile Sicherheit für die Gesellschaft“ von Horizont Europa](#) und seiner Vorläufer im Rahmen von [Horizont 2020](#), des [Siebten Forschungsrahmenprogramms](#) und der [vorbereitenden Maßnahmen für die Sicherheitsforschung](#), über die seit 2004 mehr als 700 Projekte finanziert wurden, fördern die Zusammenarbeit und umfassen die Entwicklung und Nutzung von PNT/GNSS für Sicherheitsaufgaben wie Strafverfolgung, Grenzmanagement, maritime Sicherheit, Schutz kritischer Infrastrukturen und Katastrophenresilienz. **Die Sicherheitsprojekte im Rahmen des Clusters 3 von Horizont Europa schreiben bei der Entwicklung einschlägiger PNT-Funktionen die Nutzung des EU-Weltraumprogramms vor.** Die FuE-Maßnahmen im Rahmen des [Europäischen Verteidigungsfonds \(European Defence Fund, EDF\)](#) und seiner Vorläufer sowie des [Europäischen Programms zur industriellen Entwicklung im Verteidigungsbereich \(European Defence Industrial Development Programme, EDIDP\)](#) und der [Vorbereitenden Maßnahme im Bereich Verteidigungsforschung \(Preparatory Action on Defence Research, PADR\)](#) umfassen die Entwicklung von Galileo- und anderen PNT-Technologien für militärische Nutzer. Der EDF fördert die Zusammenarbeit zwischen Unternehmen und Forschungsakteuren jeder Größe und geografischer Herkunft in der EU im Interesse modernster interoperabler Verteidigungstechnologie und -ausrüstung. Außerdem sollen zur Verwirklichung des Ziels eines „ununterbrochenen Zugangs zu PNT weltweit“ die Leistung und die Resilienz von PNT verbessert werden. Von den zahlreichen vergebenen Projekten sind die folgenden FuE-Maßnahmen für PNT-Dienste relevant:

- [GEODE – Galileo for EU defence](#) (Galileo für die Verteidigung in der EU), EDIDP 2019: Prototypentwicklung, Testung und Qualifizierung mehrerer Galileo-PRS-fähiger PNT-Lösungen für verteidigungsspezifische Anforderungen und Anwendungen (sieben PRS-Sicherheitsmodule, neun PRS-Empfänger, vier GPS-/Galileo-PRS-kompatible Antennen mit kontrolliertem Strahlungsmuster) sowie Schaffung einer europäischen PNT-Test- und Qualifizierungseinrichtung. Außerdem wird die PRS-Infrastruktur entwickelt, um die Verfügbarkeit der für die Betriebstests der Empfänger erforderlichen Sicherheitsmittel zu gewährleisten. In mehreren Mitgliedstaaten werden militärische Feldversuche mit See- und Landplattformen, RPAS sowie Zeitgebungs- und Synchronisierungssystemen durchgeführt.
- [Quantaquest – Quantum Secure Communication and Navigation for European Defence](#) (Quantensichere Kommunikation und Navigation für die europäische Verteidigung), PADR 2019: Beitrag zur Anwendbarkeit von Quantentechnologien im militärischen Bereich und zur strategischen Autonomie Europas. Navigation und Zeitgebung werden durch einen völlig autonomen Sensor auf der Grundlage eines Kaltatom-Chips und eines integrierten Photonik-Schaltkreises erreicht, die die erforderliche Leistung und Tragbarkeit bieten. Die sichere Kommunikation wird durch ein neues Modulationsschema zur Implementierung der Quantenschlüsselverteilung verbessert. Die Kompatibilität des Feldeinsatzes wird durch ein Freiraumkonzept sichergestellt. Die Quantenschnittstelle dient als Eingangstor zu einem Quantensensornetz.
- [NAVGUARD – Advanced Galileo PRS resilience for EU Defence](#) (Erhöhung der Resilienz des öffentlichen regulierten Dienstes von Galileo für die Verteidigung in der EU), EDF 2021: Stärkung der Resilienz des Galileo-PRS durch neue boden- und weltraumgestützte Systeme. Es soll eine europäische NAVWAR-Funktion entwickelt werden, die sich die GNSS-Spektrumsüberwachung durch boden- und weltraumgestützte Systeme zunutze macht, um unrechtmäßige Aktivitäten in GNSS-Frequenzbändern zu erkennen und ihre Quellen zu geolokalisieren. Im Rahmen des Projekts wird auch ein Teilsystem für das Informationsmanagement zusammen mit einer Nutzerschnittstelle zur Erstellung eines Lagebildes entwickelt, prototypisiert und getestet. Fünf verschiedene mobile PRS-Empfänger werden zusammen mit einer In-Orbit-Demonstration eines weltraumgestützten PRS-Ergänzungssystems zur NAVWAR-Gesamtfunktion beitragen.
- [AI-ARC – Artificial Intelligence based Virtual Control Room for the Arctic](#) (Auf künstlicher Intelligenz basierender virtueller Kontrollraum für die Arktis) und [FOLDOUT – Through-foilage detection, including in the outermost regions of the EU](#) (Erkennung in dichter Bewaldung, auch in den Gebieten in äußerster Randlage der EU): Entwicklung und Nutzung von PNT-Funktionen für die maritime Sicherheit und zivile Überwachung.

3.4.15 Bedürfnisse von Nutzern im multimodalen Verkehr

GNSS werden von Verkehrsbetrieben und Anbietern von On-Demand-Diensten auf verschiedene Weise **genutzt**, angefangen von einem effizienteren Flottenmanagement bis hin zu genauen Fahrgastinformationen. **GNSS-gestützte Lösungen können zudem eine Weiterentwicklung nachhaltiger Verkehrsarten ermöglichen**, indem sie als Basis für geteilte Mobilität wie Car-Sharing oder freies Fahrrad-Sharing dienen.

Obwohl der Einsatz von GNSS im öffentlichen Verkehr im Vergleich zu anderen Sektoren relativ begrenzt ist, nutzen immer mehr öffentliche Verkehrsbetriebe Galileo-gestützte Anwendungen in ihrem täglichen Betrieb. Dieser **wachsende Trend zur Nutzung GNSS-gestützter Lösungen** ist nicht auf den öffentlichen Verkehr beschränkt, sondern spiegelt sich auch in den ständig wachsenden Mobility-as-a-Service-Lösungen wider, wie im [Report on Public Transport User Needs and Requirements](#) (Bericht über die Bedürfnisse und Anforderungen von Nutzern im öffentlichen Verkehr) der EUSPA beschrieben. Die Nutzung von GNSS ist relevant für die Bereitstellung von Informationen für Fahrgäste über Echtzeit-Standorte von Fahrzeugen (öffentliche Verkehrsmittel und On-Demand) und Verspätungen im Fahrplan, wie in der [Delegierten Verordnung \(EU\) 2017/1926 der Kommission](#) über multimodale Reiseinformationssysteme gefordert.

Zwei Hauptkategorien sind von der Zunahme GNSS-gestützter Dienste betroffen:

- **Intelligente Mobilität:** Ein effizienter öffentlicher Verkehr erfordert eine höhere Leistung von GNSS-gestützten Lösungen. In diesem Zusammenhang können Multikonstellations-Mehrfrequenzempfänger die Ortung in städtischen Umgebungen verbessern, um den anspruchsvollsten Anwendungen wie Kollisionsvermeidung, Spurhaltung und automatisches Bremsen gerecht zu werden, die Authentifizierung, Integrität und Robustheit erfordern. Darüber hinaus erfordert die zunehmende Kombination mehrerer Verkehrsträger für dieselbe Fahrt Echtzeitinformationen über den Standort der Fahrzeuge und Verspätungen.
- **Sicherheitskritische Anwendungen** wie die Notbremsung von Straßenbahnen oder die Türsteuerung von Zügen können dank EGNSS-Signalen und spezifischen Diensten (Galileo-OSNMA, Galileo-HAS) ermöglicht werden.

3.4.16 Güterverkehr und Logistik

Der digitale Wandel des Güterverkehrs- und Logistiksektors, einschließlich der Umsetzung der [Verordnung \(EU\) 2020/1056 über elektronische Frachtbeförderungsinformationen](#) und der Arbeit des [Forums für die Digitalisierung in Verkehr und Logistik](#) mit Schwerpunkt auf dem papierlosen Transport- und Korridor-Frachtinformationssystem, eröffnet die Möglichkeit, **eine Reihe neuer Dienste für den multimodalen Verkehr und die Logistik, einschließlich PNT-Technologien**, zu entwickeln.

Beispiele für die Nutzung von GNSS in diesem Sektor:

- **Echtzeit-Nachverfolgung von Containern** innerhalb der multimodalen Logistikkette und zwischen den einzelnen Verkehrsträgern und Akteuren, die durch den Echtzeit-Zugang zu PNT-Informationen ermöglicht wird. Dies ermöglicht auch den Einsatz von Echtzeit-Ferndiagnose-Überwachungssystemen;
- Verwendung von PNT-Daten, die bei Unfällen die Verbindung zwischen dem **Gefahrguttransport** und den Rettungsdiensten herstellen und den Echtzeit-Standort des Gefahrgutfahrzeugs und den genauen Inhalt der Ladung angeben;
- Verbesserung der **Güterverkehrsmanagementdienste** durch Verkehrsakteure wie Bahndienstleister, um eine stärkere Ausrichtung auf die Anlagen zu erreichen. Eisenbahnunternehmen und Infrastrukturbetreiber profitieren von der Digitalisierung, weil sie eine Verbesserung der **Verwaltung und Wartung der Anlagen** und dadurch eine Senkung der Betriebskosten bewirkt. Diese werden von der Europäischen Kommission als nachhaltiges, intelligentes und sicheres Mittel des Güterverkehrs anerkannt, wobei GNSS-Empfänger zur Nachverfolgung von Fahrzeugen eingesetzt werden (mehr als 50 000 Güterwagen mehrerer EU-Eisenbahnunternehmen sind bereits mit GNSS-gestützten Telematiklösungen ausgestattet).

Weiterführende Informationen sind [Marktbericht 2022 der EUSPA zu Erdbeobachtung und GNSS](#) zu entnehmen.

3.5 EU-Zusammenarbeit bei der Satellitennavigation

Bei der Satellitennavigation arbeitet die EU mit mehreren Ländern und internationalen Organisationen zusammen. Diese Zusammenarbeit reicht von der Beteiligung von Nicht-EU-Ländern an den Komponenten des EU-Weltraumprogramms bis zur Zusammenarbeit auf der Grundlage von GNSS-Kooperationsabkommen.

Was die Beteiligung an Komponenten des EU-Weltraumprogramms betrifft, so

- beteiligt sich **Norwegen** über die Mechanismen des [Europäischen Wirtschaftsraums \(EWR\)](#) an [Galileo](#), [EGNOS](#) und [Copernicus](#);
- beteiligt sich **Island** über den EWR an [EGNOS](#) und [Copernicus](#);
- beteiligt sich die **Schweiz** auf der Grundlage des 2013 unterzeichneten GNSS-Kooperationsabkommens an [Galileo](#) und [EGNOS](#).

Darüber hinaus bestehen die folgenden **GNSS-Kooperationsabkommen**:

- zwischen der EU und **Norwegen**, unterzeichnet 2009, über Sicherheit, Ausfuhrkontrollen und den Schutz des Funkfrequenzspektrums sowie von Galileo- und EGNOS-Stationen in Gebieten unter norwegischer Kontrolle;
- zwischen der EU und der **Agentur für die Sicherheit des Flugverkehrs in Afrika** (Agency for Aerial Navigation Safety in Africa, ASECNA), unterzeichnet 2016, über die Entwicklung der Satellitennavigation und die Erbringung damit verbundener Dienste im Zuständigkeitsbereich der ASECNA zum Nutzen der Zivilluftfahrt. Im Rahmen dieses Abkommens unterstützt die EU die ASECNA bei der Entwicklung eines satellitengestützten Augmentationssystems.
- Die EU hat ferner GNSS-Kooperationsabkommen mit **Südkorea** und **Marokko** geschlossen, die sich auf Schutz von Frequenzen, Normen, Handel sowie wissenschaftliche und technische Zusammenarbeit beziehen.

Die Europäische Union und ihre Mitgliedstaaten unterhalten seit 2004 eine **privilegierte Zusammenarbeit mit den Vereinigten Staaten** im Bereich der Satellitennavigation, als die Parteien ein [Abkommen über die Förderung, Bereitstellung und Nutzung von Galileo- und GPS-Satellitennavigationssystemen und verbundenen Anwendungen](#) unterzeichneten. Ziel der Zusammenarbeit ist es, die Interoperabilität des GPS und von Galileo sowie der weltraumgestützten Augmentationssysteme auf Nutzerebene zugunsten der zivilen Nutzer zu gewährleisten. Die Zusammenarbeit zielt auch auf die Aufrechterhaltung eines fairen Handels auf dem globalen Markt für Satellitennavigation ab. Das Abkommen zwischen der EU und den USA wurde 2022 im Wege des [Beschlusses \(EU\) 2022/1089 des Rates](#) verlängert.

Im GPS-Galileo-Abkommen sind drei Arbeitsgruppen für die Zusammenarbeit vorgesehen:

- **Arbeitsgruppe A „Funkfrequenzkompatibilität und Interoperabilität“**: Diese Arbeitsgruppe stellt unter anderem sicher, dass Galileo und das GPS auf Ebene der Funkfrequenzen kompatibel sind, u. a. durch die ITU-Koordinierung, und hat zum Ziel, die jeweiligen zivilen Signale auf System- und Empfängerebene so weit wie möglich interoperabel zu machen. Überdies hilft die Arbeitsgruppe A auch dabei, die Maßnahmen der EU und der USA in anderen Regulierungsforen zugunsten des GNSS zu koordinieren.
- **Arbeitsgruppe B „Handel und zivile Anwendungen“**: Diese Arbeitsgruppe soll sicherstellen, dass auf beiden Seiten keine regulatorischen Hindernisse entstehen, die der Nutzung des GPS bzw. von Galileo und der entsprechenden Anwendungen auf den jeweiligen Märkten im Wege stehen würden.
- **Arbeitsgruppe C „Konzipierung und Entwicklung der nächsten Systemgeneration“**: Diese Arbeitsgruppe arbeitet im Rahmen von drei speziellen Untergruppen an drei Tätigkeitsbereichen:
 - **Untergruppe „Weiterentwicklung“**: Der Schwerpunkt dieser Untergruppe liegt auf folgenden Bereichen:
 - FuE-Maßnahmen für den Einsatz der ARAIM in der Luftfahrt und anderen Bereichen und Beitrag zur Vorbereitung von ARAIM-Normen für die Luftfahrt;
 - Koordinierung langfristiger FuE-Maßnahmen für das GPS/WAAS und Galileo/EGNOS;
 - Koordinierung der SBAS-Definition der nächsten Generation für andere Nutzergruppen als die Luftfahrt;

- Untergruppe „Bereitstellung von Diensten“: Diese Untergruppe befasst sich vorwiegend mit Aspekten, die für die Bereitstellung von Navigationsdiensten von strategischer Bedeutung sind, und tauscht sich über Aspekte der Bereitstellung von GNSS-Diensten, den Status und Pläne sowohl für EGNOS/Galileo als auch für das WAAS/GPS aus;
- Untergruppe „Resilienz“: Der Schwerpunkt dieser Untergruppe liegt auf dem zentralen Thema „Resilienz von GNSS-Systemen gegenüber verschiedenen Arten von Bedrohungen“. Sie entwickelt Rahmen und Normen, die von der ICAO und anderen Gremien verwendet werden. Ziel der Untergruppe „Resilienz“ ist somit, das GPS, Galileo, ihre Augmentationen und ihre Anwendungen resilienter gegenüber schädlichen Störungen zu machen. Das langfristige Ziel besteht darin, Lösungen zu entwickeln und Empfehlungen auszusprechen, die in künftige Empfänger, Systeme und Dienste integriert werden können.

Die EU beteiligt sich am [Internationalen Ausschuss für globale Satellitennavigationssysteme \(ICG\)](#), der 2005 vom Büro der Vereinten Nationen für Weltraumfragen eingerichtet wurde. Der ICG fördert die Zusammenarbeit bei zivilen PNT-Anwendungen und weltweiten Anwendungen der Satellitennavigationstechnologie. Er unterstützt die Koordinierung zwischen GNSS-Anbietern, regionalen Systemen und Augmentationen, um eine größere Kompatibilität, Interoperabilität und Transparenz zu fördern und die Einführung und Nutzung dieser Dienste und ihrer künftigen Verbesserungen, auch in Entwicklungsländern, zu unterstützen.

Außerdem arbeitet die EU über die [Internationale Fernmeldeunion \(ITU\)](#) mit den Mitgliedstaaten und anderen GNSS-Anbieternationen zusammen, um sicherzustellen, dass die für Galileo und andere GNSS genutzten Funkfrequenzen verfügbar und vor Störungen geschützt sind und dass die globalen Vorschriften für die Funknutzung keine Auswirkungen auf GNSS haben. Diese Tätigkeit findet in erster Linie in ITU-Arbeitsgruppen (hauptsächlich ITU-R WP 4C) sowie auf den alle vier Jahre stattfindenden Weltfunkkonferenzen statt.

Schließlich arbeitet die EU in Fragen der internationalen Satellitennavigation auch in anderen multilateralen Gremien mit, einschließlich

- der [Internationalen Zivilluftfahrt-Organisation \(ICO\)](#) und
- [der Internationalen Seeschiffahrtsorganisation \(IMO\)](#).

4 Vision für PNT in der EU

In den vorangegangenen Abschnitten wurde das PNT-Ökosystem in der Europäischen Union dargelegt, die Bedeutung von Galileo und EGNOS für alle Märkte erörtert und die ständige Einführung neuer Dienste beschrieben. Zudem wurden Einschränkungen und mögliche Bedrohungen für PNT-Dienste sowie neue PNT-Technologien behandelt, mit denen einige dieser Bedenken ausgeräumt werden.

In diesem Abschnitt wird die (mittelfristige) Vision für das PNT-Ökosystem in der EU beschrieben. Bei der Entwicklung dieser Vision wurden die wichtigsten Trends berücksichtigt: neue Konstellationen und Signale, Verbesserungen bei Hardware und Verarbeitungsalgorithmen, Zunahme bei Funkfrequenzstörungen und globale Konnektivität.

Aus Sicht der **Marktsegmente** ist die im [GNSS-Anwendertechnologie-Bericht der EUSPA2020](#) aufgezeigte Tendenz weitgehend gültig, wonach PNT-Dienste im Rahmen eines Sensorfusionskonzepts auf Nutzerebene kombiniert werden, um die erforderliche Leistung zu erzielen:

- Der **Massenmarkt** wird zwar kostengünstige Hardware nutzen, aber einen immer höheren Bedarf an **hochpräzisen PNT-Diensten** (Genauigkeit im Zentimeterbereich) haben, insbesondere nach dem kostenlosen Hochpräzisionsdienst von Galileo für intelligente Verkehrssysteme, bei denen durch PPP erweiterte GNSS-Dienste, Sensordaten und 5G kombiniert werden. Die Nutzung von Multikonstellationen und Zweifrequenzen wird zur allgemeinen Praxis werden.
- **Professionelle Anwender** werden hochpräzise Dienste mit Multikonstellationen und Mehrfrequenzen (z. B. Dreifrequenzen) erfordern, die vollständig in ein vernetztes und automatisiertes Workflow-Management integriert sind. Künstliche Intelligenz wird sich durchsetzen und dieses Marktsegment revolutionieren.
- **Sicherheits- und haftungskritische Bereiche**, die traditionell durch Vorschriften und Normen eingeschränkt sind, werden neue Technologien viel langsamer übernehmen. Während wichtige Arbeiten zur Entwicklung standardisiert Multikonstellations- und Zweifrequenzlösungen durchgeführt werden, liegt die eigentliche Herausforderung in der Normung resilienter und gegen RFI resistenter Lösungen. Darüber hinaus wird weiterhin die Integrität hochpräziser Dienste für die (bemannte und unbemannte) Luftfahrt sowie für autonome Fahrzeuge und Schiffe angestrebt werden.
- Die Bedeutung der Zeitgebung wird exponentiell zunehmen, da Lösungen für die Zeitsynchronisierung und -verteilung für die Bereiche **kritische Infrastrukturen**, Telekommunikation, Energie, Finanzen oder Verkehr unerlässlich sind. Resiliente Zeitgebung wird ein Muss werden, und Mehrfrequenz-, Mehrkonstellations-, T-RAIM-, Störungsüberwachungs- und alternative PNT-Dienste werden zur Ergänzung von GNSS kombiniert werden.

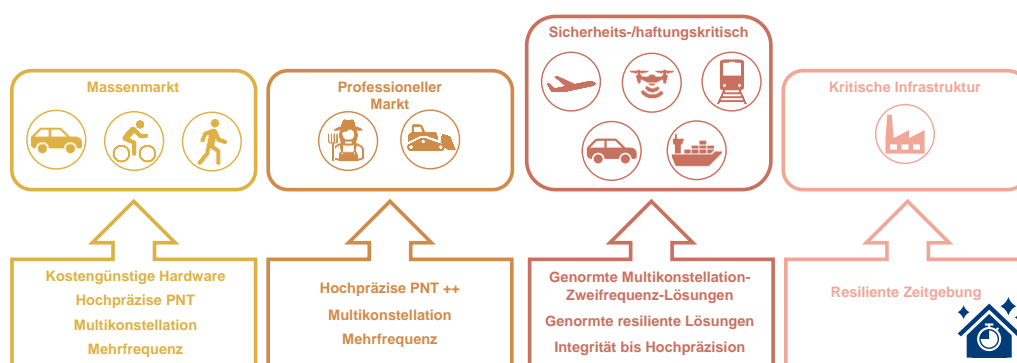


Abbildung 19 – Vision für PNT in der EU nach Marktsegmenten

Unter dem Gesichtspunkt der Architektur der PNT-Systeme wird das PNT-System in der EU zu einem [System von PNT-Systemen](#) werden, mit einer Kombination aus GNSS, konventionellen und neuen PNT-Diensten, die alle mit der UTC(k) synchronisiert sind:

1. Die **europäischen GNSS** (Galileo und EGNOS) werden **zusammen mit dem GPS** weiterhin das **Rückgrat der PNT-Dienste in der EU** bilden. Die europäischen GNSS-Dienste werden durch neue Dienste (Hochpräzision, Authentifizierung usw.), verbesserte Infrastruktur (zweite Generation von Galileo,

zweite Generation von EGNOS) und spezielle Überwachungsfunktionen gestärkt und verbessert werden. Die Europäische Kommission wird die Nutzung der Galileo- und EGNOS-Dienste durch neue Verordnungen, Normen und die Finanzierung von Projekten für innovative Anwendungen weiter vorantreiben.

Hochpräzise GNSS-Dienste wie der Hochpräzisionsdienst von Galileo, RTK oder PPP werden für Hochpräzisionsanwendungen in hohem Ausmaß genutzt werden.

Für bestimmte Anwendungen und Märkte können auch **reine EGNSS-Lösungen** erforderlich sein.

Schließlich könnte die von der EU neu vorgeschlagene Satellitenkonstellation [IRIS²](#) für eine sichere Weltraumkonnektivität zusätzlich zu ihrem primären Kommunikationsauftrag auch als Plattform für ergänzende PNT-Dienste dienen.

2. **Neue PNT-Dienste**, die unabhängig von GNSS alternative PNT-Dienste bereitstellen können, werden sich **weiterentwickeln**, und immer mehr von ihnen werden ausgereift und kommerziell verfügbar sein, um den Bedürfnissen spezifischer Märkte (z. B. Innenräume) gerecht zu werden oder als Backup für GNSS-Dienste zu dienen, insbesondere in Bezug auf Zeitgebung für kritische Infrastrukturen. Die EU empfiehlt die Entwicklung sektorübergreifender alternativer PNT-Lösungen.

Was die **Zeitgebung** angeht, so verfügt die EU über die ausgereifte Technologie, um hochpräzise, von GNSS unabhängige Zeitgebungsdienste anzubieten. Das Netz der nationalen Metrologieinstitute (NMI) wird eine grundlegende Rolle bei der Zeitgenerierung spielen, während europäische Unternehmen kommerzielle Lösungen für die Zeitverteilung anbieten. Die EU sollte darauf hinarbeiten, das Ökosystem für die Zeitgebung vollständig zu entwickeln und eine kosteneffiziente und resiliente Zeitgebungsdienste für einschlägige Nutzer (z. B. kritische Infrastrukturen) zu gewährleisten.

In Bezug auf **Ortung/Navigation** bietet der Markt einige kommerzielle, von GNSS unabhängige Lösungen, allerdings gibt es derzeit keine ausgereiften Lösungen von EU-Unternehmen. Die EU wird mit ihrer Arbeit die Umsetzung der CER-Richtlinie und der überarbeiteten Richtlinie über die Sicherheit von Netz- und Informationssystemen (siehe Abschnitt [3.4.1](#)) unterstützen und einen Beitrag zur **Verbesserung der Resilienz** der europäischen Wirtschaft und Gesellschaft leisten. Die EU sollte auch die Entwicklung von EU-Lösungen für Anwendungsfälle in Betracht ziehen, die strategische Autonomie erfordern.

3. **Konventionelle PNT-Systeme** werden trotz ihrer Nachteile (z. B. Kosten, veraltete Signale und Hardware-Design) auf stark regulierten Märkten wie im Luft- und Seeverkehr im Einsatz bleiben, und Rationalisierungspläne werden nur langsam umgesetzt werden (auch wegen der langen Lebensdauer der Ausrüstung), während sie auf nicht regulierten Märkten wahrscheinlich verschwinden werden. Einige Systeme (z. B. die Langwellen-Zeit- und Frequenzverteilung) könnten jedoch ihre Bedeutung beibehalten, da sie eine hohe RFI-Resilienz aufweisen, wenn auch mit begrenzter Leistung (z. B. Genauigkeit im Mikrosekundenbereich).

Abschließend ist festzuhalten, dass – aufgrund der integralen Rolle von PNT für das gute Funktionieren von Wirtschaft und Gesellschaft in der EU – **RESILIENTE PNT-DIENSTE von größter Bedeutung sind**. PNT-Dienste, die sich auf GNSS stützen, müssen vielfältig sein und einen ganzheitlichen Mix aus terrestrischen und weltraumgestützten Technologien umfassen, da keine einzelne Technologie, auch nicht GNSS, ein ausreichendes Maß an Resilienz für kritische Nutzer von PNT-Informationen bietet. Resiliente PNT erfordern ferner ein wirksames Überwachungssystem, einschließlich für GNSS-RFI, und die notwendigen Koordinierungsverfahren zwischen GNSS-Anbietern, RFI-Agenturen und Regierungen:

Zur Erzielung resilienter PNT sollte sich das **PNT-Ökosystem in der EU** zu einem **System von PNT-Systemen** entwickeln.

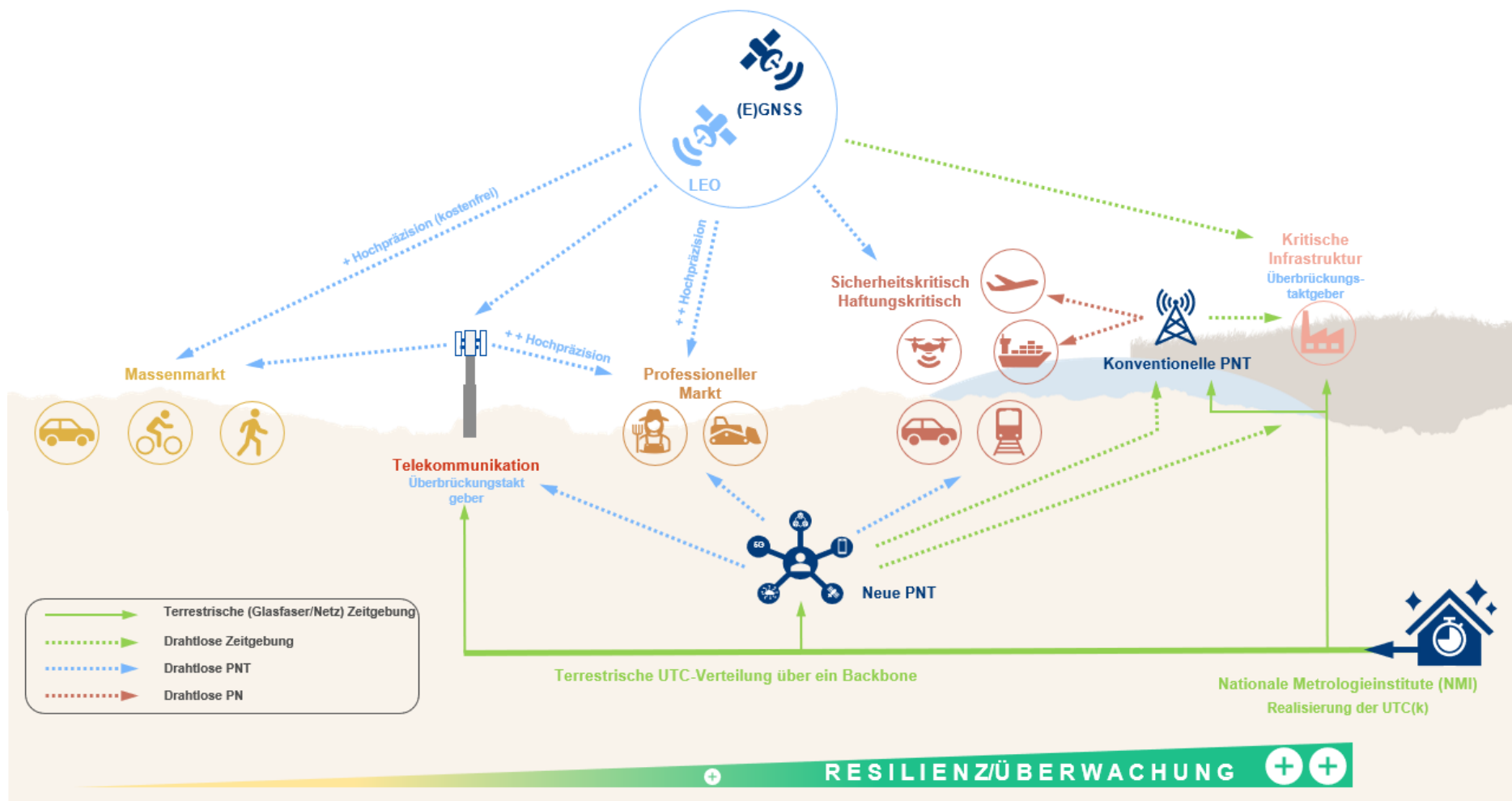


Abbildung 20 – Vision für PNT in der EU

5 ANHANG A: PNT-Systeme

5.1 Globale Navigationssatellitensysteme (GNSS)

Unter einem globalen Satellitennavigationssystem (GNSS) sind **Satellitenkonstellationen zu verstehen, die Signale aus dem Weltraum übertragen und Ortungs- und Zeitgebungsdienste an GNSS-Empfänger erbringen.**

GNSS umfassen Systeme mit globaler Abdeckung, darunter das europäische Galileo, das US-amerikanische NAVSTAR Global Positioning System (GPS), das russische Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (GLONASS) und das chinesische BeiDou Navigation Satellite System, sowie **regionale Systeme**, darunter das System Indian Navigation with Indian Constellation (NavIC), das auch als Regional Navigation Satellite System (IRNSS) bekannt ist, oder das japanische QZSS, die die Region Indien bzw. Asien-Ozeanien abdecken. Die Hauptmerkmale dieser GNSS-Systeme sind in [Table 6](#) dargestellt.

Tabelle – GNSS-Konstellationen (Quelle: GNSS-Anwendertechnologie-Bericht)

GNSS-Konstellationen				
Parameter	Galileo	GPS	BeiDou	GLONASS
Umlaufperiode (MEO)	14 Std. 4 Min.	11 Std. 58 Min.	12 Std. 37 Min.	11 Std. 15 Min.
Umlaufhöhe (MEO)	23 222 km	22 200 km	21 528 km	19 100 km
Neigung (MEO)	56	55	55	64,8
Anzahl der Umlaufbahnebenen (MEO)	3	6	3	3
Bezugsrahmen	GTFR	WGS-84	CGCS 2000	PZ-90
Referenzzeit	Galileo-Systemzeit (GST)	GPS-Zeit (GPST)	BeiDou-Zeit (BDT)	GLONASS-Zeit (GLONASST)

Die Systeme sind so konzipiert, dass sie **kompatibel und interoperabel** sind, wobei Signale verwendet werden, die auf den Frequenzbändern E5/L5, L2, E6 und E1/L1 übertragen werden, wie in [Figure 21](#) dargestellt.

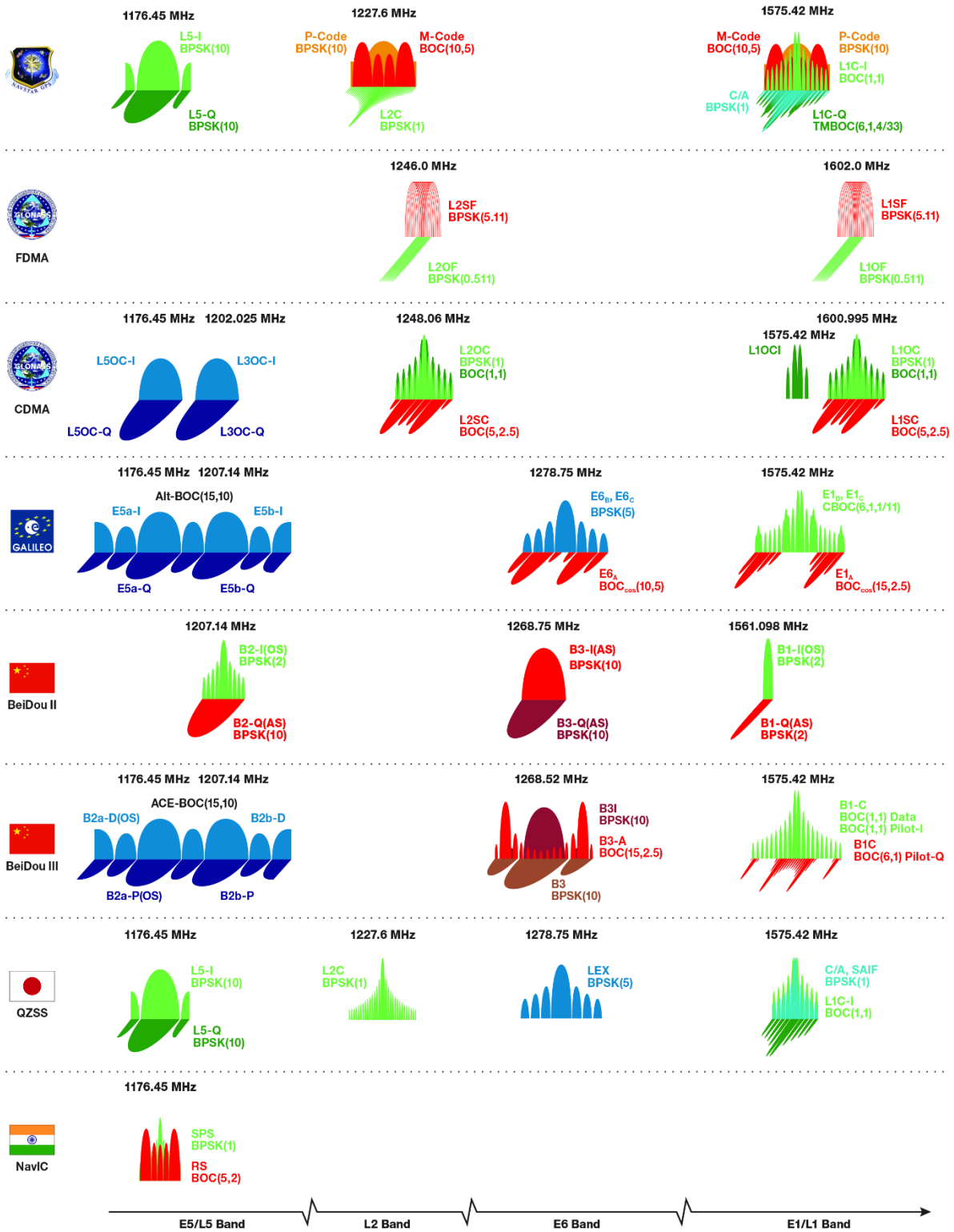


Abbildung 21 – GNSS-Frequenzen (Quelle: Navipedia)

Die typische Positionsgenauigkeit von GNSS-Systemen liegt im Meterbereich, wobei Galileo die beste Leistung erbringt, wie in [Figure 22](#) für die GNSS mit globaler Abdeckung im zweiten Quartal 2022 und in [Abbildung 23](#) für die Entfernungsgenauigkeit im Juni 2022 zu sehen ist (GAL = Galileo, GLO = GLONASS, BDS = BeiDou).

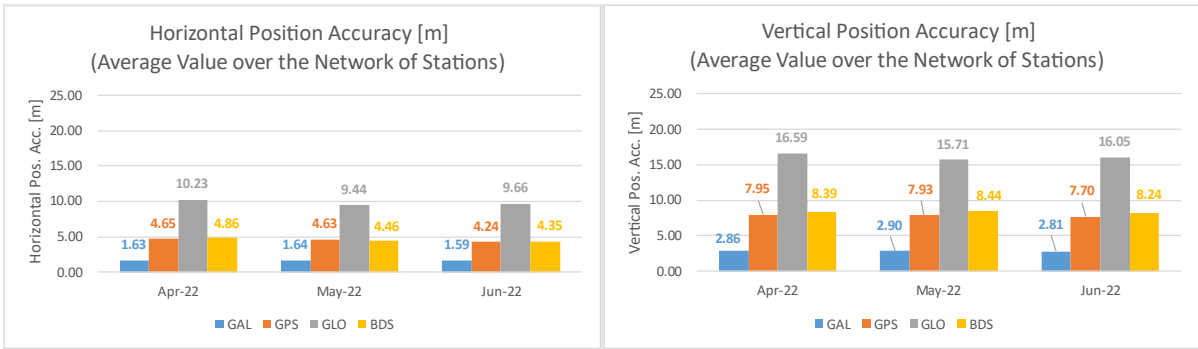


Abbildung 22 – GNSS-Leistung in Bezug auf die horizontale bzw. vertikale Genauigkeit (Quelle: EUSPA)

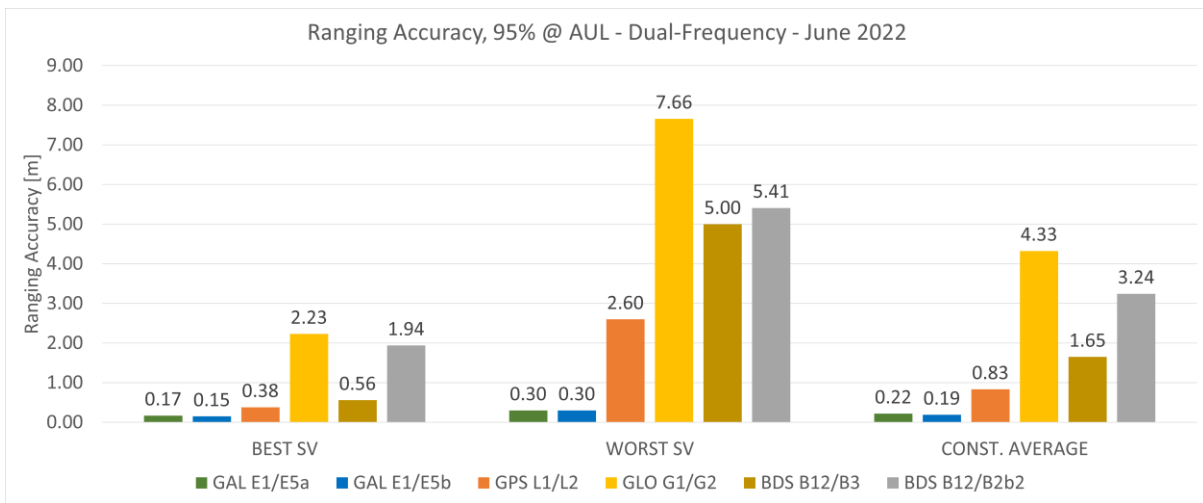


Abbildung 23 – GNSS-Entfernungsgenauigkeit von 95 % für Galileo-, GPS-, GLONASS- und BeiDou-Zweifrequenz-Nutzer

5.1.1 Satellitennavigationssysteme mit globaler Abdeckung

5.1.1.1 Galileo

Galileo ist das europäische globale Satellitennavigationssystem unter **ziviler Kontrolle**, das seit **Dezember 2016** einen globalen und hochpräzisen Ortungsdienst sowie einen Notruflokalisierungsdienst in der europäischen Region für Such- und Rettungszwecke bereitstellt. Es ist mit den anderen globalen Satellitennavigationssystemen interoperabel.

Galileo besteht aus einem Weltraumsegment, einem Bodensegment und einem Nutzersegment.

Eine Konstellation von Satelliten in mittlerer Erdumlaufbahn bildet das **Weltraumsegment von Galileo**. Bei der Basiskonfiguration der Galileo-Konstellation handelt es sich um eine Walker-Konstellation (24/3/1): In drei Umlaufbahnebenen sind 24 nominale MEO-Satelliten mit einer Neigung zum Äquator von 56° angeordnet, deren aufsteigende Knoten in Abständen von 120° gleichmäßig verteilt sind. Jede Umlaufbahnebene umfasst acht Satelliten, die innerhalb der jeweiligen Ebene mit einer Knotenlänge von 45° gleichmäßig verteilt sind. Die Winkelverschiebung zwischen Satelliten in zwei benachbarten Ebenen beträgt 15°. Die Konstellation wird durch Ersatzsatelliten ergänzt, die je nach Bedarf für Wartungsarbeiten oder die Weiterentwicklung von Diensten auf jeden beliebigen nominalen Slot innerhalb jeder Umlaufbahnebene umpositioniert werden können.

Das **Bodensegment von Galileo** umfasst die folgende Kerninfrastruktur:

- zwei **Galileo-Kontrollzentren (Galileo control centres, GCC)** in Oberpfaffenhofen (Deutschland) und Fucino (Italien) mit Kontroll- und Missionsfunktionen, die von einem *Bodenkontrollsegment (ground control segment, GCS)* bzw. einem speziellen *Bodenmissionssegment (ground mission segment, GMS)* an jedem Standort unterstützt werden:
 - Das Bodenkontrollsegment (GCS) ist für die Instandhaltung der Raumfahrzeuge und die Wartung der Konstellation im Wege des weltweit verteilten Netzes von Telemetrie-, Tracking- und Kontrollstationen (telemetry, tracking and control, TT&C) zuständig. Dazu gehören die Kontrolle und Überwachung der Satelliten und der Nutzlast, Planungs- und Automatisierungsfunktionen, die einen sicheren und korrekten Betrieb ermöglichen, sowie die Unterstützung des Nutzlastbetriebs.
 - Das Bodenmissionssegment (GMS) ermittelt den Navigations- und Zeitdatenanteil der Navigationsnachrichten über das Netz der Galileo-Sensorstationen (Galileo sensor stations, GSS) und kommuniziert über das Netz der Galileo-Uplink-Stationen (ULS) mit den Galileo-Satelliten.
- ein weltweites Netz von **Galileo-Sensorstationen (GSS)**, über das Galileo-SIS-Messungen und -Daten in Echtzeit gesammelt und an das GCC weitergeleitet werden;
- ein weltweites Netz von **Galileo-Uplink-Stationen (ULS)**, über das die Missionsdaten an die Galileo-Konstellation verbreitet und hochgeladen werden;
- ein weltweites Netz von **Telemetrie-, Tracking- und Kontrollstationen (TT&C-Stationen)**, über das die von den Galileo-Satelliten generierten Telemetriedaten gesammelt und weitergeleitet werden und die Kontrollbefehle, die für die Aufrechterhaltung des nominalen Betriebs der Galileo-Satelliten und -Konstellation erforderlich sind, verbreitet und hochgeladen werden.

Figure 24 liefert einen Überblick über das Bodensegment von Galileo. Diese enthält jedoch nur die Funktionen des Galileo-Bodensegments im Zusammenhang mit dem offenen Dienst (OS).

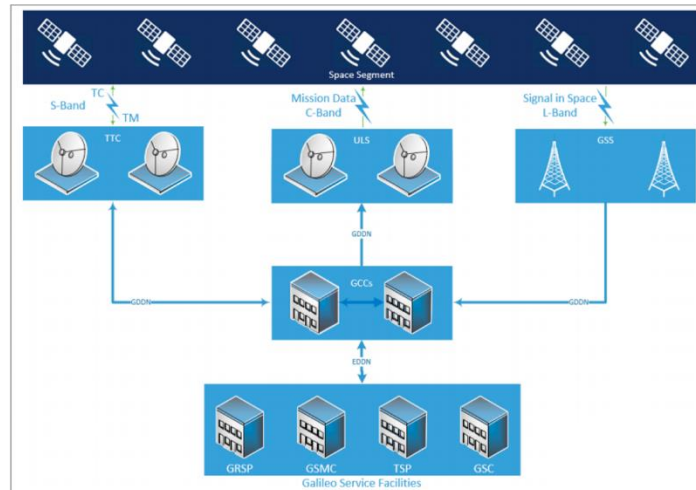


Abbildung 24 – Hochrangiges Schema der Architektur des Bodensegments von Galileo

Die **Galileo-Serviceeinrichtungen** sind Elemente, die sich außerhalb des Bereichs der Galileo-Kerninfrastruktur befinden und die Bereitstellung der Galileo-Dienste unterstützen.

Die Serviceeinrichtungen, die zur Bereitstellung des offenen Dienstes von Galileo beitragen, sind folgende:

- Europäisches GNSS-Dienstezentrum (GSC): Das GSC ist die Schnittstelle zwischen der Nutzergemeinschaft des offenen Dienstes von Galileo und dem Galileo-System.
- Anbieter von geodätischen Referenzdiensten (Geodetic Reference Service Provider, GRSP): Diese Einrichtung unterstützt das GCC bei der Umsetzung des terrestrischen Bezugsrahmens für Galileo (GTRF) im Einklang mit dem internationalen terrestrischen Bezugsrahmen (ITRF).
- Zeitdienstanbieter (Time Service Provider, TSP): Diese Einrichtung unterstützt das GCC bei der Realisierung der Galileo-Systemzeit (GST) und ihrer Anpassung an die koordinierte Weltzeit (UTC).
- Galileo-Sicherheitsüberwachungszentrale (Galileo Security Monitoring Centre, GSMC): Diese Einrichtung ist für die Überwachung der Systemsicherheit zuständig.
- Galileo-SAR-Datendienstanbieter (SAR/Galileo Data Service Provider, SGDSP): Diese Einrichtung ist für die Koordinierung der Operationen im Zusammenhang mit dem SAR-/Galileo-Dienst zuständig.
- Galileo-Referenzzentrum (Galileo Reference Centre, GRC): Diese Einrichtung ist für die Überwachung und Bewertung der Leistung der Galileo-Dienste zuständig und ist völlig unabhängig von der Galileo-Kerninfrastruktur und ihrem Betrieb.

Für den Galileo-SAR-Dienst ist eine zusätzliche Infrastruktur sowohl an Bord der Satelliten als auch am Boden erforderlich:

- Das **Weltraumsegment des Galileo-SAR** umfasst Galileo-Satelliten mit SAR-Repeatern. Bei den Galileo-SAR-Repeatern handelt es sich um transparente, auf dem U-Bend-Prinzip beruhende Transponder, bestehend aus einem SAR-Transponder und SAR-Empfangs- und Sendeantennen.
- Das **Bodensegment des Galileo-SAR** umfasst drei MEO Local User Terminals (MEOLUT) in Maspalomas (Spanien), Larnaca (Zypern) und Spitzbergen (Norwegen), die Funkbakenidentifikation und Standortinformationen liefern, sowie fünf Referenzfunkbaken in Maspalomas (Spanien), Larnaca (Zypern), Spitzbergen (Norwegen), Toulouse (Frankreich) und Santa Maria (Portugal). Ab 2023 wird es ein viertes MEOLUT auf der Insel Réunion (Frankreich) geben.

Die folgende Abbildung liefert einen Überblick über die verschiedenen Galileo-Standorte.

Galileo Sites and Ground Stations

- HQ: Headquarters
- GCC: Galileo Control Centre
- GPMC: Galileo Security Monitoring Centre
- SGSC: SAR/Galileo Service Centre
- GSC: GNSS Service Centre
- GRC: Galileo Reference Centre
- GILSC: Galileo Integrated Logistic Support Centre
- TTCCF: Telemetry, Tracking and Command
- ULS: Uplink Station
- GSS: Ground Sensor Station
- MEOLUT: Medium Altitude Earth Orbit Local User Terminal
- REFBE: Galileo/SAR Reference Beacons
- IOT: In-Orbit Testing station



Galileo Sites and Ground Stations status as of September 2021

Abbildung 25 – Galileo-Standorte und -Bodenstationen (Quelle: [GSC](#))

Das [Nutzersegment von Galileo](#) umfasst alle kompatiblen Empfänger und Geräte, die die Galileo-Signale empfangen, Pseudoentfernungen (und andere Beobachtungsgrößen) bestimmen und die Navigationsgleichungen lösen, um ihre Koordinaten zu erhalten und eine genaue Zeitsynchronisierung zu gewährleisten.

5.1.1.1.1 Galileo-Dienste

Eine Beschreibung der Galileo-Dienste findet sich in Abschnitt [3.2](#).

5.1.1.1.2 Hauptmerkmale

[Table 7](#) und [Figure 26](#) zeigen die Hauptmerkmale der Galileo-Signale.

Tabelle 7 – Hauptmerkmale der Galileo-Signale

E1		
Signal	E1 OS	E1 PRS
Frequenz (MHz)	1575,42	1575,42
Zugangstechnik	CDMA	CDMA
Modulation	CBOC (6,1,1/11)	BOC _{cos} (15,2.5)
Minimale Empfangsleistung [dBW]	-157	
E6		
Signal	E6 CS	E6 PRS
Frequenz (MHz)	1278,75	1278,75
Zugangstechnik	CDMA	CDMA
Modulation	BPSK (5)	BOC _{cos} (10,5)
Minimale Empfangsleistung [dBW]	-155	
E5		
Signal	E5a	E5b
Frequenz (MHz)	1176,45	1207,14
Zugangstechnik	CDMA	CDMA
Modulation	AltBOC (15,10)	AltBOC (15,10)
Minimale Empfangsleistung [dBW]	-155	

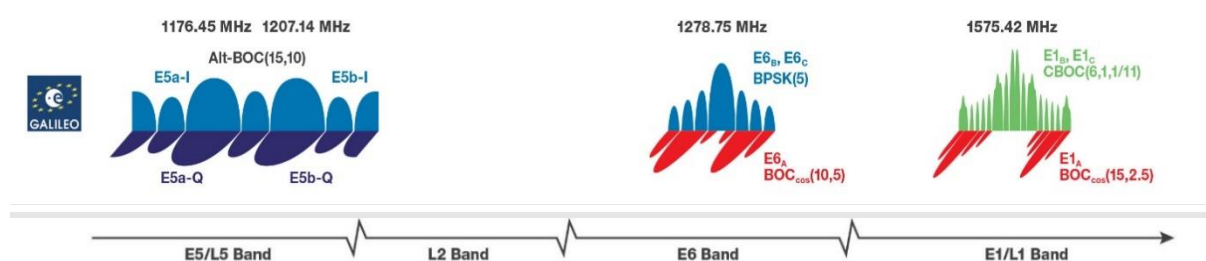


Abbildung 26 – Galileo-Signale (Quelle: [Navipedia](#))

5.1.1.1.3 Leistung

Im [Dokument mit der Dienstdefinition für den offenen Dienst von Galileo](#) ist das Mindestleistungsniveaus für den offenen Dienst von Galileo festgelegt. [Table 8](#) zeigt die typische Leistung für das vollständig in Betrieb genommene Galileo-System.

Tabelle 8 – Leistung der Galileo-Dienste bei vollständiger Inbetriebnahme

	Offener Dienst von Galileo (Ortung und Zeitgebung)	
	Einzelfrequenz	Zweifrequenz
Abdeckung	Weltweit	
Genauigkeit (95 %)	Horizontal: 15 m	Horizontal: 4 m
	Vertikal: 35 m	Vertikal: 8 m
Verfügbarkeit	99,5 %	99,5 %
Genauigkeit der Zeitbestimmung in Bezug auf die koordinierte Weltzeit/internationale Atomzeit	30 ns	Genauigkeit der Zeitbestimmung in Bezug auf die koordinierte Weltzeit/internationale Atomzeit

Weiterführende Informationen über die Leistung des offenen Dienstes oder anderer Dienste wie dem SAR sind den [Dokumenten mit der Dienstdefinition für den offenen Dienst und den Such- und Rettungsdienst](#) zu entnehmen.

5.1.1.1.4 Stand und Modernisierungspläne

Ende 2022 war der **Stand des Weltraumsegments von Galileo** wie folgt:

- 28 Satelliten der ersten Generation waren gestartet worden, davon 26 einsatzfähige Satelliten für die Suche und Rettung und 24 einsatzfähige Satelliten für die Navigation (1 aus dem Reserveslot).
- Zehn Satelliten der ersten Generation waren produziert worden und sind bereit für den Start:
 - Vier Satelliten ermöglichen die volle Betriebsfähigkeit, indem sie alle nominalen Slots besetzen + eine Reserve pro Ebene für Robustheitszwecke.
 - Sechs zusätzliche Satelliten werden die Aufrechterhaltung der Konstellation bis zur Ankunft der Satelliten der zweiten Generation ermöglichen.

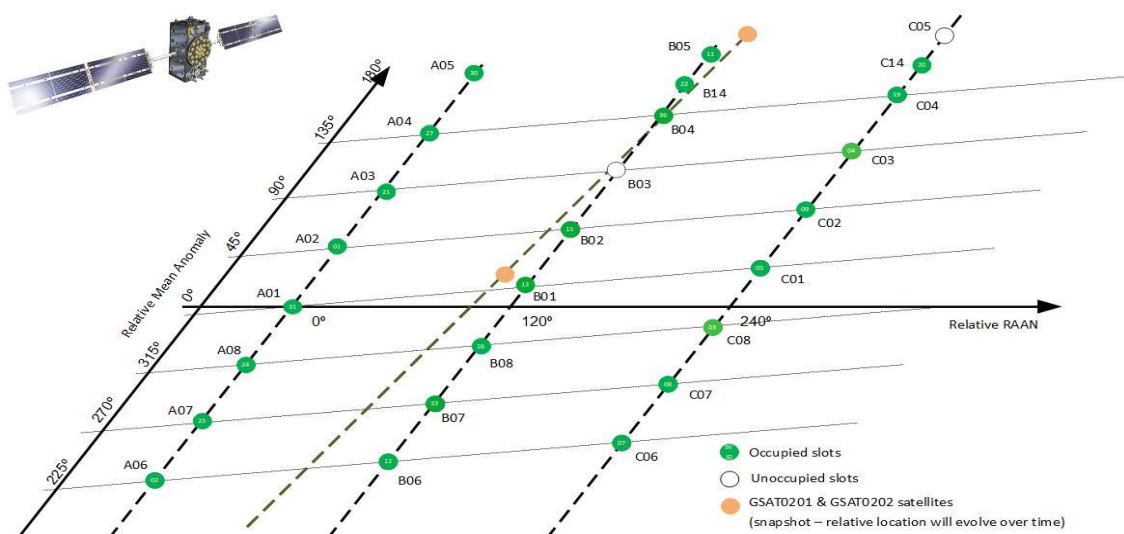


Abbildung 27 – Galileo-Weltraumsegment (Stand Ende 2022)

Die von der ersten Generation von Galileo bereitgestellten Dienste werden durch die neue Generation von Galileo (**zweite Generation von Galileo, G2G**) und die Bereitstellung neuer Dienste verbessert. Diese Dienste sind in der geltenden [EU-Weltraumverordnung](#) ausdrücklich genannt und in Abschnitt [3.2](#) beschrieben. Die folgende Abbildung zeigt die verschiedenen Verbesserungen der Dienste, die G2G bewirken wird:

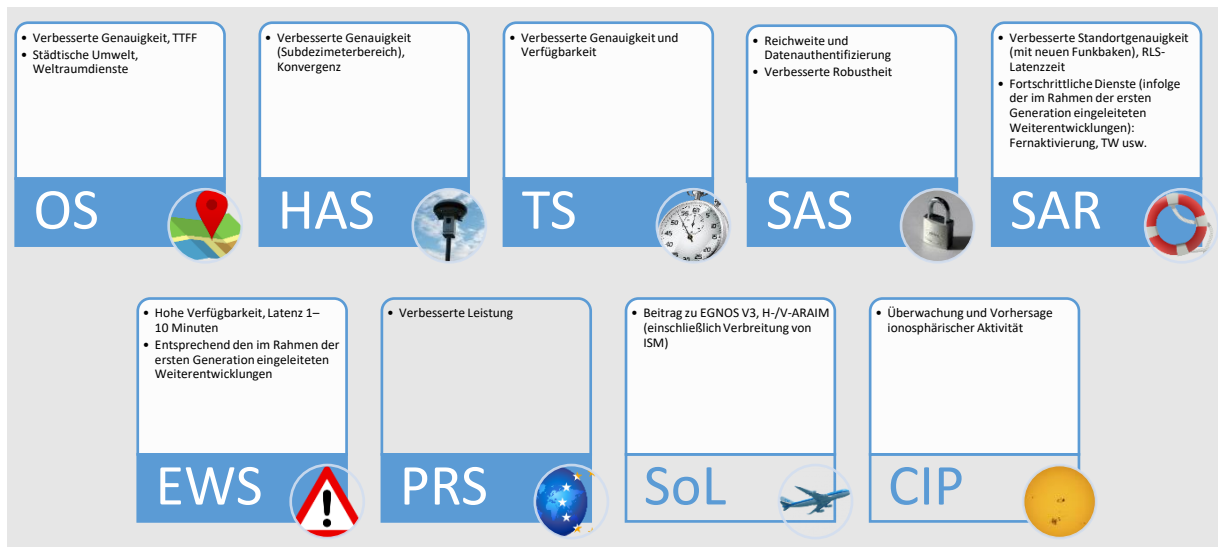


Abbildung 28 – Durch die zweite Generation von Galileo bewirkte Verbesserungen der Dienste

Die **Missionsanforderungen** für G2G wurden bereits festgelegt und sind auch im Wege des [Durchführungsbeschlusses C\(2020\) 8968 der Kommission](#) formalisiert.

Diese neuen und verbesserten Dienste werden dank der neuen Generation von Satelliten und Bodensegmenten mit verbesserten Funktionen erreicht.

Zu den neuen Technologien an Bord gehört ein **elektrischer Antrieb**, der die Satelliten von der Umlaufbahn, in der sie gestartet werden, auf die endgültigen Betriebsumlaufbahnen bringt, sodass trotz ihrer größeren Masse zwei Satelliten gleichzeitig gestartet werden können. Durch die **Intersatellitenverbindungen** zwischen den Satelliten wird die Abhängigkeit vom Kontakt zu Bodenanlagen verringert. Die Satelliten werden sich außerdem durch **stärkere Signale**, eine **flexiblere Nutzlast** einschließlich einer neuen Navigationsantenne, **präzisere Atomuhren an Bord** sowie eine **längere Lebensdauer** auszeichnen.

Das **Bodensegment wird** insgesamt **verbessert**, von der Hardware über die Software bis hin zu den Kommunikationsverbindungen. Die Algorithmen werden weiterentwickelt, und es wird eine zusätzliche Überwachung eingeführt, was zu einer verbesserten Leistung und Robustheit der bereits angebotenen Dienste führen wird. Es werden zusätzliche Funktionen hinzugefügt, die die Steuerung der neuen Funktionen in den Satelliten sowie die Bereitstellung der neuen Dienste ermöglichen werden.

Weitere Informationen zum Galileo-Programm sind den [Galileo-Programmdokumenten](#) zu entnehmen.

5.1.1.2 GPS

Das [Global Positioning System](#) (GPS) ist ein Ortungs-, Navigations- und Zeitgebungssystem, das sich im Besitz der US-amerikanischen Regierung befindet und von der United States Air Force betrieben wird. Es handelt sich um ein System mit Doppelnutzung, das sowohl zivilen als auch militärischen Nutzern zur Verfügung steht. Das GPS besteht aus einem Weltraumsegment, einem Bodensegment und einem Nutzersegment. Es sendet verschiedene Funkfrequenzsignale mit präzisen Zeit- und Standortinformationen von einer Satellitenkonstellation. Durch die Kombination der von mindestens vier Satelliten empfangenen Informationen erhält der Nutzer eine Schätzung seiner Position und Zeit. **Das GPS wurde erstmalig 1993 in Betrieb genommen.** Es bietet eine kontinuierliche, globale Abdeckung, und das bei allen Witterungsverhältnissen.

Eine Konstellation von Satelliten in mittlerer Erdumlaufbahn bildet das **Weltraumsegment des GPS**. Für eine globale Abdeckung sind mindestens 24 Satelliten erforderlich. Allerdings ist die tatsächliche Anzahl der Satelliten in der Umlaufbahn in der Regel höher, wodurch die Leistung des Systems erhöht wird. Die Satelliten befinden sich in sechs gleichmäßig verteilten, um 55° geneigten Umlaufbahnebenen in einer Höhe von 20 200 km. Bei dieser Konstellation sind von jedem Punkt auf der Erdoberfläche stets mindestens vier GPS-Satelliten sichtbar, was für die Positionsbestimmung notwendig ist.

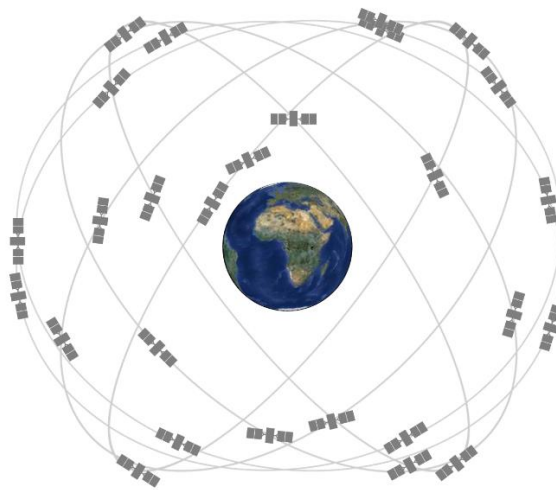


Abbildung 29 – GPS-Konstellation (Quelle: <http://www.gps.gov>)

Seit dem ersten Start im Jahr 1978 haben die USA die Eigenschaften der GPS-Satelliten ständig verbessert. Jede Satellitengeneration bzw. jeder Satellitenblock sendet mehr Signale mit verbesserten Codes auf mehr Frequenzen als die vorherige Generation bzw. der vorherige Block. Modernisierte Satelliten verfügen auch über bessere Komponenten und Eigenschaften: verbesserte Atomuhren, höhere Leistung, längere erwartete Lebensdauer usw. Das Ergebnis ist eine bessere Leistung und Genauigkeit sowohl für zivile als auch für militärische Nutzer. Dieser Weiterentwicklungsprozess wird sich auch in Zukunft fortsetzen.

Die GPS-Konstellation ist eine Mischung aus alten und neuen Satelliten. Die folgende Tabelle liefert einen Überblick über die Merkmale der aktuellen und künftigen Generationen von GPS-Satelliten, einschließlich Block IIA (2. Generation, „Advanced“), Block IIR („Replenishment“), Block IIR-M („Modernised“), Block IIF („Follow-on“), GPS III und GPS III F („Follow-on“).

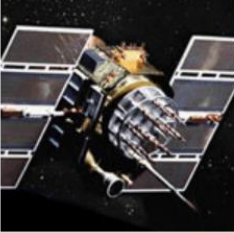
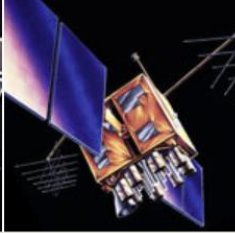
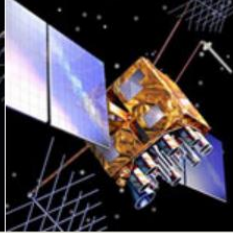
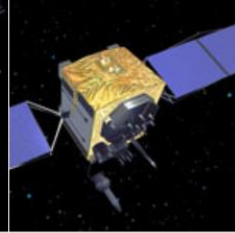
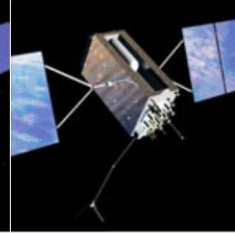
LEGACY SATELLITES		MODERNIZED SATELLITES		
				
BLOCK IIA	BLOCK IIR	BLOCK IIR-M	BLOCK IIF	GPS III/IIF
0 operational	7 operational	7 operational	12 operational	5 operational
<ul style="list-style-type: none"> Coarse Acquisition (C/A) code on L1 frequency for civil users Precise P(Y) code on L1 & L2 frequencies for military users 7.5-year design lifespan Launched in 1990-1997 Last one decommissioned in 2019 	<ul style="list-style-type: none"> C/A code on L1 P(Y) code on L1 & L2 On-board clock monitoring 7.5-year design lifespan Launched in 1997-2004 	<ul style="list-style-type: none"> All legacy signals 2nd civil signal on L2 (L2C) LEARN MORE → New military M code signals for enhanced jam resistance Flexible power levels for military signals 7.5-year design lifespan Launched in 2005-2009 	<ul style="list-style-type: none"> All Block IIR-M signals 3rd civil signal on L5 frequency (L5) LEARN MORE → Advanced atomic clocks Improved accuracy, signal strength, and quality 12-year design lifespan Launched in 2010-2016 	<ul style="list-style-type: none"> All Block IIF signals 4th civil signal on L1 (L1C) LEARN MORE → Enhanced signal reliability, accuracy, and integrity No Selective Availability LEARN MORE → 15-year design lifespan IIF: laser reflectors; search & rescue payload First launch in 2018

Abbildung 30 – Weiterentwicklung der GPS-Satelliten (Quelle: <http://www.gps.gov>)

Am 26. Juni 2022 waren insgesamt 31 Satelliten in der GPS-Konstellation in Betrieb, die stillgelegten Ersatzsatelliten, die sich in der Umlaufbahn befinden, nicht mit eingerechnet.

Das **Kontrollsegment** besteht aus einem weltweiten Netz von Bodeneinrichtungen, die GPS-Satelliten verfolgen, kontrollieren und steuern. Das Kontrollsegment ist dafür zuständig, den Zustand der Satelliten zu überwachen, etwaige Anomalien zu beheben, die Umlaufbahnen der Satelliten zu kontrollieren und gegebenenfalls anzupassen, die Uhren an Bord einzustellen und im Allgemeinen alle Aufgaben auszuführen, die für den ordnungsgemäßen Betrieb des Systems erforderlich sind. Es umfasst eine Hauptkontrollstation (master control station) (Schriever Air Force Base, Colorado), eine alternative Hauptkontrollstation (alternate master control station) (Vanderberg Air Force Base, Kalifornien), 16 Überwachungsstationen (monitor stations) (weltweit) und 11 Kommando- und Kontrollantennen. Für erhöhte Flexibilität und Robustheit bei der Verfolgung und Steuerung ist das GPS-Kontrollsegment an das Satellitenkontrollnetz der Air Force angeschlossen.

GPS Control Segment

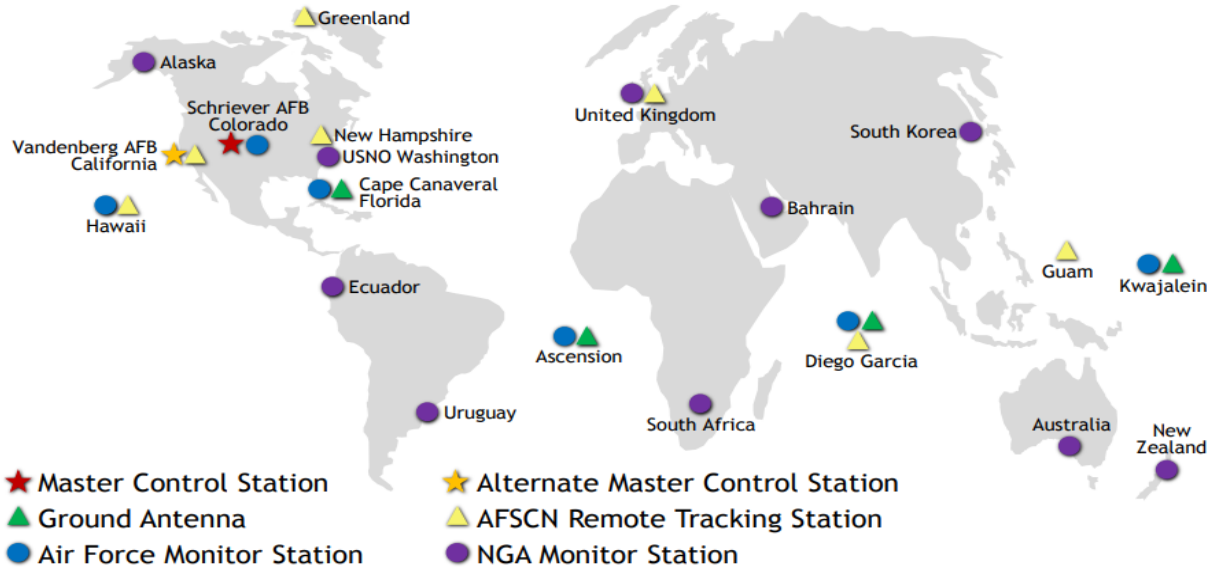


Abbildung 31 – GPS-Kontrollsegment (Quelle: <http://www.gps.gov>)

Das **Nutzersegment** umfasst die für den Empfang und die Dekodierung der GPS-Signale verwendeten Empfänger. Ein Empfänger liefert dem Nutzer dreidimensionale Standortinformationen sowie ein sehr präzises Zeitsignal.

5.1.1.2.1 GPS-Dienste

Es gibt zwei Arten von [GPS-Ortungsdiensten](#):

- Der **GPS-Standard-Positionsbestimmungsdienst (GPS Standard Positioning Service, GPS-SPS)** ist für die zivile, kommerzielle und wissenschaftliche Nutzung gebührenfrei. Die USA beabsichtigen, dass der GPS-SPS auch in Zukunft gebührenfrei bleibt. Für den Zugang zum GPS-SPS benötigen die Nutzer lediglich einen geeigneten GPS-Empfänger.
- Der **GPS-Präzisions-Positionsbestimmungsdienst (GPS Precision Positioning Service, GPS-PPS)** ist auf die Nutzung durch die US-amerikanische Regierung, die US-amerikanischen Streitkräfte und ihre ausgewählten Verbündeten beschränkt.

5.1.1.2.2 Hauptmerkmale

Das **terrestrische Dienstvolumen** der GPS-Konstellation erstreckt sich von der Erdoberfläche bis zu einer Höhe von 3000 km.

[Table 9](#) und [Figure 32](#) zeigen die Hauptmerkmale der GPS-Signale.

Tabelle 9 – Hauptmerkmale der GPS-Signale

L1				
Signal	C/A	L1C	P(Y)	M
Frequenz (MHz)	1575,42	1575,42	1575,42	1575,42
Zugangstechnik	CDMA	CDMA	CDMA	CDMA
Modulation	BPSK (1)	TMBOC (6,1,1/11)	BPSK (10)	BOCsine (10,5)
Minimale Empfangsleistung [dBW]	-158,5	-157	-161,5	Keine Angabe

L2			
Signal	L2 C	P(Y)	M
Frequenz (MHz)	1227,6	1227,6	1227,6
Zugangstechnik	CDMA	CDMA	CDMA
Modulation	BPSK (1)	BPSK (10)	BOCsin (10,5)
Minimale Empfangsleistung [dBW]	-161,5	-160	Keine Angabe
L5			
Signal	L5		
Frequenz (MHz)	1176,45		
Zugangstechnik	CDMA		
Modulation	BPSK (10)		
Minimale Empfangsleistung [dBW]	-157,9		

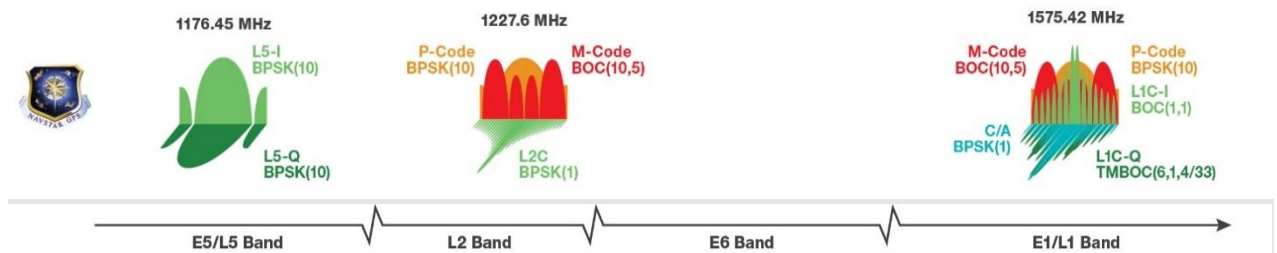


Abbildung 32 – GPS-Signale (Quelle: [Navipedia](#))

Die Ungenauigkeiten bei der Positions- und Zeitbestimmung, auf die die Nutzer stoßen, hängen von den Merkmalen der von GPS-Satelliten übertragenen Signale, ihrer Ausbreitung und der Leistung des verwendeten Empfängers ab. [Table 10](#) zeigt die für den GPS-SPS geltenden Standards in Bezug auf die Genauigkeit bei der Positions- und Zeitbestimmung unter repräsentativen Nutzerbedingungen.

Tabelle 10 – Für den GPS-SPS geltende Standards in Bezug auf die Genauigkeit bei der Positions- und Zeitbestimmung

Position Accuracy Global Average: Ungenauigkeit bei der horizontalen Positionsbestimmung (95 %) ≤ 9 m Ungenauigkeit bei der vertikalen Positionsbestimmung (95 %) ≤ 15 m	Standard basierend auf einem Messintervall von 24 Stunden, gemittelt über alle Punkte im Dienstvolumen
Position Accuracy Worst Site: Ungenauigkeit bei der horizontalen Positionsbestimmung (95 %) ≤ 17 m Ungenauigkeit bei der vertikalen Positionsbestimmung (95 %) ≤ 37 m	Standard basierend auf einem Messintervall von 24 Stunden für einen beliebigen Punkte im Dienstvolumen
Time Transfer Accuracy: Ungenauigkeit bei der Zeitübertragung (95 %) ≤ 40 ns (nur SIS)	Standard basierend auf einem Messintervall von 24 Stunden, gemittelt über alle Punkte im Dienstvolumen

[Table 11](#) zeigt die Spezifikationen für den GPS-SPS in Bezug auf Verfügbarkeit, Integrität und Kontinuität.

Tabelle 11 – Spezifikationen für den GPS-SPS

Verfügbarkeit	99 %
Integrität	$\geq 1 - 1 \times 10^{-5}/h$
Kontinuität	$\geq 0,9998/h$

Um GPS-Signale nutzen zu können, wird lediglich ein kompatibler Empfänger benötigt, was bedeutet, dass das GPS von einer unbegrenzten Anzahl von Nutzern gleichzeitig genutzt werden kann.

5.1.1.2.3 Leistung

Die US-amerikanische Regierung ist bestrebt, dass zivilen Nutzern das GPS auf dem Leistungsniveau zur Verfügung gestellt wird, das im Dokument [GPS Standard Positioning Service Performance Standard](#) (Leistungsnorm für den GPS-SPS) festgelegt ist.

Das Ergebnis einer von der Space Force in Auftrag gegebenen [GPS-SPS-Leistungsanalyse aus dem Jahr 2020](#) lautet: „Alle in diesem Bericht untersuchten Behauptungen in Bezug auf den SPS-Leistungsnorm wurden 2020 erfüllt.“ Die untersuchten Behauptungen bezogen sich auf die Genauigkeit, Integrität, Kontinuität und Verfügbarkeit des GPS-Weltraumsignals (SIS) sowie auf die Genauigkeit bei der Positionsbestimmung und die Zeitübertragung.

5.1.1.2.4 Stand und Modernisierungspläne

Das GPS-Modernisierungsprogramm ist ein fortlaufendes, milliardenschweres Projekt zur Verbesserung der Funktionen und der Gesamtleistung des Global Positioning System. Zu den verbesserten Funktionen gehören neue zivile und militärische GPS-Signale.

Die Modernisierung des [Weltraumsegments](#) ist in [Figure 30](#) dargestellt.

Die Modernisierung des [Kontrollsegments](#) umfasst Upgrades, die zur Steuerung und Kontrolle der neueren GPS-Satelliten und zur Verbesserung der Cybersicherheit erforderlich sind. Die laufenden Upgrades sind:

- [OCX: Next Generation Operational Control System \(Betriebskontrollsystem der nächsten Generation\)](#),
- [COps: GPS III Contingency Operations \(GPS-III-Notfalleinsätze\)](#),
- [MCEU: M-Code Early Use](#) (frühzeitige Nutzung von M-Code).

Ein wichtiger Schwerpunkt des GPS-Modernisierungsprogramms ist die Ergänzung der Satellitenkonstellation durch [neue Navigationssignale](#). Die Regierung ist dabei, drei [neue Signale](#) für die zivile Nutzung zu einführen: [L2C](#), [L5](#) und [L1C](#). Das [alte zivile Signal mit der Bezeichnung L1 C/A](#) oder „C/A at L1“ wird weiterhin ausgestrahlt werden, sodass es insgesamt vier zivile GPS-Signale geben wird. Um die neuen Signale nutzen zu können, müssen die Nutzer ihre Geräte aufrüsten. Die neuen zivilen Signale werden schrittweise eingeführt, und zwar dann, wenn die Air Force neue GPS-Satelliten in Betrieb nimmt, um ältere Satelliten zu ersetzen. Bei den meisten der neuen Signale wird die Nutzung solange begrenzt sein, bis sie von 18 bis 24 Satelliten ausgestrahlt werden.

Im Rahmen des GPS-Modernisierungsprogramms werden neue zivile Signale in die GPS-Konstellation aufgenommen. Bei den neuen Signalen kommt ein modernisiertes [Nachrichtenformat für die zivile Navigation \(CNAV\)](#), das flexibler ist als die alte Navigationsnachricht (LNAV) des ursprünglichen zivilen Signals (C/A-Code). Die CNAV-Nachricht bietet auch moderne Funktionen wie die Vorwärtsfehlerkorrektur. Eine vollständige Definition der CNAV-Nachricht findet sich im Dokument [Interface Specifications](#) (Schnittstellenspezifikationen) für die GPS-Signale L2C, L5 und L1C.

5.1.1.3 BeiDou

BeiDou ist ein globales Satellitennavigationssystem, das sich im Besitz der chinesischen Behörden befindet und von diesen entwickelt wurde. Es handelt sich um ein System mit Doppelnutzung, das den Bedürfnissen sowohl ziviler als auch staatlicher Nutzer, einschließlich militärischer Nutzer, gerecht wird.

Das **Weltraumsegment** von BeiDou, das in [Figure 33](#) dargestellt ist, umfasst fünf GEO-Satelliten, drei IGSO-Satelliten (IGSO: inclined geosynchronous satellite orbit – geneigte geosynchrone Umlaufbahn) sowie 27 MEO-Satelliten. Die GEO-Satelliten befinden sich bei 58,75°O, 80,0°O, 110,5°O, 140,0°O und 160,0°O. Die IGSO-Satelliten sind gleichmäßig in einer Umlaufbahn mit einer Höhe von 36 000 km, einer Neigung von 55° und einem Schnittpunkt bei 118,0°O verteilt. Die MEO-Satelliten sind gleichmäßig in kreisförmigen Umlaufbahnen auf drei Umlaufbahnebenen mit einer Höhe von 21 500 km und einer Neigung von 55° verteilt.



Das **Bodensegment** von BeiDou umfasst eine Kontrollstation, Upload-Stationen und ein Netz von Überwachungsstationen. Die Überwachungsstationen sind für die Überprüfung der Qualität der Navigationssignale und des Status der Satelliten sowie die Weiterleitung dieser Informationen an die Kontrollzentrale zuständig. Im Kontrollzentrum werden diese Informationen verarbeitet und es werden die neue Navigationsnachricht sowie die für den ordnungsgemäßen Betrieb der Satelliten erforderlichen Befehle generiert. Über die Upload-Stationen werden diese Informationen an die Satelliten übertragen.

Abbildung 33 – BeiDou-Konstellation

5.1.1.3.1 BeiDou-Dienste

BeiDou wird zwei Arten von Diensten anbieten:

- **zivile Dienste** mit kostenfreiem und unbegrenztem Zugang, was nach dem Willen der chinesischen Behörden auch so bleiben soll. Für den Zugang zu den zivilen Diensten von BeiDou benötigen die Nutzer lediglich einen geeigneten BeiDou-Empfänger;
- **beschränkte Dienste**, die nur von den chinesischen Behörden genutzt werden können.

5.1.1.3.2 Hauptmerkmale

BeiDou verfügt über eine globale Abdeckung über die Erdoberfläche bei allen Witterungsverhältnissen und ermöglicht Ortung, Navigation und Zeitgebung. [Figure 33](#) und [Figure 34](#) zeigen die Hauptmerkmale der BeiDou-Signale.

Tabelle 12 – Hauptmerkmale der BeiDou-Signale

B1				
Signal	B1-I(OS)	B1-Q(AS)	B1-C	B1
Frequenz (MHz)	1561,098	1561,098	1575,42	1575,42
Zugangstechnik	CDMA	CDMA	CDMA	CDMA
Modulation	BPSK (2)	BPSK (2)	MBOC (6,1,1/11)	BOC (14,2)
B3				
Signal	B3-I(AS)	B3-Q(AS)	B3-A(AS)	B3(AS)

Frequenz (MHz)	1268,52	1268,52	1268,52	1268,52
Zugangstechnik	CDMA	CDMA	CDMA	CDMA
Modulation	BPSK (10)	BPSK (10)	BOC (15,2.5)	BPSK (10)
B2				
Signal	B2-I(OS)	B2-Q(AS)	B2a	B2b
Frequenz (MHz)	1207,14	1207,14	1176,46	1207,14
Zugangstechnik	CDMA	CDMA	CDMA	CDMA
Modulation	BPSK (2)	BPSK (10)	AltBOC (15,10)	AltBOC (15,10)

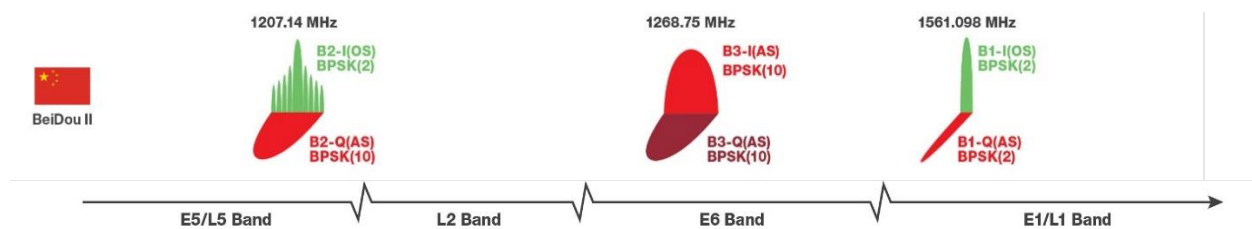


Abbildung 34 – BeiDou-Signale (Quelle: [Navipedia](#))

5.1.1.3.3 Leistung

Das China Satellite Navigation Office (chinesisches Amt für Satellitennavigation) veröffentlichte 2013 das Dokument „BeiDou Navigation Satellite System Open Service Performance Standard“ (Leistungsnorm für den offenen Dienst des BeiDou-Satellitennavigationssystems). In [Table 13](#) sind die Werte für Position, Geschwindigkeit und Zeit wiedergegeben.

Tabelle 13 – BeiDou-Leistung

Horizontale Genauigkeit (95 %)	≤ 10 m	Statistische Ungenauigkeit bei der Positions-/Geschwindigkeits-/Zeitbestimmung für einen beliebigen Punkt im Dienstvolumen über einen beliebigen Zeitraum von 24 Stunden
Vertikale Genauigkeit (95 %)	≤ 10 m	
Geschwindigkeitsgenauigkeit (95 %)	≤ 0,2 m/s	
Zeitgenauigkeit (95 %)	≤ 50 ns	
Positionsverfügbarkeit	≥ 0,95	

Um BeiDou-Signale nutzen zu können, wird ein kompatibler Empfänger benötigt, und BeiDou kann von einer unbegrenzten Anzahl von Nutzern gleichzeitig genutzt werden.

5.1.1.3.4 Stand und Modernisierungspläne

Die [vollständige Konstellation](#) von BeiDou 3 (2020 fertiggestellt) besteht aus 24 MEO-, 3 IGSO- und 3 GEO-Satelliten. Seit Januar 2022 sind 44 Satelliten der Konstellation in Betrieb: sieben GEO-Satelliten, zehn IGSO-Satelliten bei 55° und 27 MEO-Satelliten. Darüber hinaus befinden sich fünf Satelliten (zwei MEO-Satelliten, ein GEO-Satellit und zwei IGSO-Satelliten) derzeit in der Testphase oder in der Inbetriebnahme.

5.1.1.4 GLONASS

GLONASS ist ein satellitengestütztes Funknavigationssystem, das sich im Eigentum Russlands befindet und von Russland betrieben wird. Es handelt sich um ein System mit Doppelnutzung, das sowohl zivilen als auch militärischen Nutzern zur Verfügung steht.

GLONASS besteht aus einem Weltraumsegment, einem Bodensegment und einem Nutzersegment. Für eine globale Abdeckung werden mindestens 24 Satelliten benötigt. Die Satelliten befinden sich in drei Umlaufbahnebenen mit einer Neigung von 63,8° und einer Höhe von 19 140 km. Diese Konfiguration garantiert eine globale Abdeckung über die Erdoberfläche und ist an die hohen Breitengrade Russlands angepasst.

GLONASS erreichte **1996 die volle Betriebsfähigkeit** (24 funktionstüchtige Satelliten), aber 2002 verringerte sich die Konstellation auf nur noch sieben Satelliten, von denen während Wartungsarbeiten nur sechs verfügbar waren. Am 8. Dezember 2011 wurde wieder eine vollständige Konstellation von 24 Satelliten erreicht, die seither mehr oder weniger beibehalten wurde (siehe [5.1.1.4.4](#) für den Status der Konstellation).

Das Kontrollsegment von GLONASS umfasst ein Netz von Überwachungsstationen, Uplink- und Downlink-Kommunikationsantennen, Laserverfolgungsstationen sowie ein Systemkontrollzentrum. Im Kontrollsegment werden der Status und die Leistung der Satelliten überwacht und etwaige potenzielle Anomalien behoben (siehe [GLONASS-Systemdokumente](#)).

5.1.1.4.1 GLONASS-Dienste

GLONASS bietet zwei Arten von Diensten:

- **zivile Dienste** mit kostenfreiem und unbegrenztem Zugang, was nach dem Willen der russischen Behörden auch so bleiben soll. Für den Zugang zu den zivilen Diensten von GLONASS benötigen die Nutzer lediglich einen geeigneten GLONASS-Empfänger;
- **beschränkte Dienste**, die nur von der russischen Regierung und den russischen Streitkräften genutzt werden können.

5.1.1.4.2 Hauptmerkmale

GLONASS verfügt über eine globale Abdeckung über die Erdoberfläche bei allen Witterungsverhältnissen und ermöglicht Ortung, Navigation und Zeitgebung. [Table 14](#) und [Figure 35](#) zeigen die Hauptmerkmale der GLONASS-Signale.

Table 14 – Hauptmerkmale der GLONASS-Signale

L1				
Signal	C/A	P	L1 OC	L1 OCM
Frequenz (MHz)	1 598,0625 bis 1 605,375	1 598,0625 bis 1 605,375	1600,995	1600,995
Zugangstechnik	FDMA	FDMA	CDMA	CDMA
Modulation	BPSK (0,511)	BPSK (5,11)	BPSK (1)	BOC (5,2.5)
Minimale Empfangsleistung [dBW]	-161	Keine Angabe		
L2				
Signal	C/A	P	L2 OC	L2 OCM
Frequenz (MHz)	1 242,9375 bis 1 248,625	1 242,9375 bis 1 248,625	1248,06	1248,06
Zugangstechnik	FDMA	FDMA	CDMA	CDMA
Modulation	BPSK (0,511)	BPSK (5,11)	BPSK (1)	BOC (5,2.5)
Minimale Empfangsleistung [dBW]	-167	Keine Angabe		
L3				

Signal	L3 OC
Frequenz (MHz)	1202,025
Zugangstechnik	CDMA
Modulation	QPSK (10)
L5	
Signal	L5 OC
Frequenz (MHz)	1176,45
Zugangstechnik	CDMA
Modulation	QPSK (10)

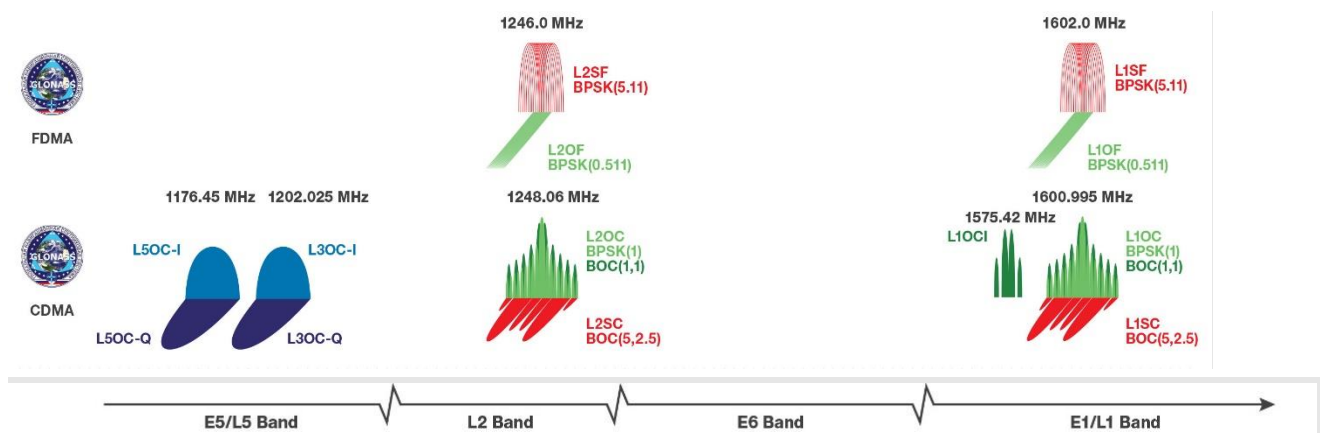


Abbildung 35 – GLONASS-Signale (Quelle: [Navipedia](#))

5.1.1.4.3 Leistung

Für GLONASS werden das Konstellationssystem und die Nutzerleistung auf der [offiziellen GLONASS-Website](#) veröffentlicht. Die Weltraumsignal-Nutzer Genauigkeit (Signal-in-Space User Accuracy SIS UA) und Weltraumsignal-Entfernungsfehler (Signal-in-Space Ranging Error, SISRE) für August 2022 sind in [Figure 36](#) und [Figure 37](#) dargestellt.

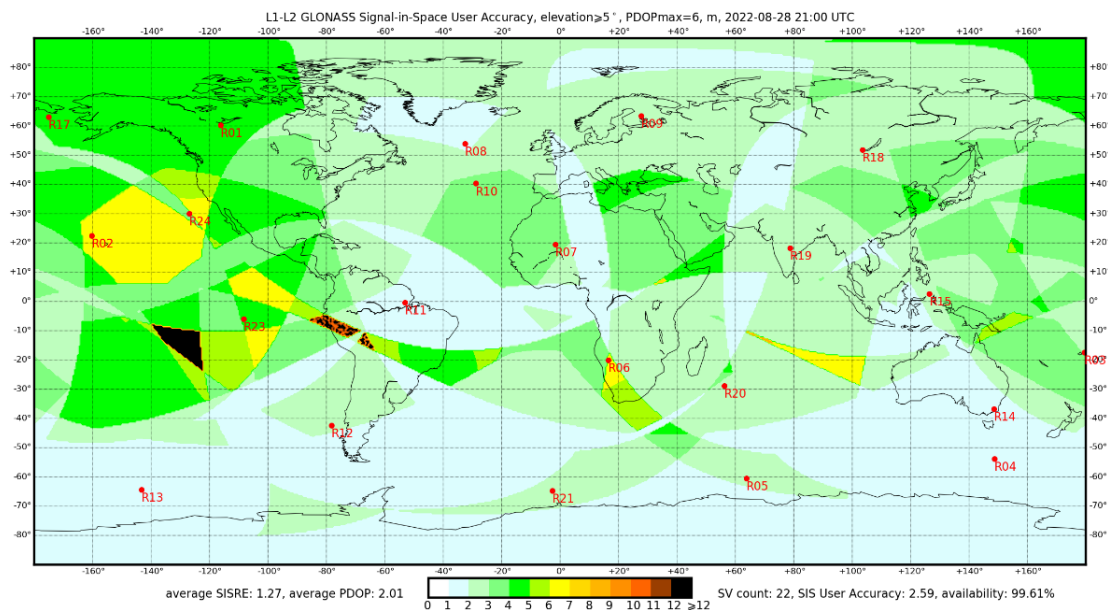


Abbildung 36 – GLONASS-Leistung in Bezug auf die SIS UA

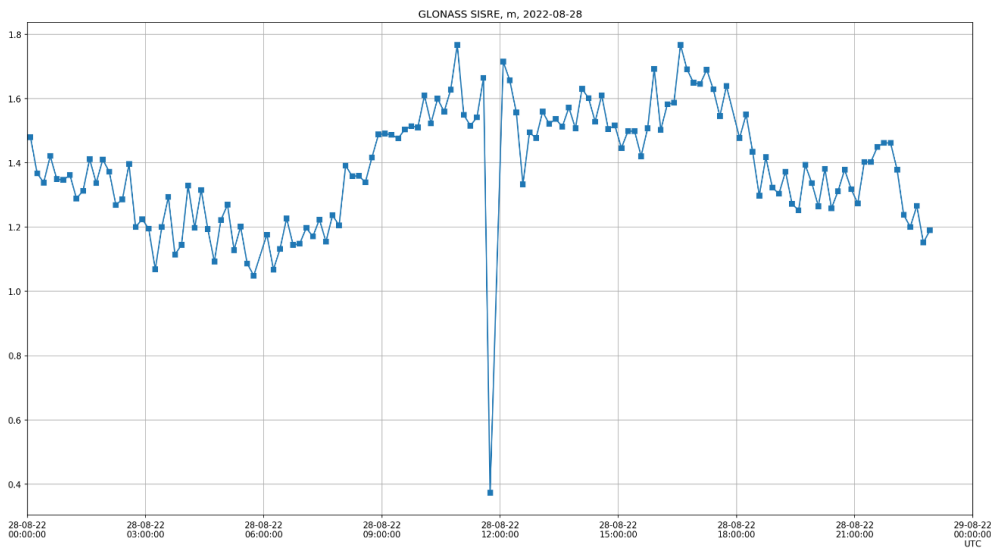


Abbildung 37 – GLONASS-Leistung in Bezug auf den SISRE

Um GLONASS-Signale nutzen zu können, wird ein kompatibler Empfänger benötigt, und GLONASS kann von einer unbegrenzten Anzahl von Nutzern gleichzeitig genutzt werden.

5.1.1.4.4 Stand und Modernisierungspläne

Im Mai 2022 befanden sich 22 [betriebsbereite GLONASS-Satelliten](#) in der Umlaufbahn und drei in der Wartungsphase. Fast alle Satelliten gehören zum GLONASS-M-Block, bis auf zwei, die zum GLONASS-K-Block gehören. Ab 2019 plant Russland, die Konstellation mit den modernisierten Satelliten GLONASS-K1 und GLONASS-K2 aufzufüllen. L1 und L2 FDMA haben die volle Betriebsfähigkeit erreicht. L3 CDMA wird voraussichtlich im Jahr 2022, L2 CDMA im Jahr 2025 und L1 CDMA etwa im Jahr 2030 die volle Betriebsfähigkeit erreichen (siehe [offizielle GLONASS-Systemdokumente](#)).

Weitere Informationen zum Status des Systems und seine Modernisierung sind auf der [GLONASS-Website](#) zu finden.

5.1.2 Satellitennavigationssysteme mit regionaler Abdeckung

5.1.2.1 QZSS

Das Quasi-Zenith Satellite System (QZSS), auch bekannt als Michibiki, ist ein regionales, satellitengestütztes Augmentationssystem, das von **Japan** entwickelt wurde, um die Leistung für GPS-Nutzer in den Regionen Asiens und Ozeaniens zu verbessern. Das System, das speziell Japan abdeckt, besteht aus vier einsatzbereiten Satelliten und einem Reservesatelliten. Die **ersten vier Satelliten** standen im Januar 2018 zur Verfügung und waren **im November 2018 betriebsbereit**.

Das QZSS nutzt einen geostationären Satelliten und drei Satelliten auf stark geneigten, leicht elliptischen, geosynchronen Tundra-Umlaufbahnen. Jede Umlaufbahn ist 120° von den beiden anderen entfernt. Aufgrund dieser Neigung sind sie nicht geostationär, d. h. ihre Position am Himmel ist nicht immer gleich. Stattdessen sind ihre Flugwege asymmetrische Muster (Analemmen), die so angelegt sind, dass sich einer der Satelliten zu jeder Zeit direkt (quasi im Zenit) über Japan steht (Höhe: 60° oder mehr). Weitere Informationen sind auf der [QZSS-Website](#) erhältlich.

QZO

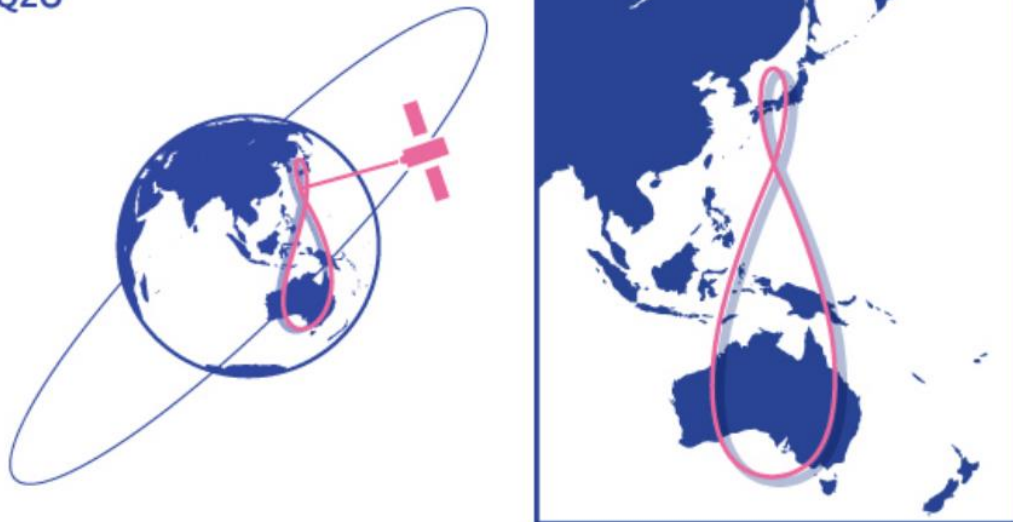


Abbildung 38 – QZSS-Konstellation (Quelle: [QZSS-Website des National Space Policy Secretariat](#))

5.1.2.1.1 QZSS-Dienste

Das QZSS bietet drei Arten von öffentlichen Diensten:

- Der **PNT-Dienst** ergänzt die vom GPS-System verwendeten Signale und liefert zusätzliche Entfernungssignale. Der Dienst sendet auf den Bändern L1 C/A, L1C, L2C und L5C, also auf den gleichen Bändern wie das GPS.
- Der **Sub-meter Level Augmentation Service (SLAS-Dienst)** bietet GNSS-Augmentation für das GPS und ist mit anderen GPS-SBAS-Systemen interoperabel. Er sendet auf der Frequenz L1.
- Der **Centimetre Level Augmentation Service (CLAS-Dienst)** bietet hochpräzise Positionsbestimmung, die mit dem hochpräzisen E6-Dienst von Galileo kompatibel ist. Das Band wird als L6 oder LEX bezeichnet, was für „experimentell“ steht.

5.1.2.1.2 Hauptmerkmale

Die Quasi-Zenit-Satelliten senden **Signale, die mit dem GPS-Signal L1 C/A sowie den modernisierten GPS-Signalen L1C, L2C und L5 kompatibel sind.** Im Vergleich zu GPS allein bietet die Kombination aus GPS und QZSS eine verbesserte Leistung bei der Positionsbestimmung durch Entfernungskorrekturdaten, die durch leistungssteigernde L1-SAIF- und LEX-Signale bereitgestellt werden. Außerdem wird die Zuverlässigkeit durch die Überwachung von Fehlern und die Meldung von Systemzustandsdaten verbessert.

[Table 15](#) und [Figure 39](#) zeigen die Hauptmerkmale der QZSS-Signale.

Tabelle 15 – Hauptmerkmale der QZSS-Signale

	L1		
Signal	L1 C/A	L1 C/B	L1C
Frequenz (MHz)	1575,42	1575,42	1575,42
Zugangstechnik	CDMA	CDMA	CDMA
Modulation	BPSK (1)	BOC	BOC/TBOC
Minimale Empfangsleistung [dBW]	-158,5	-158,5	L1CD: -163,0 dBW L1CP: -158,25 dBW

L2	
Signal	L2 C
Frequenz (MHz)	1227,6
Zugangstechnik	CDMA
Modulation	BPSK
Minimale Empfangsleistung [dBW]	-160,0 (Block I) -157,0 (Block II)
L5	
Signal	L5
Frequenz (MHz)	1176,45
Zugangstechnik	CDMA
Modulation	QPSK
Minimale Empfangsleistung [dBW]	-157,9 (Block I) -157,0 (Block II)
L6	
Signal	L6
Frequenz (MHz)	1278,75
Zugangstechnik	CDMA
Modulation	BPSK
Minimale Empfangsleistung [dBW]	-155,7 (Block I) -156,8 (Block II)

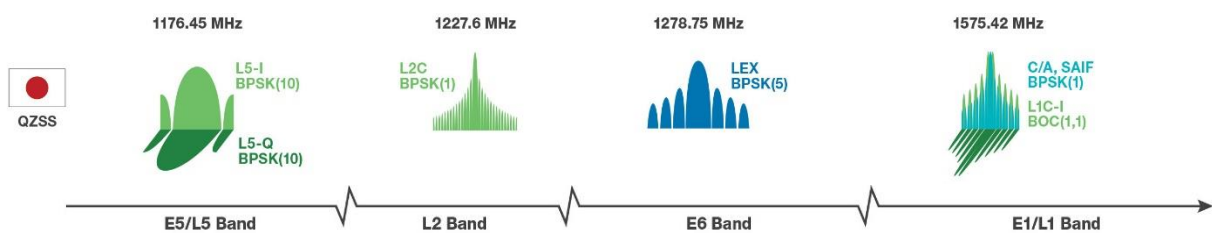


Abbildung 39 – QZSS-Signale (Quelle: [Navipedia](#))

Um QZSS-Signale nutzen zu können, wird lediglich ein kompatibler Empfänger benötigt, und das QZSS kann von einer unbegrenzten Anzahl von Nutzern gleichzeitig genutzt werden.

5.1.2.1.3 Leistung

Die Leistung des QZSS ist in technischen Berichten beschrieben, die auf der [QZSS-Website des National Space Policy Secretariat](#) abrufbar sind. Die SIS-Genauigkeit der QZSS-Satelliten für das Jahr 2021 ist [Figure 40](#) zu entnehmen.

Satellit	Navigationsnachricht	SIS-Genauigkeit (95 %) [m]					
		April	Mai	Juni	Juli	August	September
SVN001	LNAV	0,53	0,55	0,76	0,81	0,57	2,75

(PRN193)	CNAV	0,52	0,55	0,72	0,78	0,57	2,73
SVN002	LNAV	0,88	1,08	1,06	0,71	0,60	0,47
(PRN194)	CNAV	0,88	1,12	1,08	0,71	0,59	0,48
SVN003	LNAV	0,74	0,81	0,63	0,71	0,64	0,63
(PRN199)	CNAV	0,75	0,76	0,62	0,65	0,66	0,63
SVN004	LNAV	0,93	0,83	0,88	0,99	0,88	0,92
(PRN195)	CNAV	0,93	0,81	0,89	0,98	0,89	0,95

Abbildung 40 – QZSS-Leistung

5.1.2.1.4 Stand und Modernisierungspläne

Nach dem erfolgreichen Start des QZS-1R-Satelliten im Oktober 2021 wurde im Rahmen des QZSS der Austausch des Satelliten der Konstellation eingeleitet. Das QZSS wurde im November 2018 mit vier Satelliten in Betrieb genommen. Drei weitere Satelliten werden sich auf einer geneigten geosynchronen Umlaufbahn, einer geostationären Umlaufbahn bei 90,5°O und einer quasi-geostationären Umlaufbahn bei 175°W befinden. Darüber hinaus wird die neue Konstellation durch zwei geostationäre Satelliten und einen quasi-geostationären Satelliten vervollständigt. Die Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) plant, **bis 2023 einen Konstellationsdienst mit sieben Satelliten** und bis 2024 einen PPP- und einen Authentifizierungsdienst anzubieten.

Weitere Informationen sind auch in [Navipedia](#) zu finden.

5.1.2.2 IRNSS (NavIC)

Das Indian Regional Navigation Satellite System (IRNSS) – Betriebsbezeichnung: NavIC für „Navigation with Indian Constellation“ – ist ein autonomes **regionales** Satellitennavigationssystem, das präzise Echtzeit-Positionsbestimmungs- und Zeitgebungsdienste bietet. Es deckt **Indien** sowie eine Region ab, die sich 1500 km um Indien herum erstreckt, wobei eine Augmentation geplant ist. Zwischen dem primären Abdeckungsgebiet und einem rechteckigen Gebiet, das vom 30. südlichen Breitengrad bis zum 50. nördlichen Breitengrad und vom 30. östlichen Längengrad bis zum 130. östlichen Längengrad eingeschlossen ist, befindet sich 1500–6000 km jenseits der Grenzen ein erweitertes Abdeckungsgebiet.

Die Konstellation besteht aus acht Satelliten (sieben in Betrieb). Drei der acht Satelliten befinden sich in der GEO auf den Längengraden 32,5°O, 83°O und 131,5°O, etwa 36 000 km über der Erdoberfläche. Bei den übrigen fünf Satelliten handelt es sich um IGSO-Satelliten. Zwei von ihnen kreuzen den Äquator bei 55°O und zwei bei 111,75°O.

5.1.2.2.1 IRNSS-Dienste

NavIC bietet zwei Arten von Diensten:

- den Standard-Positionsbestimmungsdienst (**Standard Positioning Service, SPS**), der für die zivile Nutzung offen sein wird, und
- den **beschränkten Dienst (Restricted Service, RS)**, der für autorisierte Nutzer (einschließlich des Militärs) verschlüsselt ist.

5.1.2.2.2 Hauptmerkmale

Beide NavIC-Dienste werden auf dem L5-Band (1176,45 MHz) bzw. dem S-Band (2492,028 MHz) übertragen. Das Signal des Standard-Positionsbestimmungsdienstes wird mit einem 1-MHz-BPSK-Signal moduliert, während der beschränkte Dienst BOC (5,2) verwendet. Die Navigationssignale selbst sollen auf dem Frequenzband S (2–4 GHz) übertragen und über eine phasengesteuerte Gruppenantenne gesendet werden, um die erforderliche Abdeckung und Signalstärke beizubehalten.

Tabelle 16 – Hauptmerkmale der IRNSS-Signale

		L5	
Signal		L5 SPS	L5 RS
Frequenz (MHz)		1176,45	1176,45
Zugangstechnik		CDMA	CDMA
Modulation		BPSK (1)	BOC (5,2)
Minimale Empfangsleistung [dBW]		-159,0	-159,0

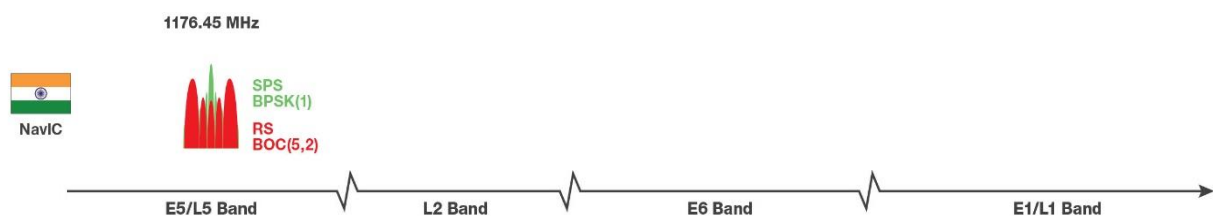


Abbildung 41 – IRNSS-Signale (Quelle: [Navipedia](#))

Um IRNSS-Signale nutzen zu können, wird lediglich ein kompatibler Empfänger benötigt, und das IRNSS kann von einer unbegrenzten Anzahl von Nutzern gleichzeitig genutzt werden.

5.1.2.2.3 Leistung

Die Leistung des IRNSS ist in technischen Berichten beschrieben, die auf der [IRNSS-Programm-Website](#) abrufbar sind. Die User Ranging Accuracy (URA) der IRNSS-Satelliten für das Jahr 2021 ist [Figure 42](#) zu entnehmen.

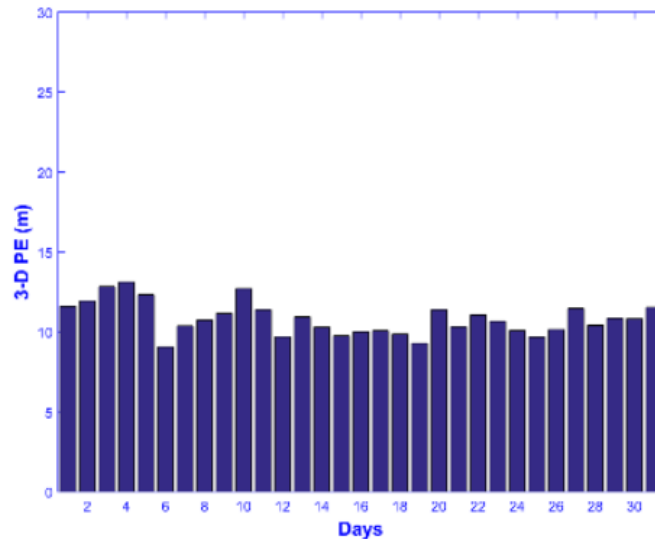


Abbildung 42 – URA für das IRNSS im Dezember 2021 (Quelle: [offizieller Bericht zum IRNSS für das vierte Quartal 2021](#))

5.1.2.2.4 Stand und Modernisierungspläne

Im [112th Five Year Plan of Department of Space \(2012–2017\)](#) (12. Fünfjahresplan des Weltraumministeriums) war die **Erhöhung der Zahl der Satelliten** in der Konstellation von sieben auf elf vorgesehen, um die Abdeckung auszuweiten. Diese zusätzlichen vier Satelliten sollen in geosynchroner Umlaufbahn mit einer Neigung von 42° gestartet werden.

Die Indian Space Research Organisation (indische Weltraumforschungsorganisation, ISRO) wird fünf Satelliten der nächsten Generation mit neuen Nutzlasten und einer verlängerten Lebensdauer von 12 Jahren starten. Mit den neuen Satelliten, die über das L5- und S-Band verfügen und die den **auf Rubidiumatom basierten indischen Frequenznormal** nutzen werden, soll ein **neues interoperables ziviles Signal im L1-Band** in der Navigationsnutzlast eingeführt werden.

Die Studie und Analyse für das globale indische Navigationssystem (GINS) wurden im Rahmen der technologischen und politischen Initiativen im Jahr 2012 eingeleitet. Das System soll aus einer Konstellation von 24 Satelliten bestehen, die in 24 000 km Höhe über der Erde positioniert sind. Im Jahr 2013 wurde die gesetzlich vorgeschriebene Anmeldung des Frequenzspektrums für die GINS-Satellitenumlaufbahnen im internationalen Weltraum abgeschlossen. Die [ISRO und das Weltraumministerium](#) arbeiten daran, das NavIC im Hinblick auf seine Abdeckung von einem regionalen auf ein globales System auszuweiten, das unabhängig von den anderen derzeit in Betrieb befindlichen Systemen wie GPS, GLONASS, BeiDou und Galileo sein wird, aber gleichzeitig interoperabel und für die weltweite Öffentlichkeit kostenfrei nutzbar bleibt.

5.1.2.3 Koreanisches Ortungssystem (KPS)

Das koreanische Ortungssystem (Korean Positioning System, KPS) ist die geplante südkoreanische Satellitenkonstellation, die Korea bis zum Jahr 2035 errichten will und die unabhängige Ortungs- und Navigationssignale in einem Gebiet mit einem Radius von 1000 Kilometern um die Hauptstadt Seoul liefern soll. Das KPS wird voraussichtlich eine Konstellation mit sieben Satelliten sein, von denen drei in geosynchroner Umlaufbahn und vier in geneigter geosynchroner Umlaufbahn über der koreanischen Halbinsel kreisen werden. Das KPS soll die Genauigkeit des GPS von zehn Metern auf weniger als einen Meter verbessern.

Der erste Satellit soll 2027 gestartet werden, wobei für 2034 die testweise Inbetriebnahme und für das folgende Jahr die vollständige Inbetriebnahme vorgesehen ist.

5.1.3 Augmentationssysteme

5.1.3.1 Weltraumgestützt

Weltraumgestützte GNSS-Augmentationssysteme sind Augmentationssysteme, bei denen die GNSS-Korrekturen über Satelliten an die Nutzer übertragen werden und die somit *großräumige* Augmentationsinformationen liefern (d. h. im kontinentalen Maßstab).

Es gibt zwei Arten solcher GNSS-Augmentationssysteme: satellitengestützte Augmentationssysteme (SBAS) und präzise Punktpositionierung (PPP).

5.1.3.1.1 Satellitengestützte Augmentationssysteme (SBAS)

SBAS bieten **Augmentationsdienste** zur Verbesserung der Genauigkeit und zur Gewährleistung der Integrität der GNSS-Signale. SBAS können auch GNSS-Entfernungssignale von ihrem Weltraumsegment aus senden. Die **Genauigkeit** wird durch die Übertragung großflächiger Korrekturen der Ungenauigkeiten bei der GNSS-Entfernungsmessung verbessert, während die **Integrität** durch die schnelle Erkennung von Satellitensignal- und Ionosphärenfehlern und die Übermittlung von Warnmeldungen an die Nutzer gewährleistet wird.

SBAS bestehen aus einem **Weltraumsegment** (geostationäre Satelliten), einem **Bodensegment** (Referenzstationen, Hauptstationen und Sendestationen), einem **Nutzersegment** (Nutzerempfänger, die die SBAS-Signale verarbeiten) und einem **Unterstützungssegment** (zur Unterstützung der Erbringung der SBAS-Dienste).

Die SBAS-Referenzstationen, die geografisch vorwiegend über das SBAS-Abdeckungsgebiet verteilt sind, empfangen GNSS-Signale, die sie an die SBAS-Hauptstationen weiterleiten. Da die Standorte der Referenzstationen genau bekannt sind, können die Hauptstationen weiträumige Korrekturen genau berechnen. Diese Korrekturen werden an spezielle Stationen zur Sendung an die SBAS-Satelliten übertragen. Die Satelliten leiten die Korrekturen dann an GNSS-Empfänger im gesamten SBAS-Abdeckungsgebiet weiter.

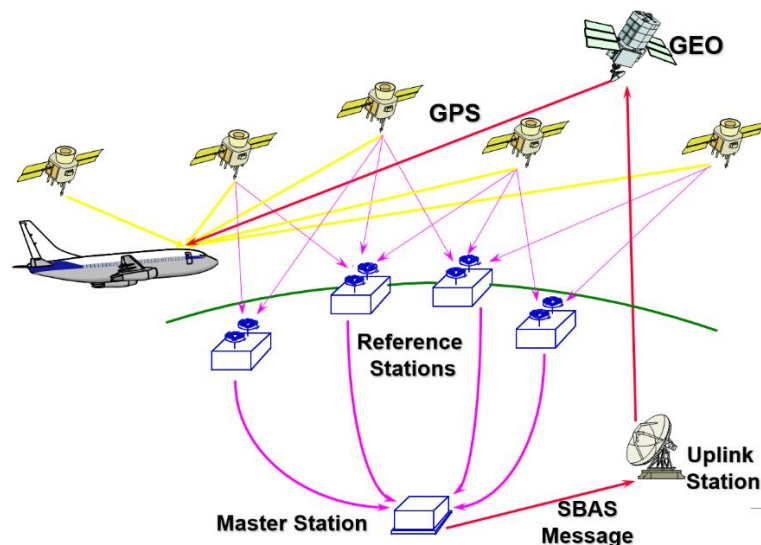


Abbildung 43 – SBAS-Architektur (Quelle: ICAO)

SBAS-Dienste werden für **sicherheitskritische Anwendungen**, z. B. in der Luftfahrt, genutzt. In der **Navigation** ermöglichen SBAS LPV-Anflüge (d. h. Präzisionsanflüge mit – ähnlich wie bei ILS-Anflügen– lateraler und vertikaler Führung, jedoch ohne Bodeninfrastruktur vor Ort). Im Bereich der **Überwachung** ermöglichen SBAS eine bessere Positionierung der Flugzeuge, wodurch der Abstand zwischen den Flugzeugen verringert und der Flughafenbetrieb verbessert werden kann. Weitere Einzelheiten zu den Vorteilen von SBAS für die Luftfahrt sind in Abschnitt [3.4.3](#) zu finden.

Es gibt mehrere SBAS (für einen Überblick siehe [Figure 44](#)):

- Die **Europäische Augmentation des geostationären Navigationsystems (EGNOS)** ist das europäische Augmentationssystem zur Verbesserung der Genauigkeit der von den Signalen des GPS (und in Zukunft von Galileo) abgeleiteten Positionen sowie zur Warnung der Nutzer hinsichtlich der Zuverlässigkeit der

Signale. EGNOS überträgt Differenzialkorrekturdaten zur öffentlichen Nutzung und ist für sicherheitskritische Anwendungen zertifiziert (operative Dienste seit 2011).

- Die US Federal Aviation Administration (FAA) – das Luftfahrtbundesamt der USA – hat das [Wide Area Augmentation System \(WAAS\)](#) entwickelt, das GPS-Korrekturen bereitstellt und seit 2003 für die Zivilluftfahrtindustrie zertifiziert ist.
- Das [MTSAT Satellite Augmentation System \(MSAS\)](#) ist ein SBAS, das seit 2007 Augmentationsdienste für Japan bietet.
- Bei [GPS Aided Geo Augmented Navigation \(GAGAN\)](#) handelt es sich um ein SBAS, das seit 2013 die Flugnavigation über dem indischen Luftraum unterstützt.
- Seit Oktober 2014 ist das Korea Aerospace Research Institute (KARI) die führende Forschungseinrichtung für die Entwicklung und den Bau von Koreas eigenem satellitengestützten Augmentationssystem (SBAS) mit der Bezeichnung [Korea Augmentation Satellite System \(KASS\)](#) gemäß ICAO-Anhang 10. Das KASS soll ab 2024 einen sicherheitskritischen APV-1-Dienst bieten.
- [Augmented Navigation for Africa \(ANGA\)](#), entwickelt von der Agency for the Safety of Air Navigation in Africa (ASECNA), ist die SBAS-Initiative für die Entwicklung Afrikas und des Indischen Ozeans. ANGA soll ab 2025 SBAS-Dienste für den NPA-, APV-1- und CAT-I-Betrieb bieten. Es wird davon ausgegangen, dass vollständige DFMC-Dienste über 2028/2030 hinaus für den automatischen CAT-I-Landebetrieb und möglicherweise für weitere Betriebsarten zur Verfügung stehen werden.
- Das [Southern Positioning Augmentation System \(SouthPAN\)](#) ist das operative SBAS Australiens und Neuseelands, das bis 2025 volle Betriebsfähigkeit erreichen soll.
- Die Republik China entwickelt derzeit das [BeiDou Satellite-Based Augmentation System \(BDSBAS\)](#) – ein SBAS, das Dienste in China und den umliegenden Regionen erbringen soll. Das BDSBAS, bei dem es sich um eine Augmentation von BeiDou und des GPS handelt, ist in das BeiDou-System integriert und nutzt Satelliten vom Typ BDS-3 zur Übertragung des SBAS-Signals L1/L5. Es wird voraussichtlich ab 2025 Dienste anbieten.
- In Russland wird derzeit das [System for Differential Corrections and Monitoring \(SDCM\)](#) entwickelt, das die Genauigkeit der Navigationssysteme GLONASS und GPS verbessern und Integritätsüberwachung in Bezug auf diese beiden Systeme bieten soll. Das SDCM wird auch präzise Punktpositionierung (PPP) für L1/L3-GLONASS-Signale bieten.

SBAS Indicative Service areas

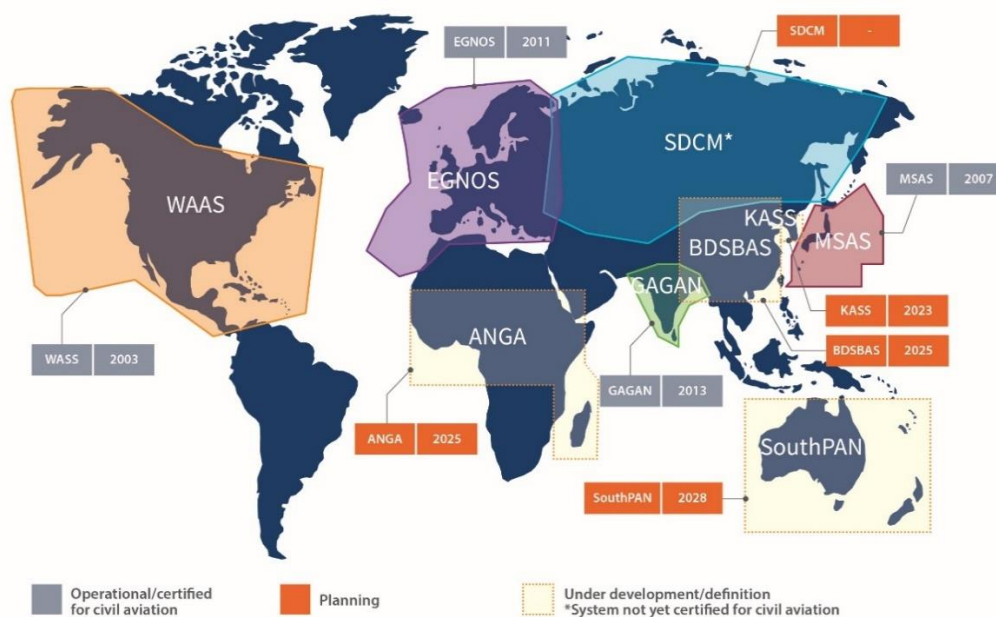


Abbildung 44 – SBAS und geplante Abdeckungsgebiete (Quelle: EUSPA)

5.1.3.1.2 Präzise Punktpositionierung (PPP)

Durch Korrekturen von [Satellitenumlaufbahn- und Taktfehlern](#), die über Satelliten oder das Internet verbreitet werden, ermöglicht die [präzise Punktpositionierung \(PPP\)](#) eine Genauigkeit im Zentimeterbereich. Da ein sehr genaues Fehlermodell verwendet wird, erfordert diese Lösung eine Konvergenzzeit, um zunächst die Code- und Trägerbeobachtungen zu filtern und dann den Satelliten-Taktfehler, die Zenit-Troposphären-Pfadverzögerung und die Float-Phasenmehrdeutigkeiten für alle Satelliten zu schätzen. Die Genauigkeit und die Konvergenzzeit sind abhängig von den Umgebungsbedingungen, der Qualität der Korrekturen und der Implementierung des EKF-Algorithmus (EGF steht für Extended Kalman Filter – erweiterter Kalman-Filter). Auch eine weniger präzise Positionierung nur des Codes ist möglich.

Es gibt **mehrere kommerzielle PPP-Anbieter**, darunter [Hexagon Veripos](#), [TerraStar](#), [Trimble OmniSTAR](#), [Fugro Seastar](#), [u-blox PointPerfect](#), [Swift Navigation Skylark](#) und [Deer StarFire](#). Diese Anbieter schätzen die Satellitenposition sowie Taktfehler und -verzerrungen mithilfe eines Netzes von Bodenstationen, die Beobachtungen zu verschiedenen Signalen und Konstellationen sammeln. Der Dienst liefert Korrekturen der geschätzten Fehlerkomponenten und überträgt sie über Satelliten oder Bodenkanäle (z. B. das Internet) an die Nutzer. Im Rahmen von Galileo wird auch ein kostenfreier PPP-Echtzeitdienst mit weltweiter Abdeckung angeboten – der **Galileo-Hochpräzisionsdienst** (siehe Abschnitt [3.2.2](#)).

Die **traditionelle hochpräzise Punktpositionierung** weist einige Einschränkungen in Bezug auf die Konvergenzzeit auf. Tatsächlich kann es mehrere Minuten dauern, bis der Empfänger eine Position mit einer Positionsgenauigkeit im Zentimeterbereich liefert. Es handelt sich um eine wertvolle Lösung, die in statischen Anwendungen wie der Vermessung weitverbreitet ist. Die potenziell schwierigen Umgebungsbedingungen bei dynamischen Anwendungen (z. B. Drohnen, Mikromobilität, Präzisionslandwirtschaft, autonome Fahrzeuge, automatischer Schiffsbetrieb) stellen im Hinblick auf die Leistung eine Herausforderung sowohl in Bezug auf die Genauigkeit als auch auf die Konvergenzzeit dar. In diesen Fällen bedarf es Techniken, die lokale Sensoren und digitale Karten integrieren, um die durch lokale Fehler verursachten Beschränkungen zu überwinden und eine Positionsgenauigkeit im Zentimeterbereich zu ermöglichen.

5.1.3.2 Terrestrisch

5.1.3.2.1 Bodengestützte Augmentationssysteme (GBAS)

Ein [bodengestütztes Augmentationssystem \(GBAS\)](#) ist ein sicherheitskritisches System für die zivile Luftfahrt, das die **lokale Augmentation** der Signale der GNSS-Konstellation **auf Flughafenebene** unterstützt. Das GBAS dient in erster Linie der Unterstützung des Präzisionsanflugbetriebs.

Das Gesamtsystem besteht aus einem [GBAS-Boden-Teilsystem](#) und dem ([bordseitigen](#)) [GBAS-Luftfahrzeug-Teilsystem](#). Ein GBAS-Boden-Teilsystem kann eine unbegrenzte Anzahl von Luftfahrzeugen innerhalb des jeweiligen GBAS-Abdeckungsgebiets unterstützen, indem es dem Luftfahrzeug Anflugbahndaten und für jeden in Sichtweite befindlichen Satelliten **differenzielle Korrekturen** sowie **Integritätsinformationen** liefert. Diese Korrekturen ermöglichen es dem Luftfahrzeug, seine Position relativ zur Anflugbahn genauer zu bestimmen, wodurch ein anspruchsvollerer Betrieb möglich wird und das Luftfahrzeug sicher zur Landebahn geführt wird.

Die GBAS-Bodeninfrastruktur umfasst zwei oder mehr GNSS-Referenzempfänger an dem mit einem GBAS ausgestatteten Flughafen, die Pseudoentfernungen von den in Sichtweite befindlichen GNSS-Satelliten sammeln und auf der Grundlage ihrer eigenen gemessenen Position differenzielle Korrekturen und integritätsbezogene Informationen für diese Satelliten berechnen und übertragen. Diese differenziellen Korrekturen werden vom Bodensystem über eine UKW-Rundsendung von Daten an den GBAS-fähigen Empfänger an Bord des Luftfahrzeugs übertragen. Die gesendeten Informationen umfassen Pseudoentfernungskorrekturen, Integritätsparameter und verschiedene lokal relevante Daten wie Endanflugsegmentdaten.

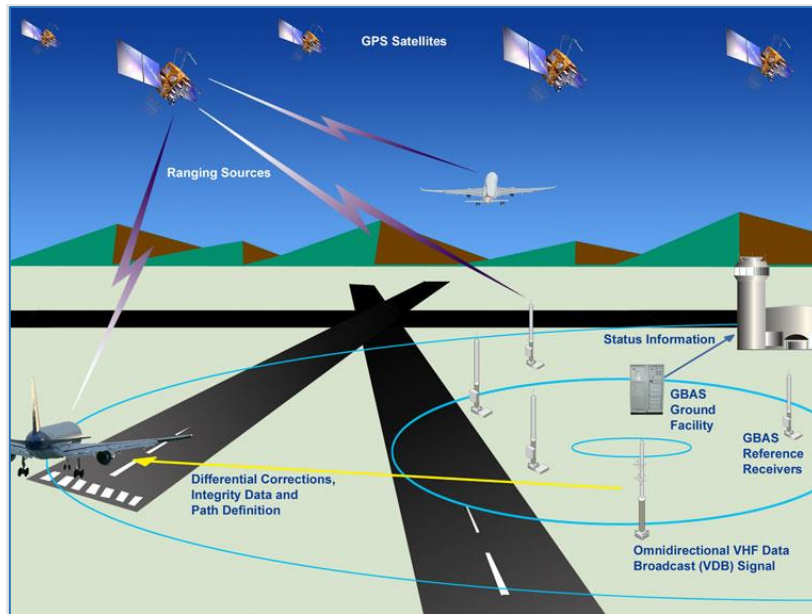


Abbildung 45 – GBAS-Architektur (Quelle: [FAA](#))

GBAS-Dienste stehen entsprechend ausgerüsteten Luftfahrzeugen in einem Umkreis von etwa 30 km um den Flughafen zur Verfügung. Das Luftfahrzeug verwendet die differenziellen Korrekturen zur Berechnung einer verbesserten Position (mit Integrität), die es zur präzisen Navigation und zum präzisen Übergang vom Streckenluftraum in den und durch den Luftraum des Nahbereichs nutzt.

Während der Zweck des GBAS vornehmlich darin besteht, die Integrität zu gewährleisten, erhöht es auch die Genauigkeit (mit Ungenauigkeiten bei der Positionsbestimmung im Submeterbereich). In der Regel ist ein GBAS für CAT-I-Präzisionsanflüge ausgelegt, seit Kurzem ist aber auch die Nutzung für den CAT-II-Betrieb möglich ([GBAS-CAT-II-Betrieb in Frankfurt](#)).

Weitere Informationen zur Architektur und Leistung von GBAS sind auf der Navipedia [Navipedia-Website zu GBAS](#) erhältlich.

5.1.3.2.2 Differenzielles GNSS und Echtzeit-Kinematik und präzise Punktpositionierung

Ein **differenzielles GNSS (DGNSS)** ist eine Art von Augmentationssystemen, das auf der Verwendung eines Netzes von bodengestützten Referenzstationen basiert, die **differenzielle Informationen** an den Nutzer, auch Rover genannt, zur Verbesserung seiner Positionsgenauigkeit **senden**.

Der Begriff DGNSS wird häufig speziell für Systeme verwendet, welche die Korrekturen von bodengestützten Kurzstreckensendern mehrfach übermitteln. Als Beispiel betreiben die US-amerikanische Küstenwache und die kanadische Küstenwache ein solches System in den USA und Kanada auf den Langwellenfrequenzen zwischen 285 kHz und 325 kHz. Diese Frequenzen werden üblicherweise für den Seefunk verwendet und in der Nähe von großen Wasserstraßen und Häfen ausgestrahlt. Australien betreibt zwei DGPS: Das eine dient hauptsächlich der Schifffahrt und wird von der Australian Maritime Safety Authority – der australischen Behörde für die Sicherheit im Seeverkehr – betrieben, die ihr Signal auf dem Langwellenband ausstrahlt; das andere dient der Landvermessung und der Landnavigation, mit Korrekturen im kommerziellen FM-Funkband.

Andere DGNSS-Techniken, die bei hochpräzisen Navigations-/Vermessungsanwendungen zum Einsatz kommen und auf der Verwendung von Trägerphasenmessungen beruhen, sind Echtzeit-Kinematik (RTK) und weiträumige RTK.

Echtzeit-Kinematik (RTK) ist eine differenzielle GNSS-Technik, die eine hohe Positionsbestimmungsleistung in der Nähe einer Basisstation bietet. Eine RTK-Basisstation deckt einen Bereich von maximal 50 Kilometern ab, und es wird ein Echtzeit-Kommunikationskanal zwischen Basis und Rover benötigt. Mit RTK werden Leistungen im Bereich von wenigen Zentimetern erreicht.

Die **weiträumige RTK (WARTK)**, auch bekannt als Netzwerk-RTK, ermöglicht die Ausweitung lokaler Dienste, die auf der Auflösung der Trägerphasenmehrdeutigkeit in Echtzeit beruhen, auf ein weiträumiges Gebiet (d. h. mehr als 100 km), sowohl für Zweifrequenz- als auch für Dreifrequenznutzer. Unter Verwendung von Zweifrequenz- oder Dreifrequenz-Pseudobereichs- und Trägerphasenbeobachtungen zusammen mit den empfangenen Korrekturdaten kann der Nutzerempfänger eine absolut zentimetergenaue Positionsbestimmung durchführen. Die Technik basiert auf einer optimalen Kombination von genauen ionosphärischen und geodätischen Modellen in einem permanenten Referenzstationsnetz.

In den letzten Jahren wurden diese etablierten Ansätze zur Bestimmung von GNSS-Korrekturen und deren Bereitstellung mit PPP zu **PPP-RTK-GNSS-Korrekturdiensten** (manchmal auch als Zustandsraum-Repräsentation-Korrekturdienste bezeichnet) kombiniert, die das Beste aus beiden Welten bieten: Kombination einer schnellen Initialisierung und einer Genauigkeit, die der von RTK nahe kommt, mit der Fähigkeit, aufgrund von PPP-Algorithmen für kurze Zeit ohne Korrekturen zu arbeiten. Wie PPP-basierte Lösungen stützen sie sich auf ein Modell von GNSS-Fehlern mit breiter geografischer Gültigkeit und übertragen die verschiedenen GNSS-Fehlerkomponenten (oder Zustände) mittels Einwegkommunikation. Die GNSS-Empfänger berechnen dann die GNSS-Korrekturen für ihren jeweiligen Standort.

Die Zahl der Echtzeit-PPP-Dienste, die über einen terrestrischen Kanal über das Internet verbreitet werden, nimmt zu, sodass auch PPP-Dienste als eine neue Kategorie terrestrischer Dienste eingestuft werden können.

5.1.3.3 Empfängergerüst

Zur Gewährleistung des Sicherheitsniveaus der Positionsbestimmungslösung nutzen Empfänger in sicherheitskritischen Anwendungen Techniken der **autonomen empfängerseitigen Integritätsüberwachung (RAIM)**. Bei der RAIM wird eine Konsistenzprüfung der Messungen verschiedener Satelliten vorgenommen und der Benutzer wird gewarnt, falls eine Inkonsistenz festgestellt wird. In diesem Fall kann der Satellit ausgeschlossen oder der Positionsdienst unterbrochen werden.

Bei den jüngsten Entwicklungen für **luftfahrzeuggestützte Augmentationssysteme (ABAS)** im Luftverkehr liegt der Schwerpunkt auf der modernen autonomen empfängerseitigen Integritätsüberwachung (ARAIM) für Zweifrequenz- und Multikonstellationsnutzer. Für weitere Einzelheiten siehe Abschnitt [3.2.8](#).

5.2 Konventionelle PNT-Systeme

5.2.1 NDB



Ein **ungerichtetes Funkfeuer (non-directional beacon, NDB)** ist eine Funknavigationshilfe, die **es der entsprechenden Ausrüstung im Luftfahrzeug ermöglicht, die relative Peilung zu ihr zu bestimmen**. NDB sind sehr einfache Systeme, die aus einer Rundstrahlantenne bestehen, die kontinuierlich ein Trägersignal auf einer festen Frequenz ausstrahlt. Luftfahrzeuge, die mit einem automatischen Peiler (automatic direction finder, ADF) ausgerüstet sind, können den Ankwrtswinkel dieses Signals (d. h. die Peilung zum NDB) berechnen. Zur Angabe einer Strecke können mehrere NDB verwendet werden.

Abbildung 46 – NDB-Standort (Quelle: Krd, unter der Creative-Commons-Lizenz – „Namensnennung – Weitergabe unter gleichen

[Bedingungen 4.0 International“](#))

5.2.1.1 Hauptmerkmale

NDB arbeiten im Frequenzband von 190 kHz bis 1750 kHz und senden kontinuierlich einen modulierten Träger mit Identifikationsinformationen. NDB-Signale folgen der Erdkrümmung, sodass eine Abdeckung von 25 NM bis 150 NM erzielt werden kann. Die Genauigkeit des Systems hängt zwar von der an Bord des Luftfahrzeugs installierten automatischen Peilungsrüstung ab, die **ICAO schreibt jedoch eine Mindestgenauigkeit für NDB von $\pm 5^\circ$** vor.

Jedes NDB wird individuell durch einen Code identifiziert, der mindestens im 30-Sekunden-Takt übertragen wird. NDB müssen über ein Überwachungssystem verfügen, mit dem Fehlfunktionen des NDB oder der Überwachungseinrichtung selbst erkannt werden. Für die Spezifikationen siehe das Dokument [ICAO Annex 10 – Volume I – Radio Navigational Aids](#) (ICAO-Anhang 10 – Ausgabe 1 – Funknavigationshilfen).

Das NDB-System hat keine Kapazitätsbeschränkungen und kann eine beliebige Anzahl von Flugzeugen bedienen.

5.2.1.2 Stand und Rationalisierungspläne

NDB sind seit Jahrzehnten Teil der Bodeninfrastruktur von Navigationshilfen für das Flugverkehrsmanagement. Aufgrund ihrer technischen Beschränkungen, des Aufkommens von GNSS und des Wandels hin zu einer leistungsabhängigen Navigation **wird jedoch davon ausgegangen, dass NDB** entsprechend dem im [europäischen ATM-Masterplan](#) enthaltenen Vorschlag zur Stilllegung sowie der [Durchführungsverordnung in Bezug auf die leistungsbasierte Navigation](#) **in naher Zukunft außer Betrieb genommen werden**.

Im [Global Air Navigation Plan \(GANP\)](#) (globalen Luftfahrtplan) der ICAO wird davon ausgegangen, dass NDB als Funknavigationshilfen an Bedeutung verlieren werden, sodass die Möglichkeit besteht, sie außer Betrieb zu nehmen.

Weiterführende Informationen sind auf der [Wikipedia-Website zu NDB](#) erhältlich.

5.2.2 PCL

Beim **UKW-Drehfunkfeuer (VHF omnidirectional radio range, VOR)** handelt es sich um ein System, das es Luftfahrzeugen mit einer Empfangseinheit ermöglicht, **die magnetische Peilung von der Station zum Luftfahrzeug (VOR-Radial genannt) zu bestimmen**.

VOR nutzen eine kreisförmige Antennengruppe, die zwei Funksignale aussendet. Ein Signal (das **Referenzsignal**) strahlt omnidirektional ab, sodass seine Phase in alle Richtungen gleich ist. Das zweite Signal (das **variable Signal**) strahlt von einem Richtungsarray ab. Die Phase des variablen Signals, das am Luftfahrzeug empfangen wird, hängt von dem Radial ab, auf dem der Empfänger in Bezug auf die magnetische Nordrichtung liegt. Die



Ausrüstung an Bord des Luftfahrzeugs empfängt beide Signale, und aufgrund ihrer Phasendifferenz wird das VOR-Radial geschätzt. Wenn das VOR mit einem Entfernungsmessgerät (DME) verbunden ist (siehe Abschnitt [5.2.3](#)), können Luftfahrzeuge auch ihre Entfernung zum VOR berechnen und eine Positionsbestimmung vornehmen. Diese Methode wird als VOR-/DME-Navigation bezeichnet.

Abbildung 47 – VOR-Standort (Quelle: Marc Lambert, unter der [Creative-Commons-Lizenz](#))

Die Überschneidung der Radialen von zwei verschiedenen VOR-Stationen ermöglicht es Luftfahrzeugen auch, eine Positionsbestimmung vorzunehmen und von einem Punkt zum anderen zu navigieren.

5.2.2.1 Hauptmerkmale

Das VOR wird im Frequenzband von 108 MHz bis 117,975 MHz mit horizontaler Polarisierung betrieben. Die Genauigkeit der Peilungsangaben muss innerhalb von $\pm 2^\circ$ liegen. Die Reichweite des Systems ist durch die Sichtlinie begrenzt (bis zu einer Höhe von 40°) und liegt zwischen 25 NM und 130 NM. **Das VOR muss über eine Überwachungseinheit verfügen**, die eine Warnung erzeugt und entweder den Navigationsinhalt vom Träger entfernt oder die Strahlungsleistung abschaltet, wenn bestimmte Bedingungen für die Erbringung des Dienstes nicht erfüllt sind. Das Gleiche gilt, wenn die Überwachungseinrichtung selbst ausfällt.

[Das VOR erfüllt in angemessener Weise die Anforderungen an die Genauigkeit zur Unterstützung von RNAV 5.](#) Bei einem Doppler-VOR liegt die maximale Reichweite, in der das VOR eine 1-NM-Leistung erbringen kann, bei 23 NM vom VOR und bietet somit nicht die Genauigkeit, um anspruchsvollere Navigationspezifikationen in größerer Entfernung zu unterstützen. Für die Spezifikationen siehe das Dokument [ICAO Annex 10 – Volume I – Radio Navigational Aids](#) (ICAO-Anhang 10 – Ausgabe 1 – Funknavigationshilfen).

Das VOR-System hat keine Kapazitätsbeschränkungen und kann eine beliebige Anzahl von Flugzeugen bedienen.

5.2.2.2 Stand und Rationalisierungspläne

VOR sind seit Jahrzehnten Teil der Bodeninfrastruktur von Navigationshilfen für das Flugverkehrsmanagement. Aufgrund ihrer technischen Beschränkungen, des Aufkommens von GNSS und des Wandels hin zu einer leistungsorientierten Navigation wird jedoch davon ausgegangen, dass VOR in den nächsten Jahren an Bedeutung verlieren werden. Im europäischen ATM-Masterplan **ist eine Verringerung der Anzahl der VOR auf ein Mindestbetriebsnetz vorgesehen**, das **im Falle einer vorübergehenden Störung des GNSS bestimmte begrenzte Navigationsmöglichkeiten** bieten würde, wie in der [Durchführungsverordnung in Bezug auf die leistungsorientierte Navigation](#) angegeben.

Im [globalen Luftfahrtplan \(GANP\) der ICAO](#) wird davon ausgegangen, dass VOR als Funknavigationshilfen an Bedeutung verlieren werden, sodass die Möglichkeit besteht, sie außer Betrieb zu nehmen.

Weiterführende Informationen sind auf der [Wikipedia-Website zu VOR](#) erhältlich.

5.2.3 DME

Bei einem **Entfernungsgerät (DME)** handelt es sich um ein System zur Ermittlung der Schrägentfernung zwischen einem Luftfahrzeug und der entsprechenden Bodeneinrichtung. DME bestehen aus zwei Elementen: Abfragesender und Transponder. Der Abfragesender befindet sich am Luftfahrzeug und der Transponder am Boden. Der Abfragesender sendet ein Funksignal (ein Paar Gaußimpulse) aus, das der Transponder empfängt und verarbeitet. Nach einer vordefinierten Zeit antwortet der Transponder mit einem anderen Funksignal. Die Umlaufzeit dient zur Berechnung der Schrägentfernung zwischen Luftfahrzeug und Bodenstation. DME-Messungen von zwei verschiedenen Bodenstationen ermöglichen es Luftfahrzeugen, ihre Position zu bestimmen und von einem Punkt zum anderen zu navigieren. Diese Methode, die als DME/DME-Methode bezeichnet wird, hat sich weltweit bewährt.



Abbildung 48 – VOR/-DME-Standort (DME im Turm) (Quelle: Hans-Peter Scholz, unter [Creative-Commons-Lizenz](#))

5.2.3.1 Hauptmerkmale

Das DME wird im Frequenzband von 960 MHz bis 1215 MHz mit vertikaler Polarisation betrieben. Normalerweise sind DME bei der konventionellen Navigation mit einem VOR oder einem Instrumenten-Landesystem (ILS) verbunden. Bei der Unterstützung von PBN-Anwendungen können eigenständige DME verwendet werden. Wenn mit einem VOR verbunden, muss die Reichweite des DME mindestens der des VOR entsprechen. Wenn mit einem ILS verbunden, muss die Reichweite des DME mindestens der der ILS-Azimutwinkelführung entsprechen. Der DME-Transponder muss über eine Überwachungseinheit verfügen, die eine Warnung ausgibt und die abgestrahlte Leistung abschaltet, wenn bestimmte Bedingungen für die Erbringung des Dienstes nicht erfüllt sind oder wenn die Überwachungseinrichtung selbst ausfällt. Dies muss in weniger als zehn Sekunden nach Beginn des Ausfalls erfolgen. Für die Spezifikationen siehe das Dokument [ICAO Annex 10 – Volume I – Radio Navigational Aids](#) (ICAO-Anhang 10 – Ausgabe 1 – Funknavigationshilfen).

Die DME/DME-Positionsbestimmungsgenauigkeit liegt in der Größenordnung von einigen hundert Metern, was zu einer **Genauigkeit** der Luftfahrzeugposition **von nicht mehr als 0,3 NM** (bei bester Geometrie, d. h. einem Schnittwinkel von 90°) führt, was für die anspruchsvollsten Navigationsanforderungen möglicherweise nicht ausreichend ist. Die Verwendung von DME-Messungen von mehreren Stationen ist eine der Lösungen, um die Positionsbestimmungsgenauigkeit und -integrität zu verbessern. Zur Verbesserung der Genauigkeit der Entfernungsmessung und der Frequenznutzung werden **Verbesserte DME** vorgeschlagen, bei denen eine Kombination aus Einweg- und Zweiweg-Entfernungsmessung zum Einsatz kommt.

Moderne DME-Systeme **können bis zu 200 Luftfahrzeuge bedienen**.

5.2.3.2 Stand und Optimierungspläne

DME sind Teil der Bodeninfrastruktur von Navigationshilfen für das Flugverkehrsmanagement. Ein optimiertes oder erweitertes Netz soll die leistungsorientierte Navigation unterstützen. **Die DME/DME-Navigation unterstützt die Navigationsspezifikationen RNAV 5, RNAV 2, RNAV 1 und unter bestimmten Bedingungen auch RNP 1 und A-RNP.** DME könnte bei einem Ausfall des GNSS als ergänzende Infrastruktur dienen. Im [europäischen ATM-Masterplan](#) wird vorgeschlagen, das DME-Netz zu optimieren, auch um der [Durchführungsverordnung in Bezug auf die leistungsorientierte Navigation](#) nachzukommen.

Im [globalen Luftfahrtplan \(GANP\) der ICAO](#) werden DME im Hinblick auf die leistungsorientierte Navigation als geeignetes Backup für GNSS genannt. Um bei einem GNSS-Ausfall einen guten Dienst zu gewährleisten, muss das DME-Netz möglicherweise erweitert werden.

Außerdem **dürften verbesserte DME strengere RNP-Spezifikationen unterstützen und die Frequenzeffizienz verbessern**, mit der Folge, dass das L-Band weniger stark überlastet wird. Die Implementierung soll hauptsächlich durch Software-Upgrades und minimale Änderungen an der bord- und bodenseitigen Hardware erfolgen, wobei sichergestellt werden soll, dass die zusätzlichen Funktionen in vollem Umfang rückwärts kompatibel sind, um eine nahtlose Implementierung zu unterstützen. Weiterführende Informationen sind auf der [Wikipedia-Website zu DME](#) erhältlich.

5.2.4 ILS

Das **Instrumenten-Landesystem (ILS)** ist ein **Präzisionsanflug- und -landesystem**, das Luftfahrzeugen unmittelbar vor und während der Landung horizontale und vertikale Führung bietet und an bestimmten Fixpunkten die Entfernung zum Referenzpunkt der Landung anzeigt.



Abbildung 49 – ILS (Landekursender) (Quelle: Super Dominicano, unter der [GNU-Free-Dokumentation-Lizenz](#))

Ein ILS besteht aus folgenden Komponenten:

- **Landekursender:** System der horizontalen Führung im ILS, das die horizontale Abweichung des Luftfahrzeugs von seiner optimalen Sinkflugbahn entlang der Achse der Landebahn anzeigt;
- **Gleitwegsender:** System der vertikalen Führung im ILS, das die vertikale Abweichung des Luftfahrzeugs von seinem optimalen Sinkflugbahn anzeigt;
- **Einflugzeichen:** Sender im Funknavigationsdienst für die Luftfahrt, die vertikal ein charakteristisches Muster zur Übermittlung von Positionsinformationen an das Luftfahrzeug abstrahlen.

Im derzeit geltenden Anhang 10 wurde das Einflugzeichen durch ein Mittel zur Durchführung von Kontrollen der Flughöhe ersetzt und ist daher nicht mehr integraler Bestandteil des ILS. Auf den meisten europäischen Flughäfen ist das DME das Mittel der Wahl für die Kontrolle der Flughöhe – ein Ersatz und eine Verbesserung gegenüber des Einflugzeichens.

5.2.4.1 Hauptmerkmale

Der Landekursender wird im Frequenzband von 108 MHz bis 111,975 MHz betrieben. Die Signale werden mit einem 90-Hz- und einem 150-Hz-Ton amplitudenmoduliert, wobei jeder Ton auf einer Seite des Kurses überwiegt, und horizontal polarisiert.

Der Gleitwegsender wird im Frequenzband von 328,6 MHz bis 335,4 MHz betrieben. Die Strahlung wird mit einem 90- und einem 150-Hz-Ton amplitudenmoduliert und horizontal polarisiert.

Die **Einflugzeichen** werden bei 75 MHz betrieben und ihre Signale horizontal polarisiert. Jede Anlage muss über zwei Einflugzeichen verfügen, die die vorgegebene Entfernung anzeigen. Das erste Einflugzeichen (das Voreinflugzeichen) befindet sich in der Regel etwa 5 NM von der Landeschwelle entfernt, während das zweite Einflugzeichen (das Haupteinflugzeichen) etwa 1 NM von der Landeschwelle entfernt ist. Bei fast allen europäischen ILS-Anlagen werden die Markierungsfunkfeueranlagen durch DME am Standort des ILS ersetzt, die dem Piloten eine kontinuierliche horizontale Entfernung zur Landebahn anzeigen.

ILS-Anflüge sind nach Kategorien klassifiziert und können bis zu einer bestimmten Pistensichtweite (runway visual range, RVR) und Entscheidungshöhe (decision height, DH) von qualifizierten Piloten geflogen werden, die entsprechend ausgerüstete Luftfahrzeuge ohne Sichtmerkmale zu entsprechend ausgerüsteten Landebahnen. Die Kategorien (categories, CAT) lauten wie folgt:

- CAT I: DH von mindestens 200 ft und Pistensichtweite von mindestens 500 m;
- CAT II: DH von mindestens 100 ft und Pistensichtweite von mindestens 300 m;
- CAT IIIA: DH von weniger als 100 ft und Pistensichtweite von nicht weniger als 200 m;
- CAT IIIB: DH von weniger 50 ft und Pistensichtweite von nicht weniger als 50 m;
- Cat IIIC:⁹ vollständige automatische Landung mit Rollführung entlang der Pistenmittellinie ohne DH- oder RVR-Beschränkungen. Diese Kategorie ist derzeit nicht routinemäßig verfügbar.

Eine automatische Überwachungseinrichtung sendet eine Warnung, wenn ein Systemausfall erkannt wird. Für die Spezifikationen siehe das Dokument [ICAO Annex 10 – Volume I – Radio Navigational Aids](#) (ICAO-Anhang 10 – Ausgabe 1 – Funknavigationshilfen). Das ILS hat keine Kapazitätsbeschränkungen.

5.2.4.2 *Stand und Optimierungspläne*

Das ILS ist heute das am weitesten verbreitete System für Präzisionsanflug und -landung. Da jedoch satellitengestützte und bodengestützte Ergänzungssysteme (SBAS und GBAS) Präzisionsanflüge ermöglichen, soll die ILS-Infrastruktur in Europa rationalisiert werden. Der [europäische ATM-Masterplan](#) trägt der Notwendigkeit Rechnung, **das ILS-CAT-I-Netz und insbesondere die ILS-CAT-I-Infrastruktur bis 2030 zu rationalisieren**, um der [Durchführungsverordnung in Bezug auf die leistungsbasierte Navigation](#) zu entsprechen, die den ILS-CAT-I-Betrieb nur in Notfallsituationen erlaubt (d. h. beim Verlust der in der genannten Verordnung vorgeschriebenen PBN-Dienste).

Darüber hinaus wird im [globalen Flug navigationsplan \(GANP\) der ICAO](#) das ILS als geeignete Navigationshilfe für Präzisionsanflug und -landung genannt. Weiterführende Informationen sind auf der [Wikipedia-Website zu ILS](#) erhältlich.

⁹ Es sei darauf hingewiesen, dass die ICAO die Unterkategorien CAT-III A, CAT-IIIB und CAT-IIIC streichen und durch das Konzept der leistungsbasierten Flugplatz-Betriebsminima ersetzen wird.

5.2.5 TACAN

Das **Tactical Air Navigation System (TACAN)** ist ein Funknavigationssystem, das hauptsächlich von der NATO und anderen Streitkräften eingesetzt wird und Militärluftfahrzeugen Peilung und Entfernung (Schrägentfernung) zu einer Bodeneinrichtung, einem Schiff oder einem entsprechend ausgerüsteten Luftfahrzeug liefert. Im Allgemeinen kann es als **militärisches System beschrieben werden, das dem VOR-/DME-System** für Navigationszwecke **gleichwertig ist**. Der DME-Anteil des TACAN kann für zivile Zwecke in Betracht gezogen werden. TACAN wird im Luft-Boden- und/oder



Luft-Luft-Modus betrieben. Im Luft-Boden-Modus können entsprechend ausgerüstete Luftfahrzeuge das TACAN sowohl für die Streckennavigation als auch für Nicht-Präzisionsanflüge nutzen. Das TACAN kann mit VOR-Stationen (VORTAC-Anlagen) kombiniert werden.

Abbildung 50 – TACAN-Standort (Quelle: Nbonfanti unter der Creative-Commons-Lizenz – „Namensnennung – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International“)

5.2.5.1 Hauptmerkmale

Das TACAN wird im Frequenzband 960 MHz bis 1215 MHz betrieben. Die Peilungseinheit von TACAN ist genauer als ein Standard-VOR, da sie ein Zweifrequenzprinzip mit 15-Hz- und 135-Hz-Komponenten verwendet und weil Ultrahochfrequenz-Übertragungen weniger anfällig für Signalverfälschungen sind als UKW-Übertragungen.

Die Reichweite des TACAN beträgt etwa 200 NM. Die Genauigkeit der 135-Hz-Azimutkomponente beträgt $\pm 1^\circ$ bzw. ± 63 m bei 3,75 km. Die Genauigkeit des DME-Anteils muss 926 m (0,500 NM) bzw. 3 % der Schrägentfernung betragen, je nachdem, welcher Wert größer ist. Für die Spezifikationen siehe das Dokument [FAA 9840.1 1982](#).

Das TACAN ist eines der anerkannten militärischen Systeme, die für die Navigation zugelassen sind, und für einige Luftfahrzeuge ist es das einzige zugelassene System. Es hat sich sowohl in Friedenszeiten als auch in Krisensituationen bewährt. **Eine potenzielle Herausforderung ist die Sicherheit des vom TACAN bereitgestellten Dienstes im Hinblick auf Resilienz und Anfälligkeit.** Daher könnte das TACAN langfristig durch ein System mit höherer Resilienz gegenüber Sicherheitsbedrohungen ersetzt werden.

5.2.5.2 Stand und Rationalisierungspläne

Die DME-/DME-gestützte Positionsbestimmung wurde als eine wesentliche kurzfristige Funktion zur Unterstützung des PBN-Betriebs identifiziert. **Die Nutzung von TACAN-Strukturen** für den Strecken- und Anflugbetrieb ist für staatliche Luftfahrzeugbetreiber von entscheidender Bedeutung, wenn es darum geht, die Luftraumflexibilität bei der Durchführung des GAT-Betriebs zu erhöhen, und **durch die Verwendung der DME-Komponente des TACAN könnten die potenziellen Abdeckungsbeschränkungen des europäischen DME-Netztes überwunden werden.** Bei der Umnutzung militärischer Systeme dürfte die Konformität gewährleistet und ein angemessenes Leistungsniveau zur Unterstützung der PBN-Spezifikationen aufrechterhalten werden.

Weiterführende Informationen sind auf der [Wikipedia-Website zum TACAN](#) erhältlich.

5.2.6 Loran

Das **Long Range Navigation System (Loran)** ist ein hyperbolisches Navigationssystem, das ursprünglich in den 1950er Jahren entwickelt wurde. **Es vergleicht die Ankunftszeit von Signalen, die von synchronisierten Senderpaaren kommen.** Durch den Empfang der Signale eines Senderpaares und die Kenntnis ihrer Position kann der Nutzer seine Position innerhalb einer hyperbolischen Linie eingrenzen. Durch den Empfang der Signale von zwei weiteren Senderpaaren wird die Position auf eine zweite und eine dritte hyperbolische Linie eingegrenzt. Der Schnittpunkt der hyperbolischen Linien markiert die Position des Empfängers.

Die verschiedenen Weiterentwicklungen des LORAN tragen unterschiedliche Namen (LORAN, Loran-A, Loran-B, Loran-C, usw.). Chayka ist ein russisches System, das mit dem Loran fast identisch ist. Empfänger sind in der Regel mit beiden Navigationssystemen kompatibel.

Weiterführende Informationen sind auf der [Wikipedia-Website zum Loran](#) sowie auf der [Website der International Loran Association](#) erhältlich.

5.2.6.1 Loran-C/Chayka

Loran-C war die am stärksten erweiterte Version des Loran.

5.2.6.1.1 Hauptmerkmale

Das Loran-C wird im Frequenzband von 90 kHz bis 110 kHz mit einer Leistung von 100 Kilowatt bis zu mehreren Megawatt betrieben. Loran-C-Sender sind in Ketten zusammengefasst. Jede Kette verfügt über eine Hauptstation und mindestens zwei Nebenstationen. Die Hauptstation sendet neun Impulse in vordefinierten Intervallen. Nach dem Empfang dieser Impulse sendet jede Nebenstation mit einer bestimmten Verzögerungszeit acht Impulse. Die Impulse werden kodiert, damit der Empfänger die verschiedenen Emissionen identifizieren kann. Der Standort der Haupt- und Nebenstation, das Wiederholungsintervall der Hauptstation und die Verzögerungszeiten der Nebenstationen sind alle bekannt. Wenn ein Nutzer all diese Impulse empfängt, kann er somit die Laufzeit zwischen seiner Position und den verschiedenen Stationen abschätzen. Anhand dieser Informationen lässt sich der Empfängerstandort abschätzen.



Abbildung 51 – LORAN-C-Sender (Quelle: Bin im Garten, unter Creative-Commons-Lizenz – „Namensnennung – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 3.0 Unported“)

Für die **Übertragung sehr niedriger Frequenzen bei sehr hohen Leistungen** bedarf es Sendeantennenmasten von mehreren hundert Metern. Das Strahlungsmuster dieser Antennen ist omnidirektional. Loran-C-Übertragungen müssen genau synchronisiert werden. Zu diesem Zweck umfasst jeder Sender bis zu drei Atomuhren. **Das Loran-C hat eine Genauigkeit von besser als 460 Meter und eine Verfügbarkeit von 99,7 %.** Jeder Sender hat eine typische **Reichweite von bis zu mehreren hundert Kilometern.** Die Reichweite hängt von Faktoren wie Tag-/Nachtbedingungen, Wetter und Übertragung über Land oder Meer ab.

Detaillierte Informationen zu den Loran-C-Spezifikationen sind auf der [Website „Loran-C Introduction“](#) (Loran-C – Einführung) erhältlich. Für das Loran-C wurden noch nie ICAO-Normen verfasst, weshalb das System für die Luftfahrt nicht infrage kommt.

Das Loran-C hat keine Kapazitätsbeschränkungen.

5.2.6.1.2 Stand und Rationalisierungspläne

Mit der Entwicklung von Satellitennavigationssystemen ging die Zahl der Loran-C-Nutzer stark zurück. Das Loran-C ist im Far East Radionavigation Service (Fernost-Funknavigationssystem), der von Russland, China und der Republik Korea betrieben wird, immer noch in Betrieb, aber viele Sender sind seit einiger Zeit abgeschaltet. **In Europa ist das Loran-C nicht mehr im Einsatz**, da Spanien, Norwegen, Island, Italien, Frankreich und Deutschland ihre Loran-C-Übertragungen etwa 2015 eingestellt haben.

5.2.6.2 eLoran

Das **Enhanced Long Range Navigation System (eLoran)** ist ein terrestrisches Funknavigationssystem mit niedriger Frequenz und großer Reichweite, das völlig unabhängig von GNSS Ortungs-, Navigations- und Zeitgebungsdienste (PNT) für viele Verkehrsträger bereitstellen kann.

Das eLoran sendet gepulste Bodenwellensignale mit einer Mittenfrequenz von 100 kHz, was den Signalen ihre weitreichende Navigationsfähigkeit von weit auseinander liegenden Sendern aus verleiht. Die Position des Empfängers wird durch die Messung der Ankunftszeiten (oder Pseudostrecken) dieser Impulse bestimmt. Für eine horizontale Positionsbestimmungslösung durch Trilateration müssen Pseudoentfernungen von mindestens drei Sendern gemessen werden. Da sich die Sender auf der Erdoberfläche befinden, kann die Höhe des Empfängers nicht bestimmt werden. Die Messung von mehr als drei (vorzugsweise fünf) Übertragungen bietet

dem Nutzer zusätzlich zur Positionsbestimmungsgenauigkeit die Möglichkeit zu autonomen empfängerseitigen Integritätsüberwachung (RAIM).

5.2.6.2.1 Hauptmerkmale

Das eLoran bietet einen Loran-ähnlichen Dienst mit **höherer Genauigkeit (in der Größenordnung von 20 m), Verfügbarkeit und Integrität**. Der Hauptunterschied zum LORAN-C-System besteht darin, dass in das eLoran ein oder mehrere Datenkanäle hinzugefügt werden, die zusammen mit dem Loran-Signal übertragen werden, was dazu dient, differenzielle eLORAN- und/oder DGPS-Korrekturen und Integritätsinformationen zu übermitteln, wodurch die Leistungen (Genauigkeit, Integrität, Verfügbarkeit und Kontinuität) im Vergleich zum Loran-System verbessert werden, aber beide Systeme die gleiche Abdeckung haben. Es ermöglicht auch die Übertragung zusätzlicher Daten, einschließlich Navigationsnachrichten. Diese Verbesserungen erfordern ein eigenes sekundäres terrestrisches Netz von Referenzstationen, die bis zu 50 km voneinander entfernt sind.

Das eLoran besteht aus Sendestationen, Überwachungsstellen und einem Kontrollzentrum. Die Überwachungsstellen überprüfen die zeitliche Genauigkeit der übertragenen Signale und senden Korrekturen an das Kontrollzentrum, das diese Beobachtungen sammelt und verarbeitet und die von den Sendestationen zu übermittelnden Korrektur- und Integritätsdaten generiert. Diese Stationen übertragen die Korrekturen über den Datenkanal. Die eLoran-Sendestationen sind mit Atomuhren ausgestattet, und die Übertragungen sind genau mit der UTC synchronisiert. Für die Ortung eines Empfängers sind die Signale von mindestens drei Sendestationen erforderlich.

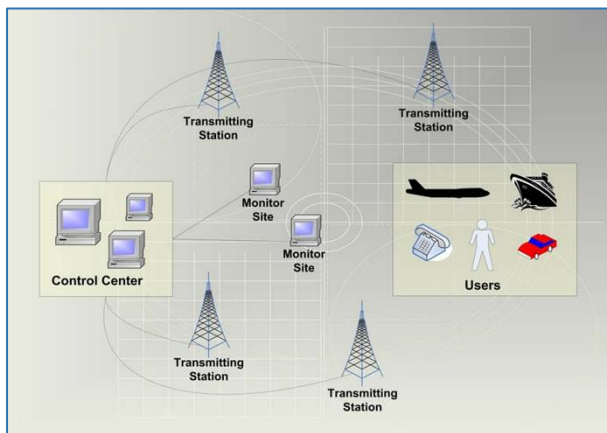


Abbildung 52 – eLoran-System (Quelle: [Enhanced Loran \(eLoran\) – Definition Document](#))

Die Genauigkeit bei der Positions- und Zeitbestimmung des eLoran kann innerhalb des

Abdeckungsgebiets erheblich schwanken und ist schlechter als die des GNSS. Jedoch werden eLoran-Signale mit sehr hoher Leistung und auf einer sehr niedrigen Frequenz übertragen (was eine komplexe Infrastruktur erfordert, einschließlich Antennen, die bis zu 200 Meter hoch sein können), was bedeutet, dass ein unbemerktes Jamming von eLoran-Empfängern sehr schwierig ist. Darüber hinaus durchdringen die verwendeten Niederfrequenzsignale Gebäude und andere Bereiche, in denen keine GNSS-Signale verfügbar sind.

5.2.6.2.2 Stand und Modernisierungspläne

Die eLoran-Dienste sind in Europa nicht verfügbar. Im Dezember 2015 kündigten die allgemeinen Seezeichenverwaltungen des Vereinigten Königreichs und Irlands die Einstellung ihres eLoran-Prototypdienstes an. Die Systemkenntnisse sind jedoch so weit fortgeschritten, dass ein eLoran-Dienst relativ schnell eingerichtet werden kann.

5.2.6.3 DLoran (differenzielles eLoran)

Das differenzielle eLoran (DLoran) ist ein **lokales Augmentationssystem zur Erhöhung der Leistung des eLoran** in einem bestimmten Gebiet.

5.2.6.3.1 Hauptmerkmale

Das **Funktionsprinzip ist ähnlich dem eines DGNSS**. In dem betreffenden Gebiet werden mehrere DLoran-Referenzstationen errichtet. Diese Stationen, deren genauer Standort bekannt ist, verfügen über einen eLoran-Empfänger und eine Kommunikationsverbindung zu einem DLoran-Kontrollzentrum. Die Referenzstationen verwenden eLoran zur Schätzung ihrer Positionen und übermitteln diese Informationen an das DLoran-Kontrollzentrum, das die Fehler in Bezug auf die tatsächlichen Positionen berechnet. Das Kontrollzentrum kennt somit die Leistung des eLoran im betreffenden Gebiet und berechnet **differenzielle Korrekturen** für das Abdeckungsgebiet.

DLoran-Nutzer benötigen einen eLoran-Empfänger sowie eine drahtlose Kommunikationsverbindung zum DLoran-Kontrollzentrum. Der Nutzer ermittelt seine Position mit eLoran und sendet sie an das DLoran-Kontrollzentrum. Das Kontrollzentrum berechnet die optimalen differenziellen Korrekturen für diese Position und sendet sie an den Nutzer zurück. Schließlich **wendet der Nutzer diese Korrekturen an und erhält bessere PNT-Informationen**.

Die Kommunikationsverbindung zwischen dem Nutzer und dem DLoran-Kontrollzentrum erfolgt über das öffentliche Mobilfunknetz (3G/4G).

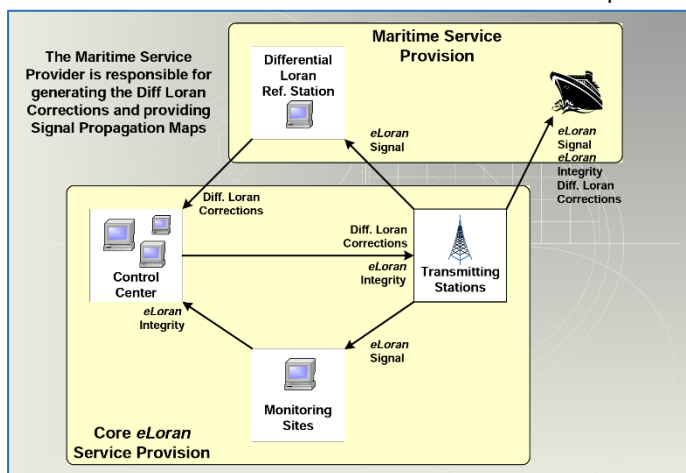


Abbildung 53 – Beispiel für die DLoran-Dienstleistung für Nutzer im Seeverkehr (Quelle: [Enhanced Loran \(eLoran\) – Definition Document](#))

Die DLoran-Infrastruktur (Referenzstationen und Kontrollzentrum) ist vom eLoran unabhängig.

Die im Hafen von Rotterdam durchgeführten dynamischen Tests **ergaben eine Genauigkeit von besser als ± 5 Metern**.

5.2.6.3.2 Stand und Modernisierungspläne

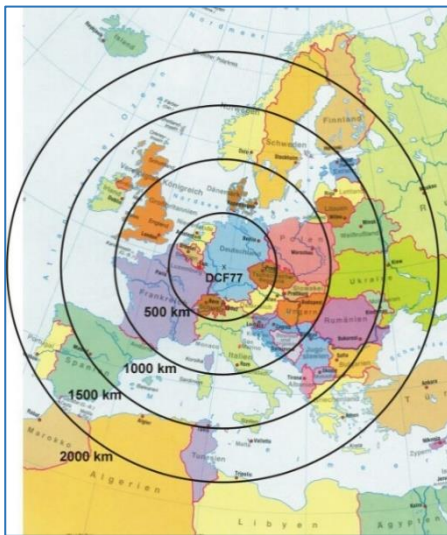
Das DLoran ist ein lokales Augmentationssystem für das eLoran. Da die Loran-C- und eLoran-Übertragungen in Europa 2015 eingestellt wurden, **werden keine DLoran-Dienste mehr erbracht**.

5.2.7 Langwellige Zeit- und Frequenzverteilungssysteme

Langwellensysteme (z. B. das [DCF77 in Deutschland](#), das [MSF im Vereinigten Königreich](#) und das [ALS162 in Frankreich](#)) werden in Europa seit Jahrzehnten **zur Verteilung der gesetzlichen Zeit und der Standardfrequenz** verwendet. Sie nutzen sehr niedrige Frequenzen und hohe Leistung, um Entfernungen von bis zu Tausenden von Kilometern zu erreichen. Im Folgenden werden die Merkmale des DCF77-Systems beschrieben. Diese Systeme sind resistent gegen Spoofing oder Jamming, und ihre Bedrohungen und Schwächen unterscheiden sich grundlegend von denen von GNSS.

5.2.7.1 Hauptmerkmale

DCF77 ist eine der Methoden der deutschen Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) zur Verteilung des gesetzlichen Zeit- und des Frequenznormals in Deutschland. Es werden drei Atomuhren genutzt, um eine Trägerfrequenz von 77,5 kHz zu erzeugen. Eine 150 Meter hohe Rundstrahlantenne überträgt das Signal mit einer äquivalenten isotropen Strahlungsleistung von 35 KW. Die Antenne befindet sich in Mainflingen und hat eine **Reichweite von rund 2000 km**, womit die meisten Staaten in Europa abgedeckt sind (einige Gebiete wie Island, Nordnorwegen, Nordschweden, Nordfinland, Zypern, die Kanarischen Inseln, die Azoren, Madeira und Kreta liegen außerhalb der Reichweite).



Zur Übertragung der Zeit- und Datumsinformationen ist der Träger amplitudenmoduliert. Jede Sekunde wird die Amplitude des Trägers auf 15 % seines ursprünglichen Wertes verringert. Bei einer Dauer der Amplitudenverringernng von 0,1 Sekunden wird eine binäre „0“ übertragen. Bei einer Dauer der Amplitudenverringernng von 0,2 Sekunden wird eine binäre „1“ übertragen. Somit kann das System 60 Bits pro Minute übertragen, was bedeutet, dass der Nutzer jede Minute Informationen in Bezug auf das Jahr, den Monat, den Wochentag, den Tag des Monats, die Stunde und die Minute erhält. Die Sekunde ergibt sich aus der Anzahl der seit Beginn der Minute erfolgten Verringerungen der Amplitude.

Abbildung 54 – Verbreitung von DCF77-Signalen in Europa (Quelle: PTB)

Die Trägerfrequenz hat eine **durchschnittliche Abweichung von weniger als 2×10^{-12}** an einem Tag am Ort der Übertragung. Der Nulldurchgang des **Trägersignals wird mit einer Genauigkeit von $5,5 \pm 0,3$ Mikrosekunden in Bezug auf die UTC-Realisierung** von der PTB **beibehalten**.

Der französische Signalsender ALS162 (162 kHz), der von Télédiffusion de France (TDG) betrieben wird, befindet sich in Allouis (Cher). Der Sender, bei dem Cäsiumatomuhren, bei denen ein thermischer Atomstrahl geformt wird, zum Einsatz kommen, ist über gemeinsame GPS-Ansichten mit der UTC(OP)-Zeitskala verbunden, die vom LNE-SYRTE am Observatoire de Paris erzeugt wird.

5.2.7.2 Stand und Modernisierungspläne

DCF77 ist **seit 1959 in Betrieb** und wird immer noch zur Synchronisierung von Zeitmesssystemen in deutschen Bahnhöfen, von Fernseh- und Rundfunkanstalten, in der Energie- und Telekommunikationsindustrie, zur Kalibrierung von Frequenzgeneratoren und von Privatpersonen, die funkgesteuerte Uhren besitzen, verwendet. Ein Vorteil von DCF77 gegenüber GNSS ist die Fähigkeit, **Gebäude** und schwierige Umgebungen **zu durchdringen**. Die **Verfügbarkeit** von DCF77 lag im Jahr 2016 bei **99,79 %**, wobei Verbindungsunterbrechungen von weniger als zwei Minuten nicht berücksichtigt wurden. Eine [Modernisierung](#) für das Nutzersegment mit softwaredefinierten Funktechniken ist ebenfalls möglich.

5.2.8 Atomuhren

Eine Atomuhr **misst die Zeit durch Überwachung der Strahlungsfrequenz von Atomen**. Die Elektronenzustände des Atoms weisen unterschiedliche Energieniveaus auf, und bei den Übergängen zwischen den Zuständen erzeugen sie eine ganz bestimmte Frequenz elektromagnetischer Strahlung. Durch deren Messung lassen sich präzise Zeit- und Frequenzwerte ermitteln.

Atomuhren werden als **primäre Standards für Dienste verwendet, die eine präzise Zeit- und Frequenzverteilung erfordern**, z. B. Hochgeschwindigkeits-Telekommunikation, Fernsehübertragung und GNSS-Systeme. **GNSS erfordern ultrapräzise Atomuhren** sowohl an Bord der Satelliten als auch im Bodensegment, um eine sehr genaue und stabile Referenzzeit und sehr genaue Navigationsinformationen zu berechnen. Kleinere Atomuhren werden bei anderen Arten von Satelliten in der Erdumlaufbahn (LEO, MEO, GEO) sowie bei Weltraumsonden verwendet.

Sehr leistungsfähige Atomfrequenznormale (Cs- und Rb-Fontänenuhren und optische Atomuhren) werden auch von den **nationalen Metrologieinstituten (NMI)** verwendet, die nicht nur bei der Realisierung der UTC-Zeit und -Frequenz, sondern auch bei der Entwicklung fortschrittlicher Atomfrequenznormale und -messmethoden eine entscheidende Rolle spielen. Die NMI verfügen über hochwertige Zeitskalen, und viele nehmen die Zeit- und Frequenzverteilung über das Internet vor, wobei einige auch VLF-Funksignale wie WWV bereitstellen.

Weiterführende Informationen sind auf der [Wikipedia-Website zu Atomuhren](#) sowie im Dokument „[The Science of Timekeeping](#)“ erhältlich.

5.2.8.1 Hauptmerkmale

Die Leistung der Uhr lässt sich in Bezug auf Genauigkeit und Stabilität beschreiben:

- Die **Genauigkeit** ist das Maß dafür, wie gut das Gerät mit dem idealen Bezugswert übereinstimmt. Bei den meisten PNT-Anwendungen bedeutet dies, wie genau die Uhr der UTC folgt.
- Die **Stabilität** ist das Maß dafür, wie gut das Gerät seine Frequenz im Vergleich zur Standardfrequenz beibehält (d. h. unter der Annahme, dass das einzige Ziel darin besteht, dass die Frequenz gleich bleibt). Das charakteristische Verhalten folgt nicht einer messzeitintervallunabhängigen Normalverteilung (zufälliges weißes Rauschen), sodass die **Allan-Standardabweichung** zur Schätzung der zufälligen Frequenzstabilität verwendet wird, die der quadratischen Differenz zwischen den in einem bestimmten zeitlichen Abstand gemessenen Werten entspricht, nachdem jegliche systematische Drift beseitigt wurde. Da die Allan-Standardabweichung, die dimensionslos ist, eine Funktion des Messzeitintervalls ist, kann sie zur Unterscheidung zwischen kurz-, mittel- und langfristiger Stabilität verwendet werden. Die kurzfristige Stabilität wird vor allem durch die Uhrenkomponenten bestimmt (dominiert), die mittelfristige Stabilität durch Umwelteinflüsse (vor allem Temperatur, aber auch Druck, Feuchtigkeit, Magnetfelder und Ähnliches) und die langfristige Stabilität durch die Alterung (physikalische Eigenschaften der Hardware).

Es gibt hauptsächlich drei Arten von Atomuhren (angegeben nach Kosten und Genauigkeit):

- [Rubidium-Normale](#) (Rb) mit guter kurzfristiger Stabilität, aber einer täglichen Abweichung von der UTC im Mikrosekundenbereich, abhängig von externen Faktoren;
- [Cäsium-Normale](#) (Cs) mit besserer Genauigkeit (in einem Wochenintervall tritt eine Abweichung von maximal einer Mikrosekunde auf) und mittelfristiger Stabilität, die jedoch unter kleinen kurzfristigen Schwankungen leiden (ihre Tagesstabilität ist schlechter als bei Rb).

Sowohl Rb als auch Cs sind mittelfristig von rosa Rauschen und langfristig von Alterung betroffen. Außerdem erschöpft sich die Cs-Quelle mit der Zeit, und die Nutzungsdauer von zehn Jahren bei Cs ist kürzer als bei Rb.

- [Wasserstoff-Maser](#) (H-Maser) mit der besten Genauigkeit und Stabilität und begrenztem Alterungseffekt auf lange Sicht (sie müssen jedoch auf Frequenzversatz kalibriert werden).

Da das GNSS-Bodensystem sowohl Rb als auch H-Maser im Weltraum kalibrieren kann, werden bei GNSS-Satelliten häufig Rb in Kombination mit passiven Wasserstoff-Masern eingesetzt, die durch die Uhren der Bodenstation ausgeglichen werden.

5.2.8.2 Miniaturisierte Atomuhr in Chip-Größe (CSAC)

In den letzten 30 Jahren konzentrierte sich die Forschung auch auf die Miniaturisierung von Atomuhren, was zur Entwicklung der **miniaturisierten Atomuhr in Chip-Größe (chip scale atomic clock, CSAC)** führte. Dabei handelt es sich um kompakte Geräte mit geringem Stromverbrauch, die mikroelektromechanische Systeme (MEMS) verwenden und einen Halbleiterlaser mit geringem Stromverbrauch als Lichtquelle enthalten. Die derzeitigen kommerziellen CSAC haben eine Größe von $< 17 \text{ cm}^3$, ein Gewicht von 35 g und eine Leistung von $< 120 \text{ mW}$ und arbeiten in einem relativ breiten Temperaturbereich (-40 bis 85 °C). Sie halten eine Genauigkeit von 10^{-7} innerhalb eines Tages.

Diese Merkmale ermöglichen ein breites Spektrum von Einsatzmöglichkeiten in der Weltraumindustrie, im Verteidigungssektor und im zivilen Bereich. Zu den vielversprechendsten Märkten gehören autonome Fahrzeuge, Drohnen, taktische PNT-Geräte und LEO-Satelliten.

Praktisch jede PNT-Anwendung profitiert von der verbesserten Qualität der Uhren.

5.2.8.3 Stand und Optimierungspläne

Mit Blick auf die Zukunft konzentrieren sich die laufenden **Forschungsarbeiten** auf Folgendes:

- Stromverbrauch und Hardware-Verbesserungen, z. B. die Verbesserung von Lasern als Ersatz der Entladungslampe in Rubidium-Uhren;
- Kaltatom-Uhren für Weltraumanwendungen, mit vielversprechenden Tests, die von der ESA und China durchgeführt wurden und die Kapazität dieser Systeme belegen;
- Entwicklung von optischen Uhren (oder optischen Gitteruhren) für Weltraummissionen. Zwar sind einige Komponenten bereits gut erforscht, doch ist die Technologie insgesamt noch nicht ausgereift, da die Herstellung schwierig ist und ein hoher Größen- und Energiebedarf besteht. Die meisten aktuellen Experimente konzentrieren sich auf die fundamentalen physikalischen Experimente. Aufgrund ihrer Genauigkeit und Stabilität sind sie jedoch geeignet, die derzeitigen Zeitnormale in Zukunft zu ersetzen. Für weiterführende Informationen zur Quantentechnologie siehe Abschnitt [5.3.11](#).

5.3 Neue Technologien

In diesem Abschnitt sind die **neuen PNT-Technologien** mit dem höchsten Reifegrad und der größten zugeschriebenen Bedeutung aufgeführt und beschrieben. Aufgrund der Art der Beschreibung war eine Vereinfachung der Konzepte erforderlich, was zu einer Gruppierung der Technologien auf der Grundlage der Ähnlichkeit der Hardware führte. Dieser Anhang umfasst:

- funkgestützte Technologien, bodengestützt (z. B. Pseudoliten) oder weltraumgestützt (LEO-Satelliten);
- Technologien, die ausgereifte Zeitgebungsdienste mit hoher Leistung erbringen;
- mobile Navigation, die bis zu einem gewissen Grad hardwareunabhängig ist und stark von Sensorfusion, maschinellem Lernen und Backend-Servern abhängt und eine maßgebliche Technologie für den Massenmarkt ist;
- nicht funkgestützte Technologien wie Trägheitssysteme und Magnetsensoren;
- Visuelle Techniken, Lasererfassung und Entfernungsmessung (LIDAR) oder radargestützte Techniken, die zwar nicht unbedingt PNT bieten, aber für die Sensorfusion wichtig sind;
- Quanten und Pulsare, die in Zukunft sehr interessante Leistungen bieten könnten.

Darüber hinaus wird die Verwendung fortschrittlicher Konzepte, z. B. Signal of Opportunity (SoO) oder Sensorfusion, zwar erörtert, aber nicht näher erläutert.

Es ist interessant, dass die meisten der ausgewählten ausgereiften Technologien auf dem Markt Zeitverteilung bieten. Die Notwendigkeit einer alternativen Zeitmessung fand jüngst Erwähnung in der [US-amerikanischen Durchführungsverordnung 13905](#) sowie im [National Timing Centre Programme des Vereinigten Königreichs](#). **Die Zeitverteilung wird in der EU aktiv weiterentwickelt** und durch das einzigartige Netz der nationalen Metrologieinstitute (NMI) verbessert. Da diese eine wichtige Rolle bei der Realisierung der UTC und der Frequenz sowie bei der Entwicklung fortschrittlicher Atomfrequenznormale spielen, ist es nur natürlich, dass sich um sie herum ein Ökosystem von Unternehmen gebildet hat, deren Schwerpunkt auf der Zeitverteilung liegt. Die Langwellenzeitsysteme, eLoran und Atomuhren sind die im vorherigen Anhang beschriebenen Technologien, die in der Lage sind, UTC zu liefern (und beizubehalten).

Die Literaturrecherche und die [von der JRC durchgeführte Testkampagne für alternative PNT-Systeme](#) zeigen, dass es **sehr schwierig und teuer ist, Technologien, die vollständige PNT-Dienste ermöglichen, zur Marktreife zu bringen**. Die in diesem Abschnitt beschriebenen Technologien profitieren von jahrelanger Erfahrung (z. B. im Silicon Valley oder in einem australischen Forschungszentrum) sowie von jahrelangen Investitionen. Es ist schwierig, diesem Vorteil gleichzukommen, da der Markt für diese Dienste begrenzt ist. An dieser Stelle ist das im vorherigen Anhang beschriebene eLoran zu erwähnen.

Diese **neuen Technologien** unterscheiden sich von den anderen, in vorherigen Anhängen beschriebenen Technologien, indem sie

- als Teil des kombinierten Angebots oder des Sensorfusionsansatzes konzipiert sind;
- nicht nur die Ortung ermöglichen, sondern auch für eine effiziente Zeitverteilung sorgen, auch wenn einige eine Verbindung zur UTC benötigen;
- sich auf moderne Hardware- und Softwareentwicklungsverfahren stützen, die eine schnelle Entwicklung und drahtlose Updates ermöglichen. Dies bedeutet auch, dass alle Einheiten miteinander verbunden sind und es nach der Installation in der Regel keiner manuellen Eingriffe bedarf;
- über eigene Funktionen zur Überwachung, Meldung und Feststellung von Fehlern verfügen;
- sich durch verbesserte Cybersicherheit, Integration mit anderen Systemen, Nutzerfahrung und Flexibilität auszeichnen.

Detaillierte Informationen zu diesen Technologien, einschließlich einer Beschreibung der in diesem Abschnitt erörterten Algorithmen, finden sich in: [Position, navigation, and timing technologies in the 21st century: Integrated satellite navigation, sensor systems, and civil applications, Y. J. Morton, F. S. T. Van Diggelen, J. J. Spilker und B. W. Parkinson, Wiley/IEEE Press.](#)

5.3.1 White Rabbit (WR)

EEE-1588-2019 High Accuracy (HA) Profile, weithin bekannt als [White-Rabbit-Protokoll](#), ist ein von CERN entwickeltes **Zeit- und Frequenzverteilungsprotokoll**, bei dem PTP-Pakete mit der Frequenzbasis von Synchronous Ethernet (SyncE) kombiniert werden, um eine **Zeitübertragungsgenauigkeit im Sub-Nanosekundenbereich** zu erreichen. Die neue PTP-Version 2.1 enthält White Rabbit allgemein als Hochpräzisionsprofil.

Diese Technologie wird von Handelsunternehmen entwickelt, die Hardware und Software als Time-as-a-Service-Lösung anbieten. Sie bieten auch Überwachungs- und Resilienzfunktionen mit Schwerpunkt auf

- der nahtlosen Umschaltung zwischen den Zeitquellen bei einem Ausfall;
- der Erkennung und Auslösung eines Alarms, wenn eine Zeitquelle außerhalb der Spezifikation liegt, wodurch die Umschaltung auf eine gültige Zeitquelle ermöglicht wird.

5.3.1.1 Hauptmerkmale

Die Technologie erfordert mindestens zwei Zeitquellen (GNSS, Atomuhr, NMI usw.) im ununterbrochenen Glasfasernetz. Diese Quellen fungieren als gegenseitiges Backup, um bei Ausfall einer der Zeitquellen eine Zeit- und Frequenzübertragung mit einer Genauigkeit im Subnanosekunden- und Pikosekundenbereich zu gewährleisten. In Labortests der JRC wurde eine Genauigkeit von etwa 60–90 ps von Spitzenwert zu Spitzenwert nachgewiesen.

Bestehende WR-Netze wie das [GÉANT](#) wurden entwickelt, um wissenschaftliche Anstrengungen in ganz Europa zu unterstützen, wobei die Technologie von verschiedenen Forschungseinrichtungen wie CERN und GSI für die Hochenergiephysik (Teilchenbeschleuniger) und auch von verteilten Astronomieplattformen wie HISCORE, CTA, SKA, KM3Net usw. übernommen wurde. Weitere aktive Nutzer sind Rechenzentren, Telekommunikationsunternehmen und Finanzinstitute wie [Equinix](#) oder die [Deutsche Börse](#).

5.3.1.2 Stand und Optimierungspläne

Die **Technologie ist zwar ausgereift**, doch wird in zwei Bereichen weiter Forschung betrieben:

- Augmentation von WR zu einem [drahtlosen Überwachungsdienst](#). In diesem Modus überwacht und korrigiert das System andere Geräte mit einer driftenden Zeitquelle anhand ihres übertragenen Funksignals. Aus den Ergebnissen der [Tests des JRC](#) geht hervor, dass externe Geräte innerhalb einer Grenze von +/-200 Nanosekunden gehalten werden können.
- Arbeiten zur Nutzung von WR als drahtloser Überwachungsdienst, die als Option für die Bereitstellung vollständiger PNT-Dienste untersucht wird. Dies erfordert eine dichte Zeitinfrastruktur, die noch nicht vorhanden ist. Das [SuperGPS-Pilotprojekt der Technischen Universität Delft](#) dürfte auf der Grundlage einer erwarteten Netzzeitsynchronisation im 100-Pikosekunden-Bereich eine Positionsgenauigkeit im Zehn-Zentimeter-Bereich erreichen. Das Konzept könnte eine Positionsbestimmung im Freien und in Innenräumen ermöglichen. Es ist für intelligente Verkehrsanwendungen einschließlich dichter städtischer Gebiete und Tunnel für die Spurhaltung selbstfahrender Autos vorgesehen.

5.3.2 Zeitverteilung über Computernetze

Eine der Optionen für die **Zeitverteilung über Computernetze** ist der dynamische synchrone Übertragungsmodus (Dynamic synchronous Transfer Mode, DTM), der Zeitmultiplexverfahren und eine leitungsvermittelnde optische Netzwerktechnologie umfasst. Er wurde entwickelt, um eine garantierte Dienstqualität für Streaming-Videodienste zu bieten, kann aber auch für paketbasierte Dienste verwendet werden. Die DTM-Architektur wurde im Jahr 2001 vom Europäischen Institut für Telekommunikationsnormen (ETSI) genormt.

Die Technologie wird von mehreren Unternehmen zur Zeitverteilung über das Netz genutzt. Die Unternehmen verwenden DTM-Standards, obwohl einige ein zusätzliches Zeitprotokoll entwickelt haben, um die Integrität der übermittelten Zeitinformationen zu erhöhen (NTP STS). Die Netzüberwachung ermöglicht die Zeiterfassung und eine verbesserte Cybersicherheit. Insgesamt werden zwei Arten von Diensten geboten:

- Implementierung der Hardware und anschließende Wartung (Überwachung) des Netzes, während das Netz selbst vom Kunden verwaltet wird;
- Time-as-a-Service-Lösung, bei der das Unternehmen das Netz selbst verwaltet und dem Kunden eine schlüsselfertige Lösung bietet.

Es wird ein bestehendes Netz mit der einzigen zusätzlichen Hardware von Netzboxen (Knoten) verwendet, die die Zeit unter Verwendung des DTM an alle ihre Nachbarn weiterverteilen. Die Boxen können direkt oder über auf dem Markt verfügbare WAN-Verbindungen wie Glasfaser-, WDM-, MPLS- und Mikrowellenverbindungen miteinander verbunden werden. Das aktualisierte Netz bietet Redundanz und Netzresilienz gegenüber Pfad- oder Knotenausfällen. Diese Implementierung kann landesweit erfolgen, mit Atomuhr-Backups und einschließlich der Zeitquelle (traditionell GNSS, aber auch andere Mittel sind möglich).

5.3.2.1 Hauptmerkmale

Die **Genauigkeit hängt vom Jitter und der Asymmetrie des Netzes ab**. Der erste Faktor steht in direktem Zusammenhang mit der Intensität des übrigen, nicht damit zusammenhängenden Verkehrs. Dies kann durch eine Erhöhung der Paketrate abgemildert werden, um die Verzögerung häufiger zu prüfen, was eine garantierte Menge an Bandbreite erfordert. Die praktische Erfahrung zeigt, dass die Anforderung der richtigen Qualität vom MPLS-Netz die entscheidende und ausreichende Voraussetzung für eine Genauigkeit von unter einer Mikrosekunde ist, auch wenn dies mit hohen Kosten verbunden sein kann.

Der zweite Faktor **erfordert die Kalibrierung jedes neuen Pfads**. Dies wiederum erfordert eine sorgfältige Planung des Fehlerbudgets und ein ausgewogenes Verhältnis zwischen der Anzahl der installierten Knotenpunkte. Jeder Knoten ermöglicht die Überwachung und automatische Kalibrierung von sich überschneidenden Verbindungen. In Anbetracht der Kosten könnte der Aufwand für die Aufrechterhaltung der Genauigkeit auf die wichtigsten Backbones konzentriert werden, wobei andere Verbindungen nach dem Best-Effort-Prinzip verwaltet werden, solange diese Verbindungen nicht zu lang sind (was sowohl die Anzahl der möglichen Pfade als auch die Auswirkungen auf den Verkehr begrenzt). Die Ergebnisse der JRC-Tests deuten auch darauf hin, dass die Kalibrierung auf dem „Best-Effort-Netz“ unter Verwendung von GNSS als Zeitquelle nicht ausreicht, um einen zuverlässigen Dienst aufrechtzuerhalten.

5.3.2.2 Stand und Optimierungspläne

DTM-Standards sind für Streaming-Videodienste konzipiert, während die Zeitanwendung möglicherweise Hardware-Overheads erfordert, die ansonsten nicht notwendig sind. Es wäre logisch anzunehmen, dass in Zukunft vereinfachte Zeitprotokolle und Hardware verwendet werden könnten. Bei einigen der derzeitigen Angebote werden Mikrowellenverbindungen genutzt, was voraussichtlich zunehmen wird, wodurch die Infrastrukturkosten begrenzt werden.

Kommerzielle Netze, die auf dieser Technologie basieren, werden für mehr als 15 nationale oder regionale DVB-T-/DAB-Übertragungen eingesetzt. Die laufenden Entwicklungsmaßnahmen konzentrieren sich auf Upgrades in Bezug auf Größe, Schnittstellen und Skalierbarkeit, um ein spezielleres Produkt zu schaffen, das an einen bestimmten Markt angepasst ist und über verschiedene Arten von Verbindungen genutzt werden kann. Die Betreiber setzen unabhängig voneinander nicht-GNSS-gestützte Mittel zur Übertragung und Aufrechterhaltung der UTC-Zeitreferenz ein.

5.3.3 Pseudoliten

Bei Pseudoliten handelt es sich um eine **terrestrische Ortungstechnologie**, bei denen ein **Netz von bodengestützten Sendern** verwendet wird, die ein robustes Funkortungssignal innerhalb eines bestimmten Gebiets liefern.

Der früheste bekannte Prototyp war die Nachweisprüfung des GPS-Konzepts auf dem Yuma Proving Ground in den frühen 1970er Jahren. Die Signalübertragung erfolgte anhand terrestrischer Sender und Rover an Bord eines Luftfahrzeugs, also in umgekehrter Weise, wie das System heute verwendet wird. Der GPS Gold Code PRN 33-37 war der terrestrischen Nutzung vorbehalten, doch mit der zunehmenden Verfügbarkeit von Satelliten hat sich der Schwerpunkt von Verfügbarkeit und Genauigkeit auf Integrität und Bedenken hinsichtlich der Übertragung anderer Signale auf der GPS-Frequenz verlagert. Gegenwärtig kann bei Pseudoliten zwar immer noch der Gold Code verwendet werden, aber tendenziell werden andere Frequenzen genutzt, vor allem um mögliche künftige Beschränkungen zu vermeiden. Zwei aktuelle Beispiele sind die WLAN-Frequenzen und das spezielle Frequenzband 921,8845–927,0000 MHz mit unterschiedlicher Sendeleistung – 23 dBm für WLAN-Frequenzen und 30 Watt für das Frequenzband, für das spezielle Genehmigungen erforderlich sind.

Das Netz wird auf Nanosekunden-Ebene synchronisiert, um **Position und Zeit zu liefern**. Es gibt zwei Lösungen: die Verwendung präziser Oszillatoren (z. B. Atomuhren) oder die interne Synchronisierung (mittels Frequenzabgleich).

Pseudoliten werden üblicherweise entweder unabhängig oder als Augmentation für GNSS eingesetzt und basieren in der Regel auf GNSS-Hardware, sodass die GNSS-Empfänger-Hardware und -Korrelatoren auch für diese Technologie verwendet werden können. Aufgrund der unterschiedlichen Frequenzen handelt es sich bei integrierten Empfängern in der Regel de facto um zwei Empfänger.

5.3.3.1 Hauptmerkmale

Jede terrestrische Ortungstechnologie ist mit Mehrwegeeffekten, dem Nah-Fern-Effekt und der troposphärischen Verzögerung sowie anderen begrenzenden Faktoren konfrontiert. Zu den Minderungsmaßnahmen zur Erreichung einer Genauigkeit im Zentimeterbereich gehören das Zeitsprungverfahren bzw. der Code-Multiplex mit Mehrfachzugriff mit direkter Folge, räumlich und frequenzgetrennte Signale, ein spezielles Pulsierungsschema und eine mehrwegeresistente Antenne mit Strahlformung. Das Hardware-Design orientiert sich in der Regel an GNSS-Empfängern und umfasst OXCO-Uhren.

Die **Reichweite**, begrenzt durch die Horizontnähe, den Nah-Fern-Effekt und die bestehenden Frequenzvorschriften, beträgt 5–15 km. Für präzise Zeit- und Frequenzanwendungen muss nur ein Sender in Sichtweite sein, während für Positionierung und Navigation Signale von drei oder mehr Senderstandorten erforderlich sind. Die Dichte des Netzes hängt von der Sichtbarkeit ab, wobei eine unübersichtliche städtische Umgebung die größte Dichte erfordert. Ausgehend von einer typischen Sendereichweite in einer unübersichtlichen Vorstadtumgebung werden etwa vier Funkbaken je 100 km² (10 x 10 km) benötigt. Bei standortspezifischen Studien müssen die Nutzeranforderungen sowie die Signalverfügbarkeit berücksichtigt werden, wodurch sich die Anzahl der Sender erhöht.

Ein wichtiger Aspekt ist der geringe Höhenunterschied, der das System in der Ebene viel genauer macht als in der Horizontalen. Eine Lösung für beide Probleme könnte der Einsatz von Höhenplattformsystemen sein, die in Höhen von bis zu 20 km fliegen. Dabei handelt es sich um Sensorplattformen und Kommunikationsanbieter, die mithilfe von Sonnenenergie und Wind über einen längeren Zeitraum über ein bestimmtes Gebiet gleiten sollen. Energiebeschränkungen führen zur Begrenzung ihrer Nutzlast. Ihr Hauptzweck ist derzeit die schnelle Bereitstellung von Kommunikation mit minimaler Bodennetzinfrastruktur, z. B. zur Unterstützung von terrestrischen Netzen, die durch Katastrophen beschädigt wurden. Ihre Merkmale machen sie zu einer idealen Augmentation für ein Pseudolit-System, aber es würde Änderungen am Korrelator (Teil des Empfänger-Frontends) erfordern, um der Bewegung Rechnung zu tragen. Einige Hersteller setzen Drucksensoren ein, um das Höhenproblem zu lösen. Dabei handelt es sich um Lösungen für **codebasierte Systeme**, die eine Genauigkeit von 5–10 m bieten, nicht aber für die **trägerbasierte** Mehrdeutigkeitsauflösung mit einer **Genauigkeit im Millimeterbereich**.

Die JRC-Tests ergaben folgende Leistung:

- interne und externe (zu UTC) Zeitübertragung von 0,2–15 ns;

- kinematische 2D-Position im Freien und in Innenräumen mit Code von 10–15 m und mit Träger- und V-Ray-Antenne von 5–11 mm;
- drahtlose Multi-Hop-Zeitübertragung über 106 km mit einer Genauigkeit von 0,7 ns von Spitze zu Spitze.

5.3.3.2 *Stand und Optimierungspläne*

Diese Technologien sind erprobt und werden derzeit im Bergbau, bei Autotests, in der Innenraumlogistik sowie im Hafen- und Trockenhafenbetrieb eingesetzt. Angesichts ihrer Leistung wird die Technologie für intelligente Verkehrssysteme und vertikale Starts und Landungen in Betracht gezogen, eine Implementierung ist jedoch nicht erfolgt.

Der Schwerpunkt der Technologieentwicklung liegt auf der Korrelatorleistung und den Antennenmerkmalen. Angesichts der gestiegenen Liefermengen nannten einige Hersteller die Miniaturisierung als nächsten Schritt.

Eine weitere interessante Technologie ist die **Ultrabreitbandtechnik**, die zur Übertragung von Hochfrequenzimpulsen über geringe Entfernungen eingesetzt wird. Durch die Übertragung über eine große Bandbreite weist diese Technik eine gewisse Resilienz gegenüber Mehrwegeeffekten auf und eignet sich für die Positionsbestimmung in Innenräumen ohne direkte Sicht. Kommerzielle Einheiten wurden für Rettungsdienste demonstriert, doch leider wurde ihre kommerzielle Attraktivität durch zwei Faktoren eingeschränkt:

- [begrenzte Reichweite im Freien](#);
- [Zulassungsanforderungen](#).

Die Idee wurde vor Kurzem wieder aufgegriffen, als Geräte mit geringem Stromverbrauch auf den Markt kamen, die dennoch eine Genauigkeit im Dezimeterbereich bieten, und Apple hat diese Technologie kürzlich in seine Mobilgeräte eingebaut. Der allgemeine Trend scheint jedoch dahin zu gehen, dass die Nutzung der Ultrabreitbandtechnik auf Innenräume und mobile Geräte beschränkt wird.

5.3.4 PNT auf der Grundlage von 5G und Mobilfunknetzen

Im Jahr 2012 startete der Funksektor der Internationalen Fernmeldeunion (ITU-R) das [Programm „IMT for 2020 and Beyond“](#) (Internationale Mobiltelekommunikation (IMT) für 2020 und darüber hinaus), mit dem Ziel, die fünfte Generation von Mobilkommunikationssystemen – gemeinhin als 5G bezeichnet – zu definieren. Im Juni 2016 veröffentlichte die Arbeitsgruppe 5D der ITU-R einen Zeitplan für IMT-2020 (siehe [Figure 55](#)). Seitdem haben die Interessenträger aus Industrie und Wissenschaft im Rahmen verschiedener internationaler Foren (z. B. 3GPP, DECT-Forum, Korea IMT-2020, China IMT-2020 usw.) zusammengearbeitet.

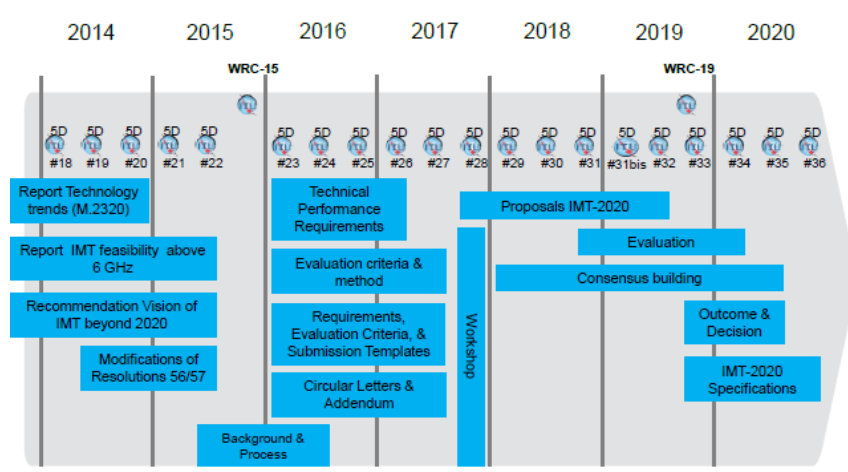


Abbildung 55 – Zeitplan und Verfahren für IMT-2020 (Quelle: ITU-R)

Von Oktober 2017 bis Juni 2019 wurden Kandidatentechnologien vorgelegt, und vier Technologien wurden offiziell als den IMT-2020-Spezifikationen entsprechend eingestuft:

- 3GPP 5G-SRIT (Set of Radio Interface Technologies) und 3GPP 5G-RIT (Radio Interface Technology) stehen für das bekannte eigenständige bzw. nicht eigenständige 5G-Bereitstellungsmodell der Mobilfunkkommunikationstechnologie des Partnerschaftsprojekts der dritten Generation (3GPP).
- 5Gi wurde von der Telecommunications Standards Development Society, India (TSDSI) entwickelt. 5Gi ist eine aktualisierte Version von 3GPP 5G-RIT, die in erster Linie zur Verbesserung der Abdeckung in ländlichen Gebieten entwickelt wurde.
- DECT 5G-SRIT wurde als nicht zellulare und autonome, dezentrale Technologie zur Unterstützung einer Reihe von Anwendungsfällen konzipiert, von drahtloser Telefonie und Audio-Streaming bis hin zu industriellen Internet-of-Things-Anwendungen, insbesondere im Rahmen von „Smart City“ (intelligente Städte).

Von den vier oben genannten Technologien ist **3GPP 5G (sowohl im eigenständigen als auch im nicht eigenständigen Betrieb)** weltweit **die beliebteste und am weitesten verbreitete** IMT-2020-Technologie.

Die Netzinfrastruktur zur Übertragung von Sprache und Daten zwischen Endnutzern und dem Internet wird gemeinhin als „Funkzugangsnetz“, „Transportnetz“ und „Kernnetz“ bezeichnet. **Die Unterstützung des Nutzerstandorts in der Netzinfrastruktur ist eine wichtige Voraussetzung für den normalen Betrieb von Mobilfunknetzen**, insbesondere während des Funkrufverfahrens (Empfang eines eingehenden Anrufs/Datenstroms) und des Handover-Verfahrens (Übergang zwischen benachbarten Basisstationen aufgrund der Nutzermobilität). Da derzeit mehr mobile Geräte genutzt werden, als es Menschen auf der Welt gibt, sind die Kommunikations- und Positionsbestimmungsfunktionen kommerzieller Mobilfunknetze und -geräte sehr wichtig.

5.3.4.1 Hauptmerkmale

[Figure 56](#) zeigt **die Positionsbestimmungsarchitektur für 5G New Radio (NR)**. Der Prozess der Positionsbestimmung beginnt, wenn ein externer Client eine Anfrage zur Ermittlung der Position der Nutzerausrüstung (user equipment, **UE**) sendet. Eine Standortverwaltungsfunktion (location management function, **LMF**) verarbeitet die Anfrage und empfängt Messungen und Unterstützungsinformationen vom Next Generation Radio Access Network (**NG-RAN**) und der UE. Die LMF schätzt die Position der UE und sendet die

geschätzte Position an den Client, der die Anfrage gesendet hat. Anders als bei 4G kann die Position der UE auch von der UE selbst und nicht nur vom Netz geschätzt werden. Ein weiteres interessantes Merkmal von 5G ist, dass die Anfrage zur Positionsbestimmung vom LCS-Client ausgeht und dort abgeschlossen wird und dass der Client der UE entsprechen kann oder nicht.

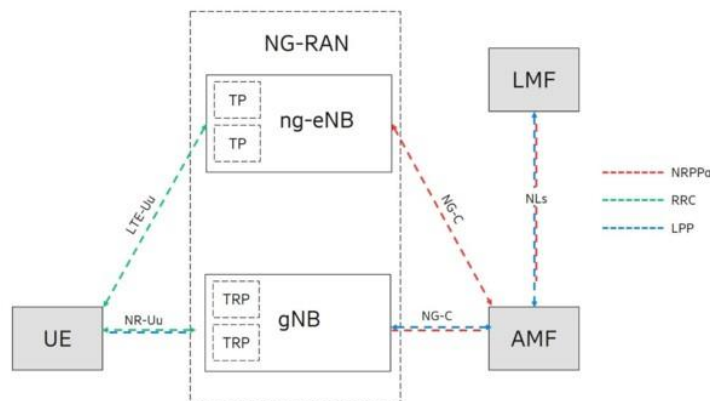


Abbildung 56 – 5G-Positionierungsarchitektur (Quelle: Ericsson)

Die grundlegendste Schätzung des Nutzerstandorts erfolgt durch die Identifizierung der Basisstation, die das Mobiltelefon versorgt, und die Kenntnis ihres Standorts und des Abdeckungsgebiets. Zur Verbesserung der Leistung ist es möglich, das Signal (die Entfernung) von drei oder mehr benachbarten Basisstationen zur Triangulation zu verwenden. LTE-Netze unterstützen auch die Positionsbestimmung auf der Grundlage der beobachteten Ankunftszeitdifferenz – ein ähnlicher Ansatz wie beim im vorherigen Abschnitt beschriebenen eLoran.

5.3.4.2 Stand und Optimierungspläne

Mit der **Weiterentwicklung** der Mobilfunknetze – **kleinere Zellen, höhere Datenraten, höhere Frequenzen und schmalere Strahlen** – wird sich die Genauigkeit der Positionsbestimmungslösung erhöhen. Die erste Version der 5G-Netze ist in Europa bereits in Betrieb, insbesondere das nicht eigenständige Netz, das im Wesentlichen auf einem alten 4G-LTE-Kernnetz aufbaut. Die Möglichkeiten des nicht eigenständigen Netzes sind im Vergleich zu einem reinen eigenständigen 5G-Netz beschränkt. So unterstützt das nicht eigenständige Netz beispielsweise nur die LTE-Ortung und nicht die native 5G-NR-Ortung. Diese Plattform ermöglicht den Einsatz einer Hybridlösung, bei der GNSS mit zeitsynchronisierten 5G-Signalen kombiniert werden, um die von der FCC im Rahmen von E-911 vorgeschriebene Ortungsgenauigkeit zu erfüllen.

Die eigenständige Technologie ist ausgereifter, und technologische Fortschritte werden es ermöglichen, in vollem Umfang von den 5G-Funktionen zu profitieren, z. B. von der großen Bandbreite für eine bessere Zeitauflösung, neuen Frequenzbändern im mmWave-Bereich und Massive MIMO für präzise Winkelmessungen. Immer mehr 5G-Testbetten, die auf eigenständiger Technologie basieren, sind weltweit in Betrieb. So stellte Qualcomm Technologies auf dem Mobile World Congress 2022 die [präzise Positionierung mit dem mmWave-Spektrum](#) für Innen- und Außenanwendungen wie intelligente Fabriken vor. [Rohde & Schwarz demonstrierten ein GNSS-Backup-System auf Grundlage der 5G-Broadcast-Technologie](#)¹⁰. Die Positionsreferenzsignale werden zusammen mit Informationen über den Standort der Sender übertragen. Eine solche terrestrische Infrastruktur mit 5G-Sendetürmen dient als GNSS-Backup. Diese Lösung liefert das gleiche Signal an eine Vielzahl von mobilen und stationären Empfängern wie Smartphones, Tablets, Personenkraftwagen und Wearables gleichzeitig und erreicht eine Genauigkeit im Meterbereich. Darüber hinaus können die von 5G-Sendern ausgestrahlten Inhalte mit RTK- und PPP-Korrekturen verbessert werden, um eine Genauigkeit im Zentimeterbereich zu erzielen.

¹⁰ 5G Broadcast basiert auf der 3GPP-Technologie, die für 4G- und 5G-Mobilfunknetze verwendet wird, und baut auf bestehenden Rundfunktechnologien (wie Radio und Fernsehen) auf. Es ermöglicht den mobilen Empfang von audiovisuellen Inhalten in einem hocheffizienten Übertragungsmodus.

5.3.5 Ranging Mode (R-Mode)

Ranging Mode (R-Mode) ist ein terrestrisches Ortungssystem, das die **Frequenzbänder der bestehenden Seefunkinfrastruktur** für die **Bereitstellung von Zeitsignalen nutzt**. Für eine R-Mode-gestützte Ortung müssen Signale von mindestens drei unabhängigen Sendern empfangen werden. Gegenwärtig wird bei R-Mode-Testbetten in Europa, Asien und Nordamerika Folgendes genutzt:

- das Mittelfrequenzband (MF) des Seefunksystems oder
- die maritimen UKW-Bänder des Datenaustausch-Systems auf UKW-Kanälen (VDES).

Das Funknavigationssystem besteht aus **drei Komponenten**:

- R-Mode-Sender, der die bestehende Seefunkinfrastruktur nutzt, die so aufgerüstet wird, dass neben ihrem bestehenden Dienst auch modifizierte Signale (Mittelfrequenzband) oder spezielle Nachrichten (VDES) übertragen werden können (IALA-Richtlinie 1158);
- R-Mode-Überwachungseinrichtungen, die im Nah- oder Fernfeld implementiert sind, in den Abdeckungsgebieten der Senderseiten. Sie überwachen die Leistung und Verfügbarkeit des R-Mode-Dienstes und generieren zusätzliche Informationen, um die Leistung des R-Mode-Dienstes zu erhöhen;
- Steuerungs- und Kontrollzentrum, das noch nicht in die Testbetten implementiert ist.



Abbildung 57 – Ranging Mode (Quelle: [R-Mode Baltic](#))

Das R-Mode-System kann auch eine kleine Region wie einen Hafen unterstützen und als Backup bei der Hafenzufahrt dienen. Dafür bedarf es mindestens dreier Sender, und der R-Mode-Dienst wird im gemeinsamen sich überschneidenden Abdeckungsbereich verfügbar sein. Zur Augmentation des R-Mode-Abdeckungsbereichs müssen zusätzliche Mehrfrequenz- und VDES-Sender R-Mode übertragen. Die Mehrfrequenz und die VDES-Stationen weisen unterschiedliche Sendebereiche und Eigenschaften auf. Eine Kombination ist ideal, um davon zu profitieren und eine gute Geometrie zu erreichen.

Im Allgemeinen sollte eine EU-weite oder weltweite Implementierung darauf abzielen, Schiffe als Backup zu unterstützen, wenn sie sich während ihrer Fahrt von Liegeplatz zu Liegeplatz in Küstengebieten befinden, ausgenommen in Küstennähe. In diesem Fall ist die Zusammenarbeit der R-Mode-Diensteanbieter der verschiedenen Länder erforderlich, damit Nutzer im Seeverkehr die Signale verschiedener Anbieter gleichzeitig nutzen können.

Eine großmaßstäbliche Implementierung wäre für die Nutzer im Seeverkehr vor allem in kritischen Phasen der Fahrt von Vorteil. Damit das volle Potenzial von R-Mode zur Geltung kommen kann, müssten das R-Mode-System und die entsprechenden Dienste der verschiedenen nationalen Seeverkehrsdiensteanbieter harmonisiert werden, um eine R-Mode-Unterstützung in Gebieten zwischen den Ländern zu ermöglichen. Ein Rahmen von Normen und Leitlinien für R-Mode sowie eine internationale R-Mode-Koordinierungsgruppe wären dann erforderlich.

5.3.5.1 Hauptmerkmale

Theoretische Analysen, Simulationen und Messkampagnen zeigen, dass das System in Abhängigkeit von der Entfernung, der Signalstärke (oder dem Signal-Rausch-Verhältnis) und der Geometrie der Standorte von Mobilfunknutzern und Sendern eine **Genauigkeit bei der Positionsbestimmung** von deutlich **besser als 100 m** bieten kann, auch wenn die Effizienz nachts abnimmt. Durch Optimierungen des Übertragungsnetzes könnte diese Leistung

erhöht werden, aber es ist nicht klar, ob sich eine Genauigkeit von 10 m erreichen lässt (es ist zu beachten, dass die vorgeschlagene Leistung bei der horizontalen Positionsbestimmung für ein GNSS-Backup 10 m für Hafenzufahrten und eingeschränkte Gewässer bzw. 100 m für Küstengewässer beträgt (siehe [IALA-Empfehlung R-129 „GNSS Vulnerability and Mitigation Measures“](#) (GNSS-Anfälligkeit und Minderungsmaßnahmen)).

Daher ist R-Mode für die **Abdeckung von Küstengewässern und eingeschränkten Gewässern** konzipiert, wo das Risiko einer Beeinträchtigung der GNSS-Signale durch absichtliche und unbeabsichtigte Störungen am größten ist. Im Gegensatz zu GNSS mit globaler Abdeckung kann das R-Mode-System aufgrund der begrenzten Reichweite der Mehrfrequenz- und UKW-Signale keine globale Abdeckung erreichen. Für das mehrfrequenzbasierte R-Mode ist das Problem der Himmelswellenstörungen, durch die die Systemleistung nachts beeinträchtigt wird, bisher ungelöst. Eine Herausforderung für den VDES von R-Mode ist die Kanallast, die durch die Anzahl der Sender in einem Bereich verursacht wird. Außerdem gilt es, die Kollokation zwischen dem VDES von R-Mode und bestehenden AIS-Anlagen zu lösen.

5.3.5.2 *Stand und Optimierungspläne*

Das R-Mode-System befindet sich in einem **frühen Stadium der Entwicklung von Grundlagentechnologie** und Hardware in mehreren permanenten oder temporären Testbetten in Europa, Nordamerika und Asien. Im gleichen Rahmen wurden Prototypen für R-Mode-Sendegeräte entwickelt, die in den R-Mode-Testbetten eingesetzt werden, die derzeit einen TRL von 4 bis 5 haben. Auf der Schiffsseite werden die Aktivitäten mit Forschungsplattformen durchgeführt. Das Design der R-Mode-Empfänger steht, doch bedarf es noch weiterer Aktivitäten, um eine R-Mode-gestützte Ortung zu ermöglichen.

Wie GNSS kann R-Mode absolute Positionen liefern, allerdings mit geringerer Genauigkeit und einer räumlichen Verfügbarkeit, die auf eine Entfernung von bis zu **250 km von der Küste** begrenzt ist. R-Mode soll als Kandidat für die gewünschte terrestrische Komponente dienen, die im „IMO Performance Standard for Multi-System Shipborne Radionavigation Receivers“ (IMO-Leistungsnorm für schiffsgestützte Mehrsystem-Funknavigationsempfänger“ (IMO MSC.401 in der geänderten Fassung) beschrieben ist.

In Bezug auf die Synchronisierung ist R-Mode derzeit auf GNSS angewiesen. In zukünftigen Plänen wird die Einbeziehung von Atomuhren als kurzfristige Überbrückung und möglicherweise alternative Zeitquelle erwogen, auch wenn diese Implementierung eine Herausforderung darstellt.

Die **Normung von R-Mode läuft**. Mit der Anerkennung von Anforderungen für R-Mode im neuen VDES-Standard (Empfehlung des ITU-R M.2092-1) und der IALA-Leitlinie 1158 zum VDES des R-Mode sind erste Dokumente verfügbar. Beim IALA wird weiter an Leitlinien für die Implementierung von R-Mode mit Übertragungen im Mehrfrequenzband und UKW-Frequenzband gearbeitet. Außerdem werden derzeit Navigationsnachrichten entwickelt, die Teil der RTCM-Datennachrichten werden sollen. Einem international vereinbarten Fahrplan zufolge wird die Normung voraussichtlich nicht vor 2027 abgeschlossen sein.

5.3.6 Sichtnavigation

Die Sichtnavigation (oder bildgestützte Navigation) gewinnt immer mehr an Bedeutung, da Hardware immer billiger wird (Mobiltelefonkameras kosten weniger als 1 EUR) und die Algorithmen immer ausgereifter werden. In diesem Abschnitt werden sowohl die **bild-** als auch die **LIDAR-gestützte Navigation** behandelt, da beide sehr häufig zum Einsatz kommen – zuerst in mobilen Geräten und dann in selbstfahrenden Autos. Diese Technik funktioniert zwar in **Innenräumen wie auch im Freien** sehr gut, doch liefert sie **keine Zeitinformationen**, sodass sie als Teil der Sensorfusion zum Einsatz kommen dürfte, wahrscheinlich in Kombination mit GNSS und IMU.

5.3.6.1 Hauptmerkmale

Ein **Bild** ist eine 2D-Projektion einer 3D-Welt, was bedeutet, dass im Gegensatz zu dem später erörterten LIDAR-Fall keine Tiefeninformationen vorhanden sind. Um die fehlende Dimension zu kompensieren, muss derselbe Punkt auf mehreren Bildern identifiziert werden (wodurch eine bewegliche Grundlinie mit bekannter Länge entsteht), wie in [Figure 58](#) gezeigt.

Die Identifizierung und der Abgleich der gleichen Merkmale von Bild zu Bild, unter Berücksichtigung von Lichtveränderungen und Kameradynamik, stellen die größte Herausforderung für diese Art der Navigation dar. Dies kann ein Problem für den Luftverkehr sein. Im terrestrischen und Fußgänger-Szenario wird das Problem durch die begrenzte Bewegung und Drehung in der Höhenachse vereinfacht, was nachweislich zuverlässige Ergebnisse bringt. Wird ein einfacher Bewegungsalgorithmus verwendet, kann de facto jedes gut beleuchtete Merkmal oder sogar ein sich wiederholendes Muster verwendet werden. Im Luftverkehr sind IMU-Informationen von wesentlicher Bedeutung.

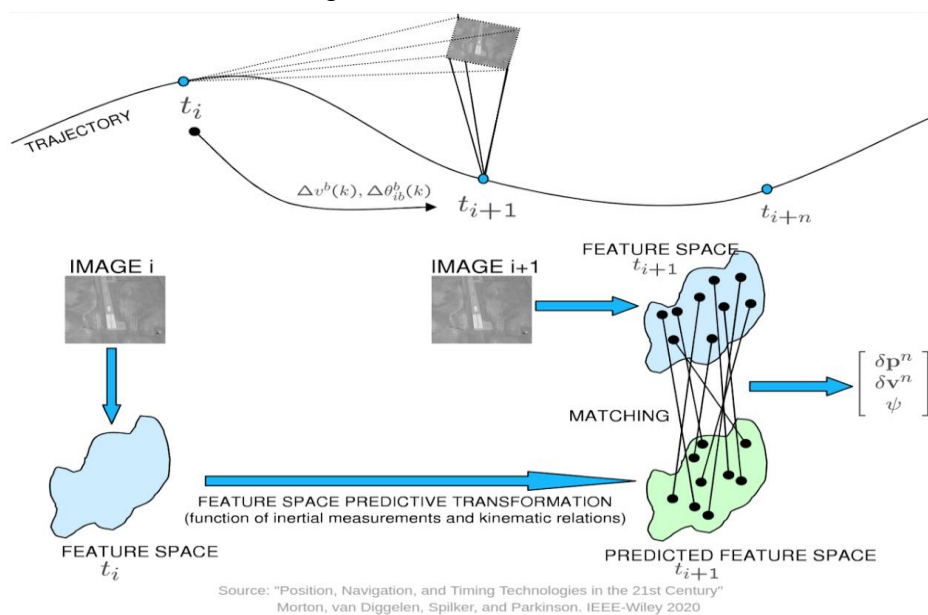


Abbildung 58 – Überblick über bildgestützte Sensorfusion mit IMU (Quelle: pnt21book.com)

LIDAR ist eine Methode zur Bestimmung der Entfernung zu einem Objekt durch Messung der Zeit, die das reflektierte Licht benötigt, um zum Empfänger zurückzukehren. Sie wird häufig zur Erstellung hochauflösender Modelle und Karten verwendet. Sie **kann auch für die Navigation verwendet werden**, wobei es zwei Ansätze gibt:

- merkmalsloser Ansatz, bei dem die räumliche Verteilung der Messungen (Punktwolke) direkt zum Vergleich mit vorhandenen Daten verwendet wird. Die algorithmische Herausforderung besteht hier in der Teilauswahl der Punkte für den Abgleich (Identifizierung des Überlagerungsbereichs). Die Auswahl wird dann für die beste Übereinstimmung in den Referenzdaten verwendet und optimiert (gedreht), um die Kostenfunktion (Zuordnungsfehler) zu minimieren. Die Identifizierung des zu vergleichenden Bereichs ist entscheidend für die Optimierung der Suche. Die anfänglich bekannte Position und Ausrichtung sind sehr nützlich;
- merkmalsbasierter Ansatz, bei dem zunächst Merkmale identifiziert und aus den Daten (Punktwolke) bestimmt werden. Die Navigation basiert dann auf ihrer Identifizierung und Verwendung für die

Positionsschätzung. Bei diesen Merkmalen handelt es sich in der Regel um sehr viel einfachere Merkmale als bei beschreibenden, vom Menschen geschaffenen Objekten und meist um Punkte oder einfache geometrische Merkmale. Nach der Extraktion kann die wahrgenommene Bewegung zwischen ihnen und dem Scanner (Nutzer) verwendet werden, um die Bewegung, Ausrichtung und Position zu schätzen.

5.3.6.2 Stand und Optimierungspläne

In der **LIDAR-gestützten Navigation** ist eine unterstützende Mechanisierung (Integration) mit Kilometerzähler oder IMU möglich. Dies wird häufig bei der [simultanen Positionsbestimmung und Kartierung \(SLAM\)](#) eingesetzt, wenn die gesammelten Daten zur Verbesserung bestehender Karten verwendet werden können. LIDAR kann für die Fahrzeug- und Fußgängernavigation verwendet werden. **Optische Verfahren** weisen ähnliche Eigenschaften auf.

In beiden Fällen ist ein rekursiver SLAM-Algorithmus aufgrund seiner Geschwindigkeit und Effizienz sehr beliebt. Die Position wird relativ geschätzt, doch wenn einige der Merkmale bekannte Positionen haben, kann die Objektbewegung auch auf den globalen Bezugsrahmen abgebildet werden. Wenn derselbe Standort erneut aufgesucht wird (Schleife geschlossen), kann die Positionsgenauigkeit geschätzt und die vorherige Schätzung bei Bedarf korrigiert werden.

Ein alternativer Ansatz ist der [Partikelfilter](#), bei dem ein probabilistischer Ansatz zur Schätzung der Position verfolgt wird, während sich das Objekt bewegt, bis die Position mit ausreichender Sicherheit bestimmt werden kann.

In Bezug auf die Sichtnavigation gibt es mehrere Erwägungen:

- Da eine große Menge an Daten anfällt, werden die Daten zunächst reduziert, indem bestimmte Bereiche, die von Interesse sind, durch Unterstichprobenentnahme ermittelt werden. Dazu gehört auch die Beseitigung von Störungen, z. B. sich bewegende Fahrzeuge oder Fußgänger. Zweitens verwenden die meisten Algorithmen Iterationen, um die lokalen Minima zu erreichen.
- Bei Entfernungs- und Winkelmessungen ist die Beobachtungsunsicherheit anders zu beurteilen. Bei der LIDAR hängt dies vom Winkel und der reflektierten Oberfläche ab, bei einem Bild von den Linsen und den Lichtverhältnissen.
- Die Integration mit anderen Sensoren erfordert eine sorgfältige Vorbereitung, einschließlich der Schätzung des Hebelarms und Stabilität.

Eine Anwendung dieser Prinzipien im Weltraum sind [Sternrichtungsgeber](#) und [Sonnenrichtungsgeber](#). Beide Geräte nutzen die **astronomische Navigation**, um bekannte Ansichten der Treppen mit Fotozellen oder einer Kamera zu vergleichen. Die Methode erfordert eine klare Sicht auf die Sterne – für terrestrische Nutzer der Nachthimmel – und wird vor allem von weltraumgestützten Plattformen verwendet, die in Kombination mit IMU sowohl Position als auch Ausrichtung liefern.

Bei praktisch allen Weltraummissionen kommt Technologie zum Einsatz. In der Regel werden bei einer Mission sowohl Stern- als auch Sonnenrichtungsgeber verwendet. Zunächst wird der Sonnenrichtungsgeber für die grobe Lagebestimmung verwendet, in der Regel nach der Trennung des Raumfahrzeugs von der Trägerrakete. Der Sternrichtungsgeber wird für die präzise Lagebestimmung und die IMU-Messung für den Sensorfusionsansatz verwendet, um eine gleichmäßige Ausrichtung und Position zu erhalten.

Die Genauigkeit des Sonnenrichtungsgebers liegt bei $3-0,005^\circ$ und die des Sternrichtungsgebers bei $0,01-0,0003^\circ$. Bei dem Sensor kann es sich entweder um einen Tracker oder einen Scanner handeln, der für schnell rotierende (sich drehende) Raumfahrzeuge geeignet ist. Die Methode erfordert eine Vorfilterung, um Rauschen wie Streulicht oder Reflexionen zu entfernen, eine Blendung durch Sonne oder Mond zu vermeiden und eine Stabilisierung der Messung zu erreichen (wofür IMU verwendet werden).

Aufgrund der höheren Qualität und der geringeren Größe der Komponenten wird die vereinfachte Technologie für [LEO-Systeme](#) verwendet und für CubeSat-Missionen untersucht. Neben kommerziellen Angeboten gibt es auch einen [Open-Source-Algorithmus](#), der für die CubeSat-Plattformen verwendet wird. Die Messungen werden im [astronomischen Bezugssystem](#) durchgeführt, was eine Umwandlung in den ITRF für GNSS o. ä. erfordert.

5.3.7 Mobilfunkgestützte Navigation

Das Smartphone ist heute die wichtigste Navigationsquelle und ersetzt die speziellen Navigationsgeräte von TomTom oder Garmin sowie die Papierkarten. Im Jahr 2020 gab es mehr als [vier Milliarden GNSS-gestützte Smartphones](#). Daher ist es interessant, dass die GNSS-Kapazität von Smartphones fast zufällig entstanden ist. [Im Jahr 1999 hat die FCC im Rahmen des von E-911 eine Positionsanforderung vorgeschrieben](#). Die Triangulation über das Mobilfunknetz war nicht genau genug. Stattdessen wurde die Ortung über einen GPS-Chipsatz vorgeschlagen.

Das **Mobiltelefon ist nicht als GNSS-/GPS-Empfänger gedacht**. Es verfügt über eine einfache Inverted-F-Monopolantenne, also eine linear polarisierte Antenne mit geringem Antennengewinn und geringer Rauschunterdrückung. Es weist eine schlechte Taktqualität auf und ist aufgrund der Anordnung der Komponenten anfällig für Selbststörungen. Warum das wichtig ist? Die GNSS-Position basiert auf der Zeitdifferenz zwischen den Satelliten (weswegen ein stabiler lokaler Oszillator wichtig ist), und es wird ein Signal mit sehr geringer Leistung verwendet, das häufig unterhalb der Rauschgrenze liegt (weswegen gute Antennen wichtig sind). An sich **sind Smartphones als GNSS-Empfänger wenig leistungsfähig**.

Das **Assisted Global Positioning System (A-GPS)** beseitigt diese Mängel, indem die Empfindlichkeit und die Zeit bis zur ersten Positionsbestimmung (TTFF) erhöht werden, wobei die unterstützten Daten den Frequenzsuchraum, nicht aber den Verzögerungsraum reduzieren. Dadurch ändert sich auch die Chipsatz-Architektur, die auf einer massiven parallelen Suchfunktion beruht. Aufgrund der begrenzten Chip-Speichergröße und der Notwendigkeit, alle parallelen Hypothesen zu minimieren, sind viele Chipsätze darauf ausgelegt, zuerst nach Signalen von einer GNSS-Konstellation (in der Regel GPS mit kurzen Codes) und suchen. Erst wenn diese Daten erfasst sind, wird zeitlich begrenzt nach anderen GNSS-Signalen mit längeren Codes gesucht. Bei Galileo verfolgt der Chipsatz die Galileo-Datenkomponente (E1B-OS-NMA) nur zu Beginn der Standortanforderung; sobald die Daten vorliegen, beginnt der Chipsatz mit der Verfolgung des Pilotcodes. Technische Einzelheiten finden sich in [F. van Diggelen, A-GPS: Assisted GPS, GNSS, and SBAS. Artech House, 2009](#).

5.3.7.1 Hauptmerkmale

Die GNSS-Kapazität wird durch die Architektur des A-GPS (A-GNSS) bereitgestellt. Darüber hinaus sind zwei aktuelle Fortschritte erwähnenswert, die beide aus der Android-Perspektive beschrieben werden, da der Ansatz von Apple nicht gut dokumentiert ist.

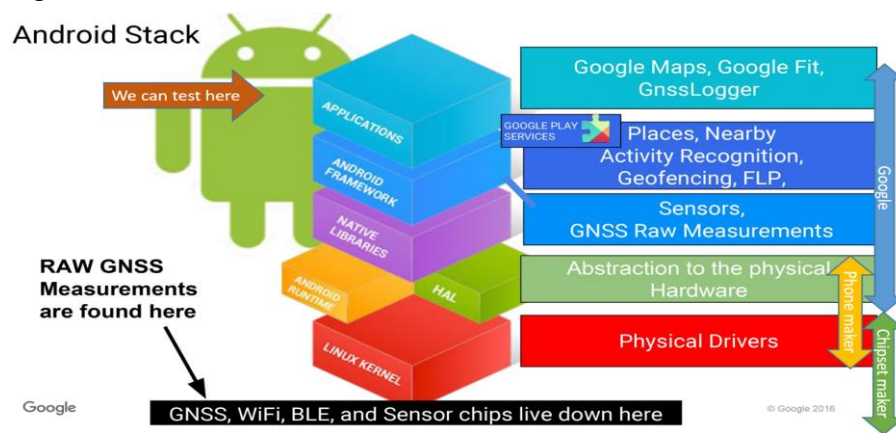


Abbildung 59 – Überblick über die Kontrolle der Android-Interessenträger über den Stapel, angenommen nach Google (Quelle: Google)

Google-Play-Dienste für Android

Das moderne Telefon ist ein sehr komplexes Ökosystem, das mehrere Sensoren enthält, einschließlich Trägheitssensoren sowie WLAN- und Bluetooth-Sensoren, und vom Betriebssystem gesteuert wird. Dies wird von Android mittels Verkapselung der Standortdienst-Anwendungsprogrammierschnittstelle (application programming interface, API) von Google Play genutzt. Die Standortdienst-API kann alles – von Geofencing über Aktivitätsüberwachung bis hin zur Identifizierung von nahe gelegenen Orten. Wichtigstes Element ist der Fused Location Provider (FLP), der eine intelligente Standortbestimmung ermöglicht und den Akku schont. Dies bietet

die Möglichkeit zur Navigation in Innenräumen, indem die Stärke des nächstgelegenen WLAN-Zugangspunkts und Innenraumkarten verwendet werden, um den Standort des Nutzers zu bestimmen („Fingerprint“-Verfahren). In Kombination mit maschinellem Lernen wird dies vom [Android Emergency Location Service](#) genutzt. Dieser Dienst wird aktiviert, wenn ein Notruf abgesetzt wird, und übermittelt den Rettungsdiensten den genauen Standort, einschließlich der Höhe und des richtigen Stockwerks. Dieser Dienst erfordert gesonderte Vereinbarungen mit den Telefonbetreibern und ist in einigen EU-Ländern verfügbar.

Raw-Messungen

Seit 2016 bietet die [Standort-API von Android](#) direkten Zugang zum GNSS-Chipsatz (unter Umgehung einiger Schichten des Stapels). Diese **GNSS-Beobachtungen** werden als **Raw-Messungen** bezeichnet. Der A-GPS-gestützte Chipsatz des Telefons erfasst die Beobachtungen, noch ehe die Zeit genau synchronisiert ist, was zu Beobachtungen in einem größeren Format führt als bei den typischen GNSS-Empfängern.

Der Zugang zu den Raw-Messungen öffnet die Tür zu fortschrittlicheren GNSS-Verarbeitungstechniken, die bisher professionelleren GNSS-Empfängern vorbehalten waren. Es können neue Signale (Frequenzen E1/L1 und E5/L5), differenzielle Beobachtungen und andere fortschrittliche Algorithmen verwendet werden. Diese bilden die Grundlage für Anwendungen wie gesicherte Zeit, atmosphärische Überwachung oder Störungserkennung.

Obwohl das **Mobiltelefon verschiedene Einschränkungen** aufweist, darunter die unzureichende Handhabung von Dynamik oder Mehrwegeeffekten, kann es **fortschrittlichere Algorithmen** verwenden, z. B. differenzielle Lösungen. Bei einer Präsentation der [EUSPA-Taskforce „Raw-Messungen“](#) wurden die Ergebnisse der Nachbearbeitung von Daten aufgezeigt, die beim langsamen Gehen über die GOOGLE-Buchstaben erhoben wurden. Von links nach rechts ist der einfache Algorithmus für Raw-Messungen zu sehen, dann ein Kalman-Filter-Algorithmus mit Pseudoentfernung, der dem FLP ähnelt. Das letzte Bild zeigt die Verbesserung durch die Verwendung der Trägerphase, was beim FLP nicht möglich ist. Es sei darauf hingewiesen, dass es zum gegenwärtigen Zeitpunkt schwierig ist, den FLP leistungsmäßig zu übertreffen, es sei denn in einer offenen Umgebung.

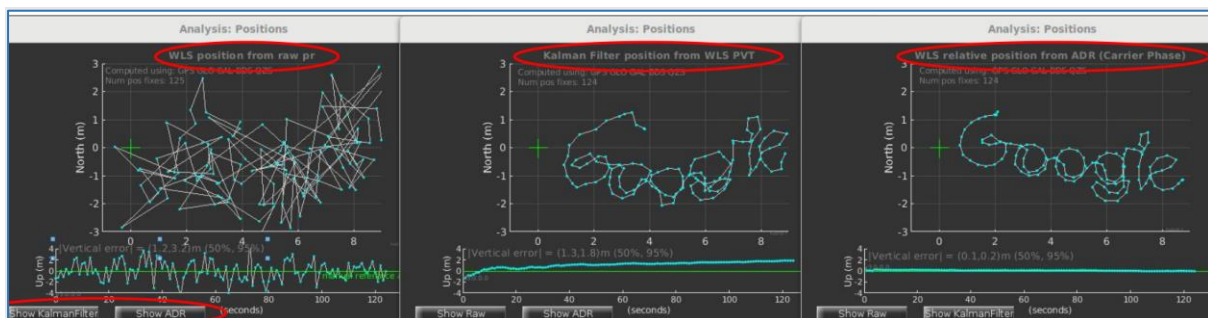


Abbildung 60 – Verbesserung der Position durch Raw-Messungen (Quelle: Frank van Diggelen)

Weitere Einzelheiten sind dem [Weißbuch der EUSPA „Using GNSS Raw Measurements on Android Devices“](#) (Verwendung von GNSS-Raw-Messungen auf Android-Geräten) zu entnehmen.

5.3.7.2 Stand und Optimierungspläne

[Ein neuer, von Google vorgeschlagener Algorithmus, der für Fußgänger gedacht ist](#), soll dem Problem von Mehrwegeeffekten entgegenwirken. Dabei wird zunächst der Nutzerstandort geschätzt, wobei im Idealfall anhand fotorealistischer Gebäudemodelle erkannt wird, auf welcher Straßenseite sich der Nutzer befindet. Anschließend werden diese Informationen für eine direkte Verbesserung der GNSS-Position zurück an den Chipsatz geleitet. Die Datenmodelle decken alle europäischen Städte und den größten Teil der Welt ab. Der Algorithmus konzentriert sich auf die Pixel-Serie von Google (beginnend mit der 5G-Version von Modell 5), wobei eine Ausweitung auf andere Android-Telefone geplant ist.

Die API-Ebene kommuniziert nun direkt mit dem GNSS-Chipsatz, indem Korrekturen bereitgestellt werden, und der Android-Stapel ist nunmehr ein bidirektionaler Kommunikationskanal. Kurz gesagt: **Mobiltelefone können als moderne GNSS-Empfänger genutzt werden.**

5.3.8 IMU-Koppelnavigation

Bei der [Koppelnavigation](#) wird die Position eines sich bewegenden Objekts anhand einer bestimmten Position und der geschätzten Geschwindigkeit, Kursrichtung und verstrichenen Zeit berechnet. Es gibt zwar mehrere Technologien, bei denen diese Schätzung genutzt wird, im Folgenden liegt der Fokus jedoch auf den in der Luftfahrt und im Verkehr üblichen Trägheitssystemen.

Eine [Trägheitsplattform \(IMU\)](#) ist ein elektronisches Gerät zur Messung und Meldung der spezifischen Kraft eines Körpers, der Winkelgeschwindigkeit und bisweilen auch der Ausrichtung des Körpers. IMU bestehen aus drei [Gyroskopen](#) und drei [Beschleunigungsmessern](#) und umfassen in der Regel auch [Magnetometer](#). Sie dienen der Bestimmung der dreiachsigen Ausrichtung des sich bewegenden Körpers. Um die absolute Position in Bezug auf den Bezugsrahmen zu bestimmen, müssen die Ausgangsposition, die Geschwindigkeit und die Ausrichtung des Körpers bekannt sein. Liegt die Genauigkeit des Gyroskops deutlich unter der Erdrotation ($15^\circ/\text{h}$), kann die Lage anhand der Schwerkraft und der Erdrotation geschätzt werden.

Die Kosten für die Hardware variieren je nach Qualität der Komponenten (siehe [Table 17](#)). Ein kostengünstiges mikroelektromechanisches System (MEMS), das bei mobilen Geräten zum Einsatz kommt, kann in der Regel nicht allein verwendet werden und erfordert die Fusion von Sensoren (tendenziell GNSS, Bluetooth und WLAN), während das Ringlaser-Gyroskop (Messung der Lichtfrequenzdifferenz in zwei Richtungen) das leistungsfähigste und kostspieligste System ist.

Tabelle 17 – Überblick über Koppelnavigationssysteme

Art	Ringlaser-Gyroskop	Faseroptisches Gyroskop	MEMS	Kostengünstige MEMS
Kosten [Euro]	100 000	20 000	< 2 000	< 1 000
Drift des Gyroskops	0,003°/h	1°/h	360°/h	3 600°/h
Drift 1 m	~ 2 min	~ 30 s	~ 5 s	< 5 s

Es ist zu beachten, dass die in der Tabelle angegebenen Werte dem Konzept der Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit entsprechen.

5.3.8.1 Hauptmerkmale

Die Trägheitsnavigation funktioniert durch die **Integration von Sensormessungen** im Zeitverlauf in einem Prozess, der als Drift bezeichnet wird. Die High-End-Geräte können die Erdrotation bestimmen und arbeiten unabhängig, werden aber meist in Kombination mit GNSS-Empfängern verwendet.

Da Fehler mit der Zeit zunehmen, besteht die ideale Vorgehensweise in der Kombination der IMU-Sensormessungen mit den GNSS-Positionsdaten in einem Kalman-Filter, der die Position des Körpers in Richtung der hochwertigen GNSS-Positionsdaten lenkt und dazwischen eine hohe Aktualisierungsrate aufweist. Ein Beispiel ist das [Trägheitsnavigationssystem](#), das die Position, Ausrichtung und Geschwindigkeit des Körpers ohne externe Referenzen ermittelt. Dieses System kann kurze GNSS-Ausfälle überbrücken, die Auflösung von RTK-Mehrdeutigkeiten unterstützen und bei der Erkennung und Abschwächung von Zyklusfehlern helfen. Im Falle einer eng gekoppelten Lösung bedeutet dies auch, dass die Position mit weniger als drei sichtbaren Satelliten ermittelt werden kann.

Für technische Einzelheiten zu IMU, Mechanisierung und Sensorfusion siehe auch [P. Groves, Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems, Artech House, 2013](#).

5.3.8.2 Stand und Optimierungspläne

Die erste brauchbare IMU wurde in den 1950er Jahren hergestellt, und die Technologie war in den 1980er Jahren ausgereift. Seitdem hat sich die Entwicklung auf die Miniaturisierung und die Ausarbeitung von Trägheitsnavigationssystemen – lose gekoppelt, eng gekoppelt und gekoppelt sowie Kalman-Filter – konzentriert. **IMU sind inzwischen weitverbreitet, wobei kostengünstige IMU auch zum Betrieb von Mobiltelefonen genutzt werden**. Die derzeitige Entwicklung besteht darin, mithilfe neuer Materialien die Größe und die Kosten zu verringern und die Leistung zu erhöhen. Im Abschnitt zu Quantentechnologien wird die Entwicklung eines neuen, vielversprechenden Hardware-Ansatzes dargelegt.

5.3.9 Magnetnavigation

Die Verwendung von Magnetismuskarten für die Navigation geht auf die Raketennavigation in den 1960er Jahren zurück, bei der **Veränderungen im Gelände genutzt wurden, um die Position des Nutzers zu bestimmen**, indem die kontinuierlichen Messwerte mit der aufgezeichneten morphologischen Karte verglichen wurden. Damit diese Beobachtungen für die Navigation verwertbar werden, müssen sie im Zeitverlauf stabil sein und genügend abweichende Merkmale aufweisen, um Gebiete untereinander zu unterscheiden.

5.3.9.1 Hauptmerkmale

Die **Magnetnavigation** ist eine der ältesten Formen der Navigation. Der magnetische Kern der Erde wurde zur Bestimmung des Nordens und zur Beibehaltung eines konstanten Azimuts verwendet. Der moderne Ansatz konzentriert sich stattdessen auf Anomalien, da diese im Zeitverlauf stabil sind. Der magnetische Messwert ist die Überlagerung aller magnetischen Quellen, d. h. des Erdkerns, des Erdkrustenfeldes und der vom Menschen verursachten Effekte sowie des Weltraumwettters.

Der **Erdkern** (95–99 % der gesamten Magnetkraft) wird zwar durch bestehende Modelle gut beschrieben und kann vom Weltraum aus gemessen werden, hat aber große räumliche Wellenlängen und eine zeitlich veränderliche Beschaffenheit, sodass er sich nicht für die kartengestützte Navigation eignet. Das Magnetfeld der Erdkruste (1–5 % der gesamten magnetischen Wirkung) ist äußerst stabil und weist lokale Unterschiede auf. Dieses Magnetfeld ist weltweit unterschiedlich stark ausgeprägt und erstreckt sich bis unter die Ozeane und bedeckt die gesamte Erdoberfläche. **Vom Menschen verursachte Effekte** lassen sich in statische und zeitlich veränderliche Effekte unterteilen. Nur die erstgenannten sind für die Navigation nützlich, und viele lange, vom Menschen geschaffene Merkmale können für die Standortbestimmung von Nutzen sein. In diesem Zusammenhang stellen **Weltraumwettereffekte** das Äquivalent zum Messrauschen dar.

Magnetische Anomalien (d. h. lokale Schwankungen des Magnetfelds der Erde) sind schwer zu messen. Darüber hinaus müssen magnetische Messungen in größeren Höhen nach oben propagiert werden, da die Leistung des Magnetfelds dem Abstandsquadrat-Gesetz folgt.

Die Magnetkraft wird mit zwei Arten von **Instrumenten** gemessen. Der **Skalar** misst die Feldstärke und der **Vektor** (z. B. Luftspalt-Magnetometer) drei orthogonale Komponenten. Der Vektor ist zwar weniger genau, kann aber häufig auftretende Fehler (aufgrund von vom Menschen verursachten oder weltraumbedingten Einflüssen) beseitigen und zusätzliche Geodaten liefern. Leider sind Gradientenkarten weniger verbreitet als Anomaliekarten.

Da Karten nicht exakt sind, ist die Position die probabilistische Schätzung (die Wahrscheinlichkeitsfunktion), die erste Vorabinformationen erfordert. Bei diesem Ansatz schafft eine einzige statische Position mehrere mögliche Positionen. Wenn sich der Nutzer bewegt, wird die Schätzung mithilfe des **Partikelfilters** aktualisiert, damit sie sich mit der Zeit in Richtung einer einzigen korrekten Position bewegt.

5.3.9.2 Stand und Optimierungspläne

Praktische Ergebnisse für die Magnetnavigation zeigen, dass die **Genauigkeit in Innenräumen im Submeterbereich** liegt und sogar im Dezimeterbereich liegen kann, während die **Leistung im Freien von Metern bis zu Hunderten von Metern** schwankt, was dann eine Fusion mit anderen Sensoren erfordert. Ebenso hat sich die Flugdemonstration mit magnetischer Ablesung und IMU als effizient erwiesen, wobei die Haupteinschränkung die Flughöhe ist (wenige bis zehn Meter Genauigkeit bei einer Höhe unter 1 km, bei einer Höhe von 10 km verschlechtert sich die Genauigkeit jedoch auf Hunderte von Metern). Genaue Karten von Anomalien in oder unterhalb der Flughöhe sind unerlässlich.

Die Magnettechnik **entwickelt sich rasch weiter**. Handelsunternehmen bieten auf bestimmte Gebiete begrenzte **Ortungs- und Navigationsdienste** an, bei denen magnetische Daten mit anderen Sensoren (WLAN und Bluetooth sowie vorab kartierte Standorte) genutzt werden. Andere Unternehmen schlagen die Magnettechnik für **Bahnanwendungen** vor, um Gleise und den aktuellen Standort von Zügen zu bestimmen, während andere Anwendungen die **Schifffahrt** mit einem System zur absoluten Positionsbestimmung anhand von Radaren umfassen, das die aus Radarmessungen extrahierten Merkmale verwendet, die mit Radarkarten abgeglichen werden, um die Position des Benutzers zu bestimmen. All **diese Technologien erfordern Sensorfusion**.

5.3.10 Erdnahe Umlaufbahn

Systeme in erdnahe Umlaufbahn (LEO) bestehen aus Hunderten oder möglicherweise Tausenden von Satelliten, die aus einer Betriebshöhe zwischen 400 km und 1500 km senden (unter Vermeidung von atmosphärischem Widerstand und Sonneneffekten). Bis vor Kurzem wurde diese Höhe vor allem von Satelliten für die Erdbeobachtung (earth observation, EO) und Kommunikationssatelliten (SatCom) mit einer Konstellation von nicht mehr als 100 Satelliten genutzt.

Die erdnahe Umlaufbahn bietet eine **geringe Latenz** und eine **hohe Signalempfangsstärke** (30 dB höher als bei der mittleren Erdumlaufbahn) bei geringer Sendeleistung. Diese Merkmale machen die erdnahe Umlaufbahn für Megakonstellationen interessant, die der Bereitstellung von Breitband-Internet dienen. Die Breitbandanbieter wollen das hochfrequente Ku-Band nutzen, das Datengeschwindigkeiten von bis zu 8–20 Gbit/s ermöglichen soll.

Eine derartig nahe Umlaufbahnpositionierung zur Erdoberfläche **hat auch Nachteile**, da die typische Satellitenausleuchtzone (d. h. die Bodenfläche, die von den Sendeantennen abgedeckt werden kann) viel kleiner ist (neun LEO-Satelliten sind erforderlich, um die Ausleuchtzone eines MEO-Satelliten abzudecken). Außerdem ist die relative Geschwindigkeit des Satelliten zum Boden viel höher. Die Umlaufperiode in der erdnahen Umlaufbahn beträgt etwa 100 Minuten, während sie in der mittleren Umlaufbahn etwa 12 Stunden beträgt. Dies bedeutet, dass für eine vollständige Abdeckung der Erde viel größere Konstellationen erforderlich sind.

Die nachstehende Tabelle enthält eine nicht erschöpfende Auswahl von LEO-Diensten. In Anbetracht der relativ geringen Kosten für die Anmeldung bei der ITU und des Prioritätsvorteils (gegenüber später registrierten Anmeldungen) besteht die Tendenz, Systeme anzumelden, auch wenn ihre Betriebspläne noch nicht vollständig entwickelt sind. Die nachstehende Liste basiert daher auf der wahrgenommenen Marktnähe der Konstellationen und Kommunikations-Megakonstellationen. Eine wesentliche Auslassung in dieser Tabelle sind die EO-Satelliten.

Tabelle 18 – Überblick über die LEO-Konstellationen

System	Anzahl der Satelliten	Satelliten im Betrieb (August 2022)	Höhe (km)
Iridium	66	66	780
Kuiper	3 236	0	590–630
Starlink	4 409	2 268	540–570
OneWeb	4 000	354	1 200
Kepler	6 LEO + 24 MEO	0	7 600 + 29 600
Centispace	120	2	975
XonaSpace	300	1	975

Es sei darauf hingewiesen, dass sich die Werte in der Tabelle schnell ändern können.

5.3.10.1 Hauptmerkmale

LEO-Konstellationen bieten zahlreiche Dienste, darunter sichere Kommunikation und Breitbandanbindung für intelligente Geräte und vernetzte Fahrzeuge. Sie umfassen **keine spezielle Navigationsnutzlast (mit Ausnahme von Iridium)** und können daher heute nur Augmentationsdaten für GNSS-Signale liefern bzw. können ihre Signale indirekt für die Navigation unter Verwendung des Signal-of-Opportunity-Ansatzes und der Dopplernavigation verwendet werden.

Die einzige derzeit verfügbare Möglichkeit, Position und Navigation von einer LEO-Konstellation aus zu gewährleisten, ist die **Dopplernavigation**, deren größte Schwäche die Umlaufbahnbestimmung und die Zeitsynchronisierung der Fixpunkte ist (was teilweise durch die Berechnungsmethode ausgeglichen wird). Durch die größere Anzahl von LEO-Satelliten kann die Genauigkeit bei der Positionsbestimmung (unter Verwendung des SoO-Doppler-Ansatzes) verbessert werden, nicht aber die Zeitbestimmung.

Iridium liefert ein spezielles Navigationssignal, das auch die Zeitsynchronisierung ermöglicht. Im Jahr 2016 wurde Satelles Time and Location (STL) als Konsortium von Iridium, Satelles Inc und Boeing gegründet, um globale Navigationsdienste anzubieten. Die Systeminfrastruktur besteht größtenteils aus dem Weltraumsegment, während sich das Bodensegment auf eine einzige Kontrollstation (mit einem Hot-Backup,

das innerhalb von zehn Minuten aktiv ist) in den USA und mehrere passive Bodenüberwachungsstationen beschränkt. STL-Weltraumsignale werden auf der Frequenz L1 (1616–1626 MHz) übertragen.

Iridium ist für nur einen Satelliten im Sichtfeld des Nutzers ausgelegt. Jeder der 66 Iridium-Satelliten verfügt über 48 Spot-Beams. Um die Sicherheit und den Schutz vor Spoofing zu gewährleisten, überträgt jeder Strahl die Navigationsnachricht mit einem individuellen Code, der sich im Sekundentakt ändert. Aufgrund der vollständigen Kontrolle der STL-Strahlen kann die Navigationsnachricht auf bestimmte Gebiete beschränkt werden (wodurch verhindert wird, dass das Signal in Gebieten ohne Teilnehmer empfangen wird). Die komplexen, sich überschneidenden Strahlenmuster der Satelliten in Kombination mit Signalauthentifizierungstechniken ermöglichen es STL, eine **sichere und von GNSS unabhängige Funktion zur Zeitbestimmung** (synchronisiert mit der UTC) **und Positionsbestimmung** zu liefern.

STL-Signale werden auf der Erdoberfläche etwa 1000-mal (30 dB) stärker empfangen als GNSS-Signale, was den Empfang in **Innenräumen** ermöglicht. Die Satelliten haben keine Atomuhren an Bord. Stattdessen werden sie ständig über eine Bodenstation und die Inter-Satelliten-Funktionen der Iridium-Konstellation kalibriert. Die Teilnehmer müssen eine Servicegebühr entrichten.

5.3.10.2 Stand und Optimierungspläne

STL ist die einzige eingesetzte und ausgereifte Technologie für PNT. STL kann zuverlässige Zeitangaben mit einer Genauigkeit von 100–150 ns in Abhängigkeit von der UTC(k) liefern. Die **Position** ist schwieriger zu ermitteln, und die derzeitige Lösung besteht darin, den Dopplereffekt zu nutzen, der für statische Nutzer eine Genauigkeit von etwa 10 m bietet. Sobald ein Festwert erreicht ist (was bei einer unbekannt Position bis zu 20 Minuten Konvergenzzeit erfordert), kann die Position auch mit einem einzigen Satelliten bestimmt werden, allerdings mit einer wesentlich geringeren Genauigkeit von bis zu mehreren Dutzend Metern. STL kann auch Unterstützungsdaten in Echtzeit für Satellitenuhren, Orbits und Nachrichtennutzlasten enthalten. Es wird davon ausgegangen, dass die raschen Geometrieänderungen eine Verbesserung bei der Minderung von Mehrwegeeffekten bewirken werden, da sich die Auswirkungen über einige Minuten hinweg ausgleichen werden.

Zur Überwindung der wichtigsten Einschränkungen bei der Nutzung von LEO-Systemen für einen vollständigen PNT-Dienst (im Gegensatz zur reinen Zeitbereitstellung), nämlich für die Umlaufbahnbestimmung und die Zeitsynchronisierung, empfiehlt sich die Verwendung von GNSS-Empfängern an Bord, um sowohl die Position als auch die Zeit der Übertragung zu schätzen (dann ist der Dienst jedoch nicht mehr GNSS-unabhängig). Dieser Ansatz – eine **Fusion aus LEO-Satelliten und PNT** – steht im Mittelpunkt des Unternehmens **Xona Space Systems**, dessen PNT-Dienst Pulsar eine Genauigkeit im Meterbereich verspricht. Der erste Satellit wurde 2022 im Rahmen der Rideshare-Mission von SpaceX gestartet, und der Dienst wird voraussichtlich Ende 2023 betriebsbereit sein. Die tatsächliche Leistung ist noch nicht bekannt.

Kepler ist ein Konzept für ein vollständig maßgeschneidertes PNT-System mit einer Mischung aus LEO- und MEO-Satelliten. Damit unterscheidet sich dieses System vollständig von anderen zuvor erörterten LEO-Systemen, da es sich um ein auf PNT zugeschnittenes System handelt und nicht um eine teilweise Optimierung/Weiterverwendung einer LEO-Infrastruktur, die ursprünglich für einen anderen Anwendungsbereich wie etwa Kommunikation oder Breitband-Internetzugang konzipiert wurde. Kepler stellt die Synchronisierung durch direkte Messungen mit optischen Verbindungen her und kann völlig unabhängig oder in Zusammenarbeit mit Galileo arbeiten.

Eine weitere Möglichkeit ist schließlich die Doppler-Entfernungsmessung für alle von LEO-Satelliten gesendeten Signale oder die Nutzung dieser Signale als Signals of Opportunity. Beide Ansätze sind unabhängig vom Systemeigentümer, da jeder diese Beobachtungen nutzen kann. Es bestehen jedoch Einschränkungen, da Doppler von einer großen Anzahl sichtbarer Satelliten abhängt, während Signals of Opportunity von einem speziellen Bodensegment (einer Basisstation) abhängig sind.

5.3.11 Quantentechnologien

Unter den neuen und sich abzeichnenden Technologien, die in Bezug auf PNT-Anwendungen erhebliche Vorteile bringen können, sind diejenigen **besonders vielversprechend, die die Effekte der Quantenphysik nutzen**. In den meisten Fällen sind jedoch noch mehrere Jahre Entwicklungszeit erforderlich, bis neuartige Quantentechnologien tatsächlich die erwarteten Auswirkungen auf PNT-Anwendungen haben.

5.3.11.1 Quantenuhren

5.3.11.1.1 Hauptmerkmale

Die kontinuierlichen Fortschritte bei den Atomuhren dürften den satellitengestützten Ortungssystemen in hohem Maße zugutekommen:

- Für die **Bodeninfrastruktur** können Uhren auf Grundlage der Kaltatom-Interferometrie in Betracht gezogen werden, um die bestehenden Cäsium-Uhren und aktiven Wasserstoff-Maser zu ersetzen, die allgemein zur Erzeugung der Systemzeit eingesetzt werden. Auch wenn die Entwicklung von Kaltatom-Uhren inzwischen recht weit fortgeschritten ist und einige kommerzielle Produkte auf den Markt kommen, ist ihre Verwendung noch weitgehend auf die Wissenschaft beschränkt.
- In Bezug auf die **Weltrauminfrastruktur** wird durch bessere Uhren in Satelliten die Positionsgenauigkeit bei unkorrigierten Messwerten verbessert, aber die mit dem Einsatz dieser Uhren im Weltraum verbundenen Zwänge beschränken die möglichen Kandidaten derzeit auf ionenbasierte Uhren, gepulste optisch gepumpte Uhren und längerfristig optische Atomuhren, die auf nichtlinearen Effekten wie der Zwei-Photonen-Absorption und der Modulationstransfer-Spektroskopie beruhen.

Optische Atomuhren im Labormaßstab sind bereits im Einsatz und werden zweifellos zur Einführung einer metrologischen Zeitskala beitragen: Auch wenn GNSS-Systeme keine autonome Realisierung einer solchen Zeitskala erfordern, werden sie diese wahrscheinlich über Zeitübertragungsprotokolle nutzen, die auf der Zwei-Wege-Satellitenzeit- und -frequenzübertragung mit Trägerphase oder auf kohärenten optischen Verbindungen im freien Raum oder über Glasfasern basieren.



Abbildung 61 – Eine kommerzielle Kaltatom-Uhr (links) und der Prototyp eines optischen Frequenznormalis auf der Grundlage des Zwei-Photonen-Übergangs im Rb (rechts). Es sei darauf hingewiesen, dass der Frequenzkamm, der zur Umsetzung der optisch stabilisierten Frequenz in ein Mikrowellensignal erforderlich ist, nicht enthalten ist [Strangfeld 2021].

5.3.11.1.2 Stand und Optimierungspläne

Längerfristig könnten neuartige GNSS-Architekturen für die Erzeugung und Verteilung der Zeit auf optischer Ebene entstehen, um die Stabilitätseigenschaften optischer Atomuhren, die über optische Verbindungen zwischen den Satelliten und zwischen Boden und Satelliten miteinander verbunden sind, voll auszunutzen.

Als Beispiel: Ein künftiges System könnte vollständig auf einer weltraumgestützten Infrastruktur beruhen, ohne dass weltweit verteilte Sensor- oder Upload-Stationen benötigt werden, wie sie für heutige GNSS erforderlich sind. Die weltraumgestützte Infrastruktur könnte MEO- und LEO-Satelliten umfassen, die mit kavitätsstabilisierten Lasern bzw. optischen Atomuhren ausgestattet sind und über optische Verbindungen entsprechend miteinander verbunden sind, um eine globale Synchronisierung auf ps- und eine Entfernungsmessung auf μm -Ebene zu ermöglichen. Im Prinzip ist als Bodeninfrastruktur nur eine optische Empfangsstation erforderlich, um die Systemzeit mit der koordinierten Weltzeit (UTC) in Einklang zu bringen.

Das [Kepler-Projekt](#) zeigt, wie optische Atomuhren künftige GNSS-Architekturen mit einer **~100-fachen Verbesserung des Weltraumsignals** ermöglichen können.

Es ist jedoch zu bedenken, dass ein besseres Weltraumsignal aufgrund von ionosphärischen bzw. troposphärischen Störungen und Störungen durch Mehrwegeeffekte nicht unmittelbar zu einer besseren Genauigkeit bei der Positionsbestimmung für den Endnutzer führt. Ergänzende Techniken wie präzise Punktpositionierung oder Echtzeit-Kinematik müssen **erheblich verbessert werden**, wenn die Generierung und Verteilung von GNSS-Zeit im optischen Maßstab den Endnutzern tatsächlich zugutekommen soll. Darüber hinaus ist ein sehr komplexer Miniaturisierungsprozess erforderlich, damit die optischen Atomuhren die Abmessungen eines Chips erreichen und eine batteriekompatible Leistung aufweisen, wenn sie in tragbaren High-End-Geräten eingesetzt werden sollen.

5.3.11.2 Quanten-Trägheitsnavigationssysteme

5.3.11.2.1 Hauptmerkmale

Die Prinzipien der Quantenphysik werden auch für die Navigation genutzt, weil davon ausgegangen wird, dass sich die **Driftleistung von Trägheitsplattformen** durch die Nutzung von grundlegend **unveränderlichen atomaren Eigenschaften verbessert**. Die Forschung hat sich auf Folgendes konzentriert:

- **Kernresonanzmagnetische (nuclear magnetic resonance, NMR) Kernspin-Gyrokope** wurden erstmals in den 1960er Jahren entwickelt, doch die Konkurrenz durch Ringlaser- und faseroptische Gyrokope standen ihrer kommerziellen Attraktivität im Wege. Erst kürzlich wurden neue Geräte vorgestellt, bei denen Miniaturisierungstechnologien für kompakte Navigationssysteme zu wettbewerbsfähigen Kosten genutzt werden.
- Weitaus weniger erforscht sind **relaxationsfreie Spin-Austausch-Gyrokope (spin-exchange relaxation free, SERF)**, die auf dem elektronischen Spin von Alkalimetallen beruhen (erstmalig 2005 vorgeschlagen), und solche Gyrokope, die den Spin von Stickstoff-Leerstellen in Diamanten nutzen (im letzten Jahrzehnt); beide sind nach wie vor Hauptgegenstand der akademischen Forschung.
- Bei **Kaltatom-Interferenz-Gyrokopien (cold atom interference, CAI)**, den derzeit vielversprechendsten Systemen für die autonome Navigation, wird die grundlegende Stabilität der Atommasse genutzt, um die Unempfindlichkeit gegenüber Drifts zu gewährleisten, sodass es keiner regelmäßigen Neukalibrierungen bedarf. Darüber hinaus messen CAI-basierte Systeme die absoluten Werte für Beschleunigung und Drehrate und nicht die Abweichungen von Referenzwerten. Diesen Vorteilen stehen hohe Kosten, eine große Größe, ein hohes Gewicht sowie ein hoher Energiebedarf gegenüber, da komplexe Basistechnologien erforderlich sind (Vakuumsysteme, Laser und optische Systeme, Steuerelektronik usw.), deren Fortschritt ein Schlüsselfaktor für die Entwicklung von Trägheitssensoren auf CAI-Basis ist, die vor Ort eingesetzt werden können.

[Table 19](#) bietet einen Vergleich zwischen diesen Quantengyrokopien und konventionellen MEMS- und ESG-Gyrokopien. **Auf einem mikroelektronischen mechanischen System (MEMS) basierende Gyrokope** sind in Verbraucheranwendungen weitverbreitet, erreichen aber wahrscheinlich nicht die für die autonome Navigation erforderlichen Driftnforderungen. Die Leistung mechanischer Schwimmgyrokope und optischer Gyrokope kommt an ihre Grenzen, die durch die zugrunde liegenden physikalischen Prinzipien bestimmt werden, und jede Verbesserung ist mit hohen Zusatzkosten verbunden. **Elektrisch gelagerte (electrically suspended, ESG) Gyrokope**, die ebenfalls untersucht wurden, bestehen aus einem Kreisel mit zwei Freiheitsgraden, bei dem die sich drehende Rotorkugel in einem Vakuum durch ein elektrisches Feld gestützt ist. Es wird davon ausgegangen, dass Atomgyrokope (NMR, SERF und CAI) in Bezug auf Trägheitsnavigationssysteme der nächsten Generation mit konventionellen Navigationsgeräten konkurrieren werden.

Tabelle 19 – Vergleiche von Gyroskopen, die auf unterschiedlichen physikalischen Prinzipien beruhen [Daten aus Zhang 2016]

Zweck	Art	Drift (°/h)	Größe (mm ³)	Kosten (USD)
Taktisch	MEMS	1 000 – 0,1	< 100	< 100
Navigation	NMR-Gyroskop	10 ⁻²	10 – 10 ⁴	10 ³ – 10 ⁴
	Ringlaser-Gyroskop	10 ⁻² – 10 ⁻³	~ 10 ⁵	10 ⁴ – 10 ⁵
	Faseroptisches Gyroskop	10 ⁻² – 10 ⁻³	10 ⁵ – 10 ⁶	10 ⁴ – 10 ⁵
Strategisch	Mechanisches SchwimmgYROSKOP	10 ⁻³ – 10 ⁻⁴	10 ⁶ – 10 ⁷	10 ⁵ – 10 ⁶
	ESG-Gyroskop	10 ⁻⁴ – 10 ⁻⁵	10 ⁷ – 10 ⁸	10 ⁶ – 10 ⁷
	SERF-Gyroskop	~ 10 ⁻⁴	10 ⁶ – 10 ⁷	< 10 ⁵
	CAI-Gyroskop	> 10 ⁻⁵	~ 10 ⁹	10 ⁵ – 10 ⁶

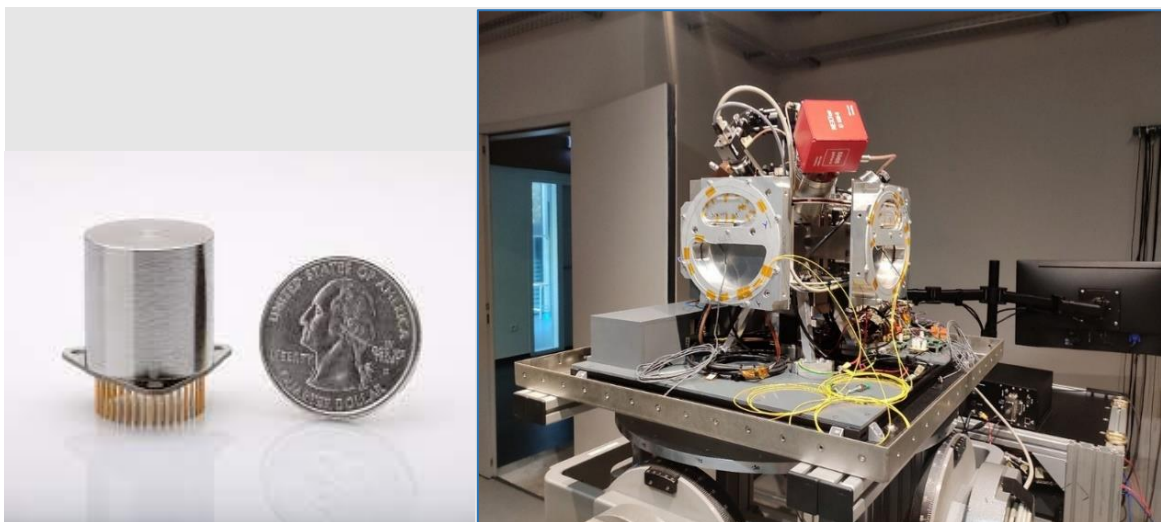


Abbildung 62 – Prototyp eines NMR-Gyroskops für taktische Anwendungen von Northrop Grumman (links) und eine laborgestützte IMU, die auf der Hybridisierung von faseroptischen Gyroskopen und CAI-Beschleunigungsmessern basiert, entwickelt von IXblue (rechts)

5.3.11.2.2 Stand und Optimierungspläne

Auf dem **Weg zu einer tragbaren CAI-basierten sechssachsigen IMU**, die schnell, robust und kompakt genug ist, um **für die Trägheitsnavigation** eingesetzt werden zu können, bedarf es dem Eingehen verschiedener Kompromisse und der Überwindung verschiedener technologischer Herausforderungen, die wahrscheinlich **mehrjährige Bemühungen** erfordern werden. Um die in ihrem Funktionsprinzip verankerte Driftfreiheit wirksam zu nutzen, müssen zuverlässige und robuste Technologien entwickelt und implementiert werden, die einen langfristigen autonomen Betrieb in rauen Umgebungen ermöglichen.

Es sei auch darauf hingewiesen, dass CAI-basierte IMU zwangsläufig Totzeitintervalle aufweisen, in denen die Atomkühlung stattfindet, was einen **hybriden Betrieb** erfordert, der auch klassische Geräte umfasst. Ein alternativer Ansatz könnte die Verwendung von CAI-Systemen sein, die eine Plug-in-Kalibrierung von schnellen und empfindlichen Beschleunigungsmessern und Gyroskopen auf der Grundlage anderer Funktionsprinzipien ermöglichen.

Einachsige Kaltatom-Gravimeter zur Messung langsam schwankender Schwerefelder entlang einer einzigen Achse sind bereits im Handel erhältlich (TRL = 9, d. h. das System hat sich in der Praxis bewährt), während mehrere Prototypen von CAI-basierten Beschleunigungsmessern und Gyroskopen entwickelt wurden, die einen TRL zwischen 3 (experimenteller Konzeptnachweis) und 4 (im Labor validierte Technologie) aufweisen.

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass Atomsensoren, die für die Trägheitsnavigation eingesetzt werden sollen, wahrscheinlich als Güter mit doppeltem Verwendungszweck gelten und den ITAR-Ausfuhrbeschränkungen unterliegen, wie dies bereits bei Hochleistungssystemen der Fall ist, die auf optischen oder mechanischen Effekten basieren.

5.3.11.3 Literaturhinweise

Leser, die an einer eingehenderen Analyse interessiert sind, werden auf die folgende Literatur verwiesen:

- G. Giorgi et al., *Advanced technologies for satellite navigation and geodesy*, Advances in Space Research 64, 2019.
- W. R. Milner et al., *Demonstration of a Timescale Based on a Stable Optical Carrier*, PRL 123, 173201, 2019.
- B. Jadusziwer und J. Camparo, *Past, present and future of atomic clocks for GNSS*, GPS Solutions 25:27, 2021.
- T. Schuldt et al., *Optical clock technologies for global navigation satellite systems*, GPS Solutions Bd. 25, Nr. 83, 2021.
- Strangfeld et al., *Prototype of a compact rubidium-based optical frequency reference for operation on nanosatellites*, Journal of the Optical Society of America, Bd. 38, Ausgabe 6, 2021.
- M. Schioppo et al., *Comparing ultrastable lasers at 7×10^{-17} fractional frequency instability through a 2220 km optical fibre network*, Nature Communications, 13:212, 2022.
- Zhang et al., *Inertial rotation measurement with atomic spins: From angular momentum conservation to quantum phase theory*, Appl. Phys. Rev. 3, 041305, 2016.
- M. Travagnin, *Cold atom interferometry for inertial navigation sensors – Technology assessment: space and defence applications*, JRC122785, EUR 30492 EN, 2020.
- M. J. Wright et al., *Cold Atom Inertial Sensors for Navigation Applications*, Frontiers in Physics, eingereicht am 14. Juli 2022.

5.3.12 Pulsarsen-PNT

Ein [Pulsar](#) (Kunstwort aus „**pulsating source of radio emission**“ – pulsierende Radioquelle) ist ein stark magnetisierter und schnell rotierender Neutronenstern, der von seinen Magnetpolen aus elektromagnetische Strahlen aussendet. Die elektromagnetische Strahlung kann nur beobachtet werden, wenn ein Emissionskegel auf die Erde gerichtet ist. Da Neutronensterne äußerst kompakte Objekte mit kurzen, regelmäßigen Rotationsperioden sind, **ist das Intervall zwischen den Pulsen sehr genau** und reicht von Millisekunden bis zu Sekunden für einen einzelnen Pulsar. Das elektromagnetische Signal (insbesondere im Funkband, im optischen Band und im X-Band), das von den Pulsaren ausgesendet wird, kann von Spezialgeräten erfasst werden, und jeder Pulsar kann auf der Grundlage der aus dem ausgesendeten Signal rekonstruierten Lichtkurve identifiziert werden. Pulsare sind also nicht nur eine Quelle für die präzise Zeitmessung, sondern können auch für die Navigation im galaktischen Maßstab genutzt werden. Dieses Konzept wurde erstmals 1974 von G. S. Downs vorgeschlagen.

5.3.12.1 Hauptmerkmale

Pulsare wurden zunächst für die **Zeitgebung** in Betracht gezogen (Millisekundenpulsare bieten eine mit Atomuhren vergleichbare Zeitstabilität). Diese Idee wurde bereits in die Praxis umgesetzt: 2011 wurde die erste terrestrische Pulsaruhr in Danzig (Polen) zum 400. Geburtstag von [Johannes Hevelius](#) installiert. Seitdem wurden mehrere andere Geräte installiert, mit denen das Konzept der Pulsar-Zeitskala praktisch erprobt wurde, das als Kombination von Langzeitbeobachtungen von Pulsaren mit ultrastabilen lokalen Uhren gedacht war. Schon die [einfache Kombination aus Atomuhr und Korrekturen, die aus der Beobachtung von Pulsaren berechnet werden, bewirkt eine sehr stabile Zeitskala](#), das von anderen Faktoren unabhängig ist.

Zwar kann nicht jeder Pulsar für eine präzise Zeitmessung verwendet werden, was vor allem an der Frequenz liegt, doch sind sie alle sehr stabil (einige werden seit den 1970er Jahren beobachtet). Interessanterweise sind [Quellen, die weniger hell sind, stabiler](#). Jeder Pulsar hat ein einzigartiges Sendeprofil, insbesondere im Hinblick auf die Wiederholungsperiode der Pulse, wodurch er identifiziert werden kann. Dies führte dazu, dass Pulsare für die Navigation in Betracht gezogen wurden (erstmalig von G. S. Downs).

Das Hauptargument war, dass sie von überall in der Galaxie sichtbar sind und dass mehrere Pulsare (die anhand ihrer Frequenz unterschieden werden können, ähnlich wie Leuchttürme) Leuchtfener bilden können, deren Richtung bekannt ist.

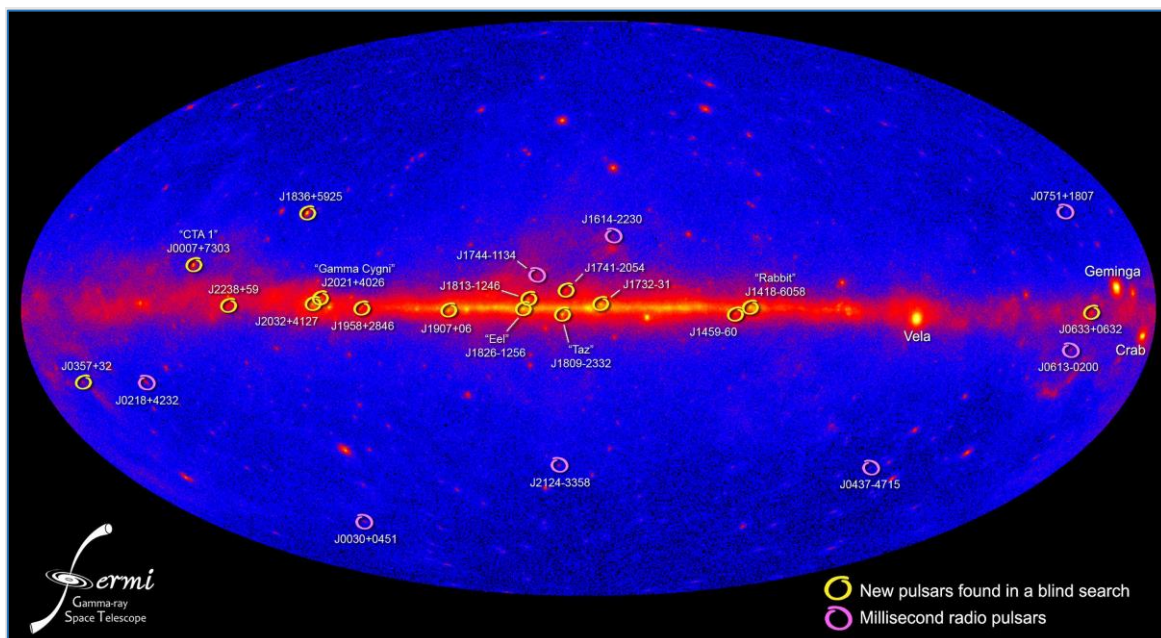


Abbildung 63 – Bekannte Pulsare entlang der galaktischen Längs- und Breitengrade (Quelle: NASA (Public Domain Regierung der USA))

Seitdem wurden im Rahmen verschiedener Weltraummissionen Tausende von Röntgenquellen beobachtet und identifiziert, von denen einige aktiv überwacht werden. Darüber hinaus wurden weitere Weltraumfunksignale

identifiziert, darunter Gammablitz, die für die Positions- und Geschwindigkeitsbestimmung mit hellen Röntgenquellen empfohlen werden, und schnelle Radioblitz, die für die relative Navigation empfohlen werden. Funkpulsare werden auch aktiv für Studien über Gravitationswellen genutzt.

5.3.12.2 Stand und Optimierungspläne

Der Großteil der einschlägigen Forschungsergebnisse stammt von der NASA und der ESA, die Kapazitäten und Algorithmen entwickeln. Es werden zwei **Navigationsmethoden** für Raumfahrzeuge vorgeschlagen:

- Bei der absoluten Navigation versucht ein einziger Satellit, sich in Bezug auf einen Trägheitsbezugspunkt wie das Baryzentrum des Sonnensystems zu positionieren. Dies würde eine sporadische Verbindung zwischen dem Satelliten und der Bodenkontrolle zur Aktualisierung der Pulsarephemeriden erfordern, die sich aufgrund von Pulsarstörungen (Zeitspanne von Jahren) oder anderen zeitlichen Unregelmäßigkeiten gelegentlich ändern könnten.
- Bei der relativen Navigation beobachten mehrere Raumfahrzeuge dieselben Quellen, wobei nur die Beobachtungen der beteiligten Raumfahrzeuge verwendet werden. Es wurden auch differenzielle Beobachtungen zwischen zwei Raumfahrzeugen vorgeschlagen, die in Formation fliegen und deren Entfernung bekannt ist.

Bei der Pulsarnavigation gilt das Hauptinteresse Weltraumsystemen und der interplanetaren Reise. Die meisten der bestehenden Weltraumnavigationssysteme arbeiten mit Telemetrie, und Röntgen-Pulsarnavigation und -zeitmessung könnten die Kosten erheblich senken und aufgrund höherer Genauigkeit Flexibilität bieten. Der attraktivste Aspekt ist die breite Verfügbarkeit der Signale und der geringe Instandhaltungsaufwand (für die Navigation sind nur seltene Ephemeriden-Aktualisierungen der einzelnen identifizierten Pulsare erforderlich). Röntgensensoren sind sehr resistent gegenüber Rauschen in anderen Frequenzen, was für Weltraumanwendungen von großem Nutzen ist. Nur Pulsare, die in diesen Frequenzen senden, kommen für die Navigation infrage, auch wenn andere Frequenzbereiche derzeit untersucht werden.

Eine ESA-Studie aus dem Jahr 2004 ergab, dass die Beobachtung eines einzelnen Pulsars zur Abschätzung der Entfernung eine moderate Antennengröße (10 m²) und eine Signalintegrationszeit von etwa einer Stunde erfordert. Ein weiteres Ergebnis war, dass Röntgen-Pulsarnavigation und -zeitmessung eine Genauigkeit von 1000 km für Weltraummissionen bieten könnten. Da das komplette System mehrere Antennen für synchrone Multi-Pulsar-Beobachtungen erfordern würde, wurde das Gesamtgewicht des Systems als zu schwer für das Raumfahrzeug erachtet.

Seitdem wurden mehrere Hardwaretests und -demonstrationen durchgeführt. Im Jahr 2016 startete China die experimentelle Demonstrationsmission X-Ray Pulsar Navigation (XPNAV-1), die eine Zeitauflösung im µ-Sekunden-Bereich und Messungen an einem einzelnen Pulsar demonstrierte. Die Hardware muss noch miniaturisiert werden und die Signalverarbeitungsberechnungen sind nach wie vor sehr rechenintensiv. In einer kürzlich in Zusammenarbeit mit der Universität Padua durchgeführten ESA-Studie wurden Genauigkeitssteigerungen bis in den Subkilometerbereich berechnet, wobei gleichzeitig Größe, Gewicht und Energiebedarf der Nutzlast reduziert wurden (schätzungsweise 10 kg Masse bei einem Volumen von 30 x 30 x 30 cm und 10 W Leistungsaufnahme).

Derzeit laufen weitere ESA-Studien zur interplanetaren Navigation, bei denen die Anzahl der Antennen auf eine reduziert wird, um die Pulsarsignale nacheinander zu erfassen, wodurch jedoch der Betrieb des Raumfahrzeugs verkompliziert wird. Forscher gehen ferner davon aus, dass Pulsarmessungen im Funkfrequenzbereich in Zukunft für die Navigation auf der Erde genutzt werden könnten, insbesondere für bestimmte Anwendungsfälle, bei denen die Größe der Antenne kein Problem darstellt. Für weitere Einzelheiten siehe: Use of pulsars for ship navigation: an alternative to the sextant (Nutzung von Pulsaren in der Schifffahrt: eine Alternative zum Sextanten).

5.4 Zusammenfassung der Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken

		STÄRKEN	SCHWÄCHEN	CHANCEN	GEFAHREN
Neu entstehende Technologien	White Rabbit	– Bewährte und erprobte Technologie, die einfach zu implementieren und zu verwalten ist.– Sowohl von kleinen als auch von großen EU-Unternehmen angeboten.	– Erforderlich sind eine Backbone-Infrastruktur und eine ununterbrochene End-to-End-Glasfaserverbindung.– Die Infrastruktur muss möglicherweise aufgerüstet werden.	– Innovation auf der Grundlage der bestehenden Technologie.– Die EU ist der führende Anbieter.	– Die kommerzielle Nutzung des bestehenden wissenschaftlichen Netzes ist noch nicht vereinbart.
	Zeitverteilung über Computernetze	– Das Netz muss nicht homogen sein, und die vorhandene Infrastruktur kann größtenteils genutzt werden.	– Das Fehlerbudget der Backbone-Verbindungen erfordert eine kommerzielle Internetverbindung mit garantierter Bandbreite („Best-Effort“-Internet unzureichend).– Jamming von Mikrowellenverbindungen möglich.	– Die Zahl der Verbindungen steigt natürlich mit den aufstrebenden Märkten wie IoT, Smart City oder Verkehr.	– Das Netz sollte nicht extrapoliert, sondern interpoliert (für eine Erweiterung ausgelegt) werden.– Das Netzwerk-Fehlerbudget erfordert unter Umständen beträchtlichen Sicherheitspuffer.
	Pseudoliten	– Spezielle und verschlüsselte Signale, die für eine hochpräzise Ortung im Innen- und Außenbereich bei geringer Leistungsaufnahme entwickelt wurden.– Einige Technologien sind resistent gegen Mehrwegeeffekte und verfügen über spezielle V-Ray-Antennen mit Strahlformung.– Das Übertragungssystem hat keine Kapazitätsbeschränkungen.– Resilient gegenüber regionalen Ausfällen und Systemausfällen, einige Technologien sind für sicherheitskritische Anwendungen zertifiziert.	– Die Genauigkeit basiert auf der Geometrie, d. h. auf der Platzierung der Sender-Empfänger, weshalb die Höhenschätzung weniger zuverlässig ist.– Die Anzahl der Einheiten lässt sich nicht gut mit der Fläche skalieren, und das Netz muss in der Nähe des vorgesehenen Abdeckungsbereichs eingerichtet werden.– Die UTC erfordert eine externe Synchronisierung.	– Die Bereitstellung ist einfach, und die Kosten für die Instandhaltung sind gering.– Etablierte kommerzielle Nutzung.	– Die genutzten Frequenzen können von jedem ohne Einschränkung genutzt werden (WLAN) oder erfordern eine spezielle Genehmigung.– Terrestrische Komponenten können physisch angegriffen werden und benötigen Strom.
	5G und Mobilfunknetze	– Basierend auf der vorhandenen Infrastruktur, Bereitstellung vollständiger PNT-Dienste.	– Derzeit beruhen alle Positionsdaten auf der GNSS-Sensorfusion.	– Massenmarkt.	– Der PNT-Aspekt ist im Plattformvorschlag nicht gut entwickelt.
	R-Mode	– Nutzt die vorhandene Funkinfrastruktur.– Ermöglicht Ortung, Zeitgebung und Integritätsprüfungen.	– Die Abdeckung ist auf Küstengewässer beschränkt, und die durch die Küstenlinie vorgegebene Geometrie stellt teilweise eine Herausforderung dar.– Hochpräzisionsanwendungen werden nicht unterstützt.– System und Dienst befinden sich in der Entwicklung, und die GNSS-unabhängige Synchronisierung ist eine Herausforderung.	– Kann die Lücke der terrestrischen Komponente des PNT-Systems für den Seeverkehr schließen.– Basierend auf den weltweit üblichen Küstenfunkdiensten für den Seeverkehr; skalierbar, um weltweite Verfügbarkeit entlang der großen Schifffahrtsrouten zu gewährleisten.	– Abhängig von der Verfügbarkeit der vorhandenen Funkinfrastruktur.– Die Normung muss innerhalb der nächsten fünf bis zehn Jahre abgeschlossen sein.

Abbildung 64 – Zusammenfassung der Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken für neue Technologien

		STÄRKEN	SCHWÄCHEN	CHANCEN	GEFAHREN
NEUE TECHNOLOGIEN (Forts.)	Bildgestützte Navigation	– Erprobte Technologie.	– Spezielle Hardware-Kalibrierung erforderlich.	– Sehr erfolgversprechend bei der Sensorfusion.	– Die derzeitigen Lösungen sind marktspezifisch.
	Mobilfunkgestützte Navigation	– Es handelt sich um einen flächendeckenden Dienst, der bereits auf mobilen Geräten verfügbar ist.	– Die Leistung ist nicht einheitlich und hängt vom jeweiligen Gerät ab.– Die Technologie wird von einem anderen Unternehmen als dem Gerätehersteller entwickelt.	– Für den Massenmarkt bestimmt und unter verschiedenen kommerziellen Bedingungen erprobt.	– Von einem Handelsunternehmen (Google, Apple) als Mehrwertangebot entwickelt.
	Koppelnavigation und IMU	– Passive weltweite Navigation, für jede Höhenlage und jedes Wetter.– Zuverlässig, einfach zu bedienen und reaktionsschnell.	– Mechanisches Rauschen und mechanische Fehler nehmen exponentiell zu.– Kostengünstigere Lösungen je nach Verfügbarkeit und Qualität der zusätzlichen Informationen.	– Einige der Anwendungen können mit preiswerter Hardware realisiert werden.– Immun gegen Spoofing.– Kosten im Zusammenhang mit der Leistung der Einheit.	– Kosten für High-End-Einheiten.– Bei der Sensorfusion GNSS zur globalen Ortung erforderlich.
	Umgebungskarten	– Erfordert keine Infrastruktur.	– Qualität der zugrunde liegenden Karten.– Einige Technologien erfordern klare Sicht auf den Himmel.	– Kein leichtes Ziel für Spoofing.– Standard-Hardware.	– Die Qualität der zugrunde liegenden Karten ist nicht kohärent.– Die simultane Positionsbestimmung und Kartierung (SLAM) ist bei der Aktualisierung von Daten nicht effizient/Nutzer wollen keine Daten austauschen.
	Erdnahe Umlaufbahn (LEO)	– Erfordert keine Infrastruktur.– Das Signal ist 30 dB höher als bei MEO, die Zeitverzögerung ist mit der terrestrischen Infrastruktur vergleichbar.	– Große Anzahl von Satelliten erforderlich und großer Dopplereffekt der Konstellation.– Abgesehen von Iridium wird kein spezielles PNT-Signal verwendet.	– Schnelle Einführung aktualisierter LEO-Systeme aufgrund der kurzen Satellitenlebensdauer.– Bei so vielen Signalen könnten weitere Signal-of-Opportunity (SoO)-Ansätze entwickelt werden.	– Die Einrichtung eines PNT-Dienstes zusätzlich zum Kommunikationsdienst könnte sich als zu teuer erweisen.– Die vorgeschlagene Anzahl von Satelliten könnte in Zukunft zu Problemen führen.– Die Umlaufbahnschätzungen sind nicht präzise genug.
	Quantentechnologien	– Basierend auf grundlegenden, unveränderlichen physikalischen Eigenschaften.	– Komplexe Basistechnologien erforderlich.	– Breite Palette von Leistungsverbesserungen.	– Hohe Kosten, Akzeptanz durch die Endnutzer.
	Pulsarsen-PNT	– Einsatz überall im Weltraum möglich, lediglich periodisch aktualisierte Almanache erforderlich.	– Erforderlich sind ein präziser Überbrückungstaktgeber sowie präzise ausgerichtete Antennen für jeden verfolgten Pulsar (in jeder Richtung).	– Vollständige PNT-Dienste für Weltraummissionen. – Zeitgebung für terrestrische Dienste.	– Kosten und Größe der Hardware. – Keine Demonstrationstests erfolgt.

Abbildung 65 – (Fortsetzung) Zusammenfassung der Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken für neue Technologien

6 ANHANG B: Resiliente PNT-Dienste

Wie in Abschnitt 4 dargelegt, sind Ortungs-, Navigations- und Zeitgebungsdienste (PNT-Dienste) für die Gesellschaft und die Wirtschaft in der EU von entscheidender Bedeutung, da sie präzise Zeit- und Standortangaben für kritische Infrastrukturen, den professionellen und den Massenmarkt sowie für sicherheits- und haftungskritische Anwendungen ermöglichen.

Störungen oder Ausfälle von PNT-Diensten können schwerwiegende Folgen haben, einschließlich finanzieller Verluste und Sicherheitsrisiken, was die Bedeutung resilienter PNT-Dienste verdeutlicht. Ungenaue Zeitangaben können zu Störungen der Stromnetze, Finanzmärkte und Kommunikationsnetze führen; ebenso können falsche Standortinformationen zu Unfällen in Verkehr- und Logistiksystemen führen.

In Anbetracht der Tatsache, dass das Schutzniveau je nach Kritikalität der Anwendung variieren sollte, erfordern **resiliente PNT-Dienste** die Erkennung von Bedrohungen, geeignete Reaktionsmechanismen und eine schnelle Wiederherstellung der Dienste. Dazu bedarf es der Entwicklung neuer Hardware (z. B. Antennen), Software (neue Algorithmen) und alternativer Systeme.

In der EU-Vision wird für ein System von PNT-Systemen plädiert, um resiliente PNT-Dienste zu erreichen, was mehrere Aspekte umfasst:

- **Redundanz:** Um bei Ausfällen oder Störungen die Kontinuität zu gewährleisten, sollten PNT-Dienste über redundante Systeme und Backup-Mechanismen verfügen.
- **Vielfalt:** Um die Zuverlässigkeit zu erhöhen, sollten PNT-Dienste mehrere Daten- und Signalquellen nutzen.
- **Überwachung, Prüfung und Instandhaltung:** Die regelmäßige Überwachung, Prüfung und Instandhaltung von PNT-Systemen sind von entscheidender Bedeutung, wenn es darum geht, etwaige Probleme zu erkennen, zu identifizieren und zu beheben, bevor sie zu einem Ausfall führen.
- **Sicherheit/Cybersicherheit:** PNT-Systeme sollten mit robusten Sicherheits- bzw. Cybersicherheitsmaßnahmen konzipiert werden, um vor vorsätzlichen Angriffen zu schützen und die Integrität der Daten zu gewährleisten.
- **Gemeinsamer Bezugsrahmen für die Positions- und Zeitbestimmung:** Es bedarf eines gemeinsamen Referenzsystems für die Positions- und Zeitbestimmung, um die Anhäufung von Fehlern bei der Kombination von PNT-Diensten zu vermeiden, die entstehen können, wenn die einzelnen PNT-Dienste Zeit- und Positionsangaben in unterschiedlichen Bezugsrahmen und Zeitsystemen liefern.
- **Normen und Vorschriften:** Die Normung und Regulierung von PNT-Diensten kann dazu beitragen, dass sie so konzipiert, eingesetzt und betrieben werden, dass sie bestimmte Leistungs- und Zuverlässigkeitsanforderungen erfüllen, z. B.:
 - Normen/Leitlinien **zur Bewertung der Leistung von PNT-Diensten**, einschließlich Prüffällen und Prüfverfahren;
 - Normen/Leitlinien mit **Mindestleistungsanforderungen** für Anwendungsbereiche (z. B. Luftverkehr, Seeverkehr, Zeitgebungsanwendungen usw.);
 - Normen/Leitlinien (Prüfung und Mindestleistung) für **Techniken zur Erkennung und Eindämmung von Störungen und Spoofing**.
- **Aufklärung und Sensibilisierung:** Nutzer und Entwickler sollten über die Bedeutung von PNT-Diensten sowie deren potenzielle Risiken und Bedrohungen informiert werden.

Indem alle vorstehend beschriebenen Aspekte berücksichtigt werden, wird sich die Resilienz von PNT-Diensten erhöhen und die Nutzer dieser Dienste werden in der Lage sein, die Risiken von Störungen und Ausfällen zu mindern und die Dienstkontinuität zu gewährleisten.

7 ANHANG C: Vorschriften und Normen

In der folgenden Tabelle sind die in Abschnitt 3.4 aufgeführten Tätigkeiten zur Förderung der Übernahme von EGNSS in den verschiedenen Marktsegmenten zusammengefasst:

Tabelle 20 – Zusammenfassung der Tätigkeiten zur Förderung der Übernahme von EGNSS (hauptsächlich Vorschriften und Normen)

Marktsegment	System	Art	Organisation	Bezeichnung	Zeitplan	Anmerkung
Alle	GNSS	Norm		Interference and spoofing detection and mitigation techniques (Techniken zur Erkennung und Minderung von Störungen und Spoofing)	frühestmöglich	Wachsende Bedrohung durch Störungen und Spoofing
Bemannte Luftfahrt	EGNOS	Norm	EUROCAE	Minimum Operational Performance Standard for Satellite-Based Augmentation System Airborne Equipment (Mindestbetriebsleistungsnorm für die Bordausrüstung von satellitengestützten Augmentationssystemen)	2023	ED-259A einschließlich Prüfverfahren
Bemannte Luftfahrt	EGNOS	Norm	EUROCAE	Minimum Operational Performance Standard for Satellite-Based Augmentation System Airborne Equipment (Mindestbetriebsleistungsnorm für die Bordausrüstung von satellitengestützten Augmentationssystemen)	2024	ED-259B einschließlich H-ARAIM und institutionelle Szenarien
Bemannte Luftfahrt	Galileo/EG NOS	Norm	ICAO	ICAO Standard and Recommended Practices (SARPs), Annex 10 of the Chicago Convention, Volume 1 Amendment 93 (Richtlinien und Empfehlungen (SARP) der ICAO, Anhang 10 des Abkommens von Chicago, Band 1, Änderung 93)	2023	Änderung des ICAO-Anhangs 10 einschließlich SARP für DFMC-SBAS und Galileo.
Bemannte Luftfahrt	Galileo/EG NOS	Norm	ICAO	ICAO Standard and Recommended Practices (SARPs), Annex 10 of the Chicago Convention, Volume 1 updated version (Richtlinien und Empfehlungen (SARP) der ICAO, Anhang 10 des Abkommens von Chicago, Band 1, aktualisierte Fassung)	2024	Änderung des ICAO-Anhangs 10 einschließlich ARAIM
Bemannte Luftfahrt	Galileo/EG NOS	Norm	ICAO	ICAO Standard and Recommended Practices (SARPs), Annex 10 of the Chicago Convention, Volume 1 updated version	2026	Änderung des ICAO-Anhangs 10 einschließlich Authentifizierung.

Marktsegment	System	Art	Organisation	Bezeichnung	Zeitplan	Anmerkung
				(Richtlinien und Empfehlungen (SARP) der ICAO, Anhang 10 des Abkommens von Chicago, Band 1, aktualisierte Fassung)		
Bemannte Luftfahrt	Galileo	Norm	ICAO	ICAO Standard and Recommended Practices (SARPs), Annex 10 of the Chicago Convention, Volume 1 revised version (Richtlinien und Empfehlungen (SARP) der ICAO, Anhang 10 des Abkommens von Chicago, Band 1, überarbeitete Fassung)	2029	Änderung des ICAO-Anhangs 10 zur Einführung von DFMC-GBAS mit Multikonstellationsfähigkeit und möglicherweise Mehrfrequenz
Bemannte Luftfahrt	DME (für resiliente PNT)	Norm	EUROCAE	Minimum Aircraft System Performance Specification for Required Navigation Performance for Area Navigation (Mindestanforderungen an die Systemleistung eines Luftfahrzeugs in Bezug auf die vorgeschriebene Navigationsleistung für die Flächennavigation)	Juni 2022	ED-75E
Bemannte Luftfahrt	DME (für resiliente PNT)	Norm	EUROCAE	Minimum Operational Performance Standard for distance measuring equipment (DME/N and DME/P) (ground equipment) (Mindestbetriebsleistungsnorm für Entfernungsmessgeräte (DME/N und DME/P) (Bodenausrüstung))	2023	ED-57A
Bemannte Luftfahrt	DME (für resiliente PNT)	Norm	EUROCAE	Minimum Aircraft System Performance Specification (MASPS) for DME Infrastructure supporting PBN positioning (Mindestleistungsspezifikation für das Luftfahrzeugsystem in Bezug auf die DME-Infrastruktur zur Unterstützung der PBN-Positionierung)	2023	Neues Dokument
Unbemannte Luftfahrt	Galileo/EG NOS	Leitlinien	EUROCAE	ED-301 Guidelines for the Use of Multi-GNSS Solutions for UAS Specific Category – Low Risk Operations SAIL I and II (ED-301 Leitlinien für den Einsatz von Multi-GNSS-Lösungen für die UAS-Kategorie „speziell“ – Betrieb mit geringem Risiko SAIL I und II)	Aug. 2022	Umfasst die Nutzung von GNSS für den Drohnenbetrieb mit geringem Risiko

Marktsegment	System	Art	Organisation	Bezeichnung	Zeitplan	Anmerkung
Unbemannte Luftfahrt	Galileo/EG NOS	Leitlinien	EUROCAE	Guidelines for the use of multi-GNSS solutions for UAS: Medium Risk (Leitlinien für den Einsatz von Multi-GNSS-Lösungen für UAS: mittleres Risiko)	2024	Umfasst die Nutzung von GNSS für den Drohnenbetrieb mit mittlerem Risiko
Seeverkehr	EGNOS	Norm	IEC	Test standard for shipborne SBAS (L1) Receiver Equipment (Prüfnorm für schiffsgestützte SBAS(L1)-Empfangsgeräte)	2023	IEC 61108-7
Seeverkehr	EGNOS	Verordnung	EU	Aktualisierung der Durchführungsverordnung (EU) 2022/1157 mit Vorschriften hinsichtlich der Entwurfs-, Bau- und Leistungsanforderungen sowie der Prüfnormen für Schiffsausrüstung , einschließlich SBAS (L1)	2023–2024	1 Jahr nach SBAS-Prüfnorm Die Aktualisierung der Verordnung muss einen Verweis auf IEC 61108-7, IEC 61108-1, IMO MSC 401, IMO MSC 112 enthalten.
Seeverkehr	Galileo	Norm	IMO	Aktualisierung der Leistungsnorm für schiffsgestützte Galileo-Empfangsgeräte	2023–2024	Aktualisierung von IMO MSC 233 „Vorschlagsentwurf zur Information an IMO NCSR 10 vorgelegt“
Seeverkehr	Galileo	Norm	IEC	Aktualisierung der Prüfnorm für schiffsgestützte Galileo-Empfangsgeräte	2025–2026	Aktualisierung von IEC 61108-3
Seeverkehr	Galileo	Verordnung	EU	Aktualisierung der Durchführungsverordnung (EU) 2022/1157 mit Vorschriften hinsichtlich der Entwurfs-, Bau- und Leistungsanforderungen sowie der Prüfnormen für Schiffsausrüstung , einschließlich Galileo	2025–2026	Aktualisierung der IMO-MS-Entscheidung und von IEC 61108-3 Ausgabe 2.0
Seeverkehr	EGNOS	Norm	IMO	Performance standard for shipborne DFMC SBAS + ARAIM Receiver Equipment (Leistungsnorm für schiffsgestützte DFMC-SBAS und ARAIM-Empfangsgeräte)	2025	Der Vorschlag soll im Mai 2023 auf der 107. Sitzung des Schiffssicherheitsausschusses eingereicht werden.
Seeverkehr	EGNOS	Norm	IEC	Test standard for shipborne DFMC SBAS + ARAIM Receiver Equipment (Prüfnorm für schiffsgestützte DFMC-SBAS und ARAIM-Empfangsgeräte)	2027	2 Jahre nach der Leistungsnorm für DFMC-SBAS und ARAIM

Marktsegment	System	Art	Organisation	Bezeichnung	Zeitplan	Anmerkung
Seeverkehr	EGNOS	Verordnung	EU	Aktualisierung der Durchführungsverordnung (EU) 2022/1157 mit Vorschriften hinsichtlich der Entwurfs-, Bau- und Leistungsanforderungen sowie der Prüfnormen für Schiffsausrüstung , einschließlich DFMC SBAS + ARAIM	2027–2028	1 Jahr nach der Prüfnorm für DFMC-SBAS und ARAIM
Binnenwasserstraßen	Galileo/EGNOS	Verordnung	EU	Aktualisierung des Europäischen Standards für Binnenschiffahrtsweginformationssysteme, ES-RIS 2021/1	Alle 2 Jahre	Kann besondere Bestimmungen über PNT und GNSS umfassen
Binnenwasserstraßen	Galileo/EGNOS	Vorbereitende Maßnahmen	EU	EU-Weltraumdaten für autonome Schiffe auf Binnenschiffahrtsstraßen	2023–2025	Bewertung, wie die EU-Weltraumdaten von Galileo, EGNOS und Copernicus den digitalen Wandel entscheidend vorantreiben können
Schieneverkehr	Galileo/EGNOS	Norm	ERA	Technische Spezifikation für die Interoperabilität	2022–2028/2029	Norm zur Erfüllung grundlegender Anforderungen und zur Gewährleistung der Interoperabilität des EU-Eisenbahnsystems
Straßenverkehr	EGNOS	Norm	ETSI 3GPP	Aktualisierung der 3GPP-Norm	2024	Weiterentwicklung der 3GPP-Norm zur Gewährleistung der Konformität mit MOPS-Nachrichten für die Verbreitung von DFMC-GNSS-Signalen über das Mobilnetz
Straßenverkehr	Galileo	Norm	ETSI/CEN	Prüfnorm für GNSS und HAIS	2024	Satz standardisiert (und idealerweise zertifizierter) GNSS- und HAIS-bezogener Prüfungen und Datenbanken, die für die Dienstzertifizierung verwendet werden können
Straßenverkehr	Galileo/EGNOS	Norm	ISO	Intelligent transport systems – Low-speed automated driving system (LSADS) service – Part 2: Gap analysis (Intelligente Verkehrssysteme – Automatisierte	2023–2024	

Marktsegment	System	Art	Organisation	Bezeichnung	Zeitplan	Anmerkung
				Fahrssysteme für niedrige Geschwindigkeiten – Teil 2: Lückenanalyse)		
Straßenverkehr	Galileo/EG NOS	Norm	ISO	Intelligente Verkehrssysteme – Übergangslose Positionierung für den multimodalen Verkehr in ITS-Stationen – Teil 1: Allgemeine Informationen und Festlegungen der Anwendungsfälle	2024–2025	
Straßenverkehr	Galileo/EG NOS	Norm	ISO	Elektronische Gebührenerhebung – Kommunikation zur genauen Ortsbestimmung für autonome Systeme	2024–2025	
Zeitgebung	Galileo	Norm	CEN/CENELEC JTC5	Normen für Galileo-Zeitempfänger	2024–2025	

8 ANHANG D: PNT in der EU – wichtige Interessenträger

Europäische Kommission

Die Europäische Kommission vertritt die allgemeinen Interessen der Europäischen Union und ist die treibende Kraft, wenn es darum geht, dem Europäischen Parlament und dem Rat Gesetzesvorschläge zu unterbreiten, die EU-Politik zu verwalten und umzusetzen, das EU-Recht gemeinsam mit dem Gerichtshof durchzusetzen und Verhandlungen auf internationaler Ebene zu führen. Im Rahmen der europäischen GNSS-Programme trägt die [Europäische Kommission](#) die **Gesamtverantwortung** für die Durchführung des [EU-Weltraumprogramms](#), auch auf dem Gebiet der Sicherheit. Sie **legt** im Einklang mit den Nutzeranforderungen **die Prioritäten und die langfristige Weiterentwicklung** des Programms **fest** und **überwacht** seine Durchführung.

Die [Generaldirektion Verteidigungsindustrie und Weltraum \(GD DEFIS\)](#) leitet die Tätigkeiten der Europäischen Kommission in den Bereichen Verteidigungsindustrie und Weltraum. Die Europäische Kommission sorgt für eine klare Aufteilung der Aufgaben und Zuständigkeiten zwischen den verschiedenen am Programm beteiligten Stellen und koordiniert die Tätigkeiten dieser Stellen. Die Europäische Kommission trägt außerdem dafür Sorge, dass alle an der Durchführung des Programms beteiligten betrauten Stellen die Interessen der Europäischen Union schützen, die wirtschaftliche Verwaltung der Mittel der Europäischen Union garantieren und die Bestimmungen der [Haushaltsordnung](#) einhalten. Die Dienststellen und Exekutivagenturen der Europäischen Kommission haben ihren Sitz in Brüssel (Belgien) und Luxemburg.

Agentur der Europäischen Union für das Weltraumprogramm (EUSPA)

Die EUSPA ist die operative [Agentur der Europäischen Union für das Weltraumprogramm](#) mit Sitz in Prag. Ihre Hauptaufgabe besteht in der Durchführung des EU-Weltraumprogramms sowie der Bereitstellung zuverlässiger und sicherer Weltraumdienste und der Maximierung des sozioökonomischen Nutzens dieser Dienste für die europäische Gesellschaft und Wirtschaft.

Im Kontext von Galileo und EGNOS ist die EUSPA vor allem dafür zuständig, die **Sicherheitsakkreditierung** dieser Systeme zu gewährleisten und Tätigkeiten im Bereich der **Kommunikation, der Marktentwicklung** und der Öffentlichkeitsarbeit im Zusammenhang mit den von diesen Systemen bereitgestellten Diensten durchzuführen. Zu den Aufgaben, mit denen die EUSPA betraut wurde, zählen die **Verwaltung des Betriebs von EGNOS und Galileo** und die Durchführung von Tätigkeiten zur **Entwicklung nachgelagerter Anwendungen** auf der Grundlage der von Galileo und EGNOS bereitgestellten Daten und Dienste. Die EUSPA hat ihren Sitz in Prag (Tschechische Republik).

Europäische Weltraumorganisation (ESA)

Die [Europäische Weltraumorganisation \(ESA\)](#) ist eine internationale Organisation mit 22 Mitgliedstaaten und formellen Kooperationsabkommen mit allen Mitgliedstaaten der Europäischen Union, die nicht Mitglied der ESA sind. Die ESA hat die Aufgabe, für ausschließlich friedliche Zwecke die Zusammenarbeit zwischen den europäischen Staaten auf dem Gebiet der Weltraumforschung und -technologie sowie ihrer Weltraumanwendungen zu gewährleisten und zu fördern, damit sie für wissenschaftliche Zwecke und für operative Weltraumanwendungssysteme genutzt werden können.

In Bezug auf Galileo und EGNOS wurde die ESA mit folgenden Aufgaben betraut: **Weiterentwicklung von Systemen sowie Entwurf und Entwicklung** von Teilen des Bodensegments und von Satelliten einschließlich Erprobung und Freigabe sowie Durchführung **vorgelagerter Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten** in den Fachbereichen der ESA.

Parallel zu den Arbeiten der ESA im Rahmen von Galileo und EGNOS führt die ESA derzeit mehrere FuE-Programme zur Vorbereitung der Technologie der Hauptsysteme und ihrer Anwendungen durch. Die beiden wichtigsten PNT-bezogenen Programme der ESA in diesem Bereich sind das [European GNSS Evolution Programme \(EGEP\)](#) (Europäisches Programm zur Weiterentwicklung von GNSS) und das [Navigation Innovation and Support Programme \(NAVISP\)](#) (Programm für Innovation und Unterstützung der Navigation). Die ESA hat ihren Hauptsitz in Paris (Frankreich).

Agentur der Europäischen Union für Flugsicherheit (EASA)

Die [Agentur der Europäischen Union für Flugsicherheit \(EASA\)](#), die von 31 Mitgliedstaaten (den 27 Mitgliedstaaten der Europäischen Union sowie der Schweiz, Norwegen, Island und Liechtenstein) gegründet wurde, ist eine **Agentur der Europäischen Union**, der spezifische **Regulierungs- und Exekutivaufgaben** im Bereich der **Flugsicherheit** zugewiesen wurden.

Aufgabe der EASA ist es, die **höchsten gemeinsamen Sicherheits- und Umweltschutzstandards** in der Zivilluftfahrt zu fördern. Die EASA arbeitet gemeinsame Sicherheits- und Umweltvorschriften auf europäischer Ebene aus und unterstützt die Europäische Kommission mit Maßnahmen zur Umsetzung dieser Vorschriften sowie dadurch, dass sie die erforderliche technische, wissenschaftliche und verwaltungstechnische Unterstützung zur Erfüllung der Aufgaben der Kommission leistet. Ferner überwacht die EASA die Umsetzung der Standards durch Inspektionen in den Mitgliedstaaten und stellt das erforderliche technische Fachwissen bereit, bietet Schulungen an und führt Forschungsarbeiten durch. Die EASA hat ihren Sitz in Köln (Deutschland).

Eurocontrol

[Eurocontrol](#) ist eine paneuropäische, zivil-militärische internationale Organisation zur **Unterstützung der europäischen Luftfahrt**, die sich für ein nahtloses, europaweites Flugverkehrsmanagement einsetzt. Ihr gehören 41 Mitgliedstaaten an, die über entscheidendes **europäisches Fachwissen auf dem Gebiet des Flugverkehrsmanagements (ATM)** verfügen und Verbesserungen des ATM in ganz Europa anführen und unterstützen. Im Rahmen ihrer Tätigkeiten unterstützt Eurocontrol die Europäische Kommission, die EASA und die nationalen Aufsichtsbehörden bei ihren Regulierungstätigkeiten, auch bei der Einführung von GNSS-Technologien. Eurocontrol hat ihren Sitz in Brüssel (Belgien).

Gemeinsames Unternehmen SESAR

Das [gemeinsame Unternehmen SESAR](#) wurde gemäß der [Verordnung \(EG\) Nr. 219/2007 des Rates](#) als öffentlich-private Partnerschaft eingerichtet. Durch die [Verordnung \(EU\) 2021/2085 des Rates](#) wurde das gemeinsame Unternehmen SESAR 3 offiziell gegründet, in dem die **EU, Eurocontrol und mehr als 50 Luftfahrtorganisationen** (zivile und militärische Interessenträger, Anbieter von Flugsicherungsdiensten, Flughäfen, Ausrüstungshersteller, Behörden und Wissenschaftskreise) zusammengeschlossen sind.

Das **gemeinsame Unternehmen SESAR zeichnet für die Modernisierung des europäischen ATM-Systems verantwortlich** und **koordiniert** zu diesem Zweck **alle ATM-relevanten Forschungs- und Innovationsanstrengungen** in der EU. Es ist auch zuständig für die Umsetzung des [europäischen ATM-Masterplans](#) sowie für die Durchführung spezifischer Tätigkeiten zur Entwicklung des ATM-Systems der neuen Generation, mit dem in den kommenden 30 Jahren ein sicherer, umweltfreundlicher und flüssiger Luftverkehr in Europa gewährleistet werden kann. Im Rahmen des gemeinsamen Unternehmens SESAR 3 werden zwischen 2022 und 2030 Investitionen von mehr als 1,6 Mrd. EUR getätigt, um durch Forschung und Innovation die Verwirklichung eines inklusiven, resilienten und nachhaltigen digitalen europäischen Luftraums zu beschleunigen. Das gemeinsame Unternehmen SESAR hat seinen Sitz in Brüssel (Belgien).

Europäische Agentur für die Sicherheit des Seeverkehrs (EMSA)

Die [Europäische Agentur für die Sicherheit des Seeverkehrs \(EMSA\)](#) leistet der Europäischen Kommission sowie den Mitgliedstaaten, Island und Norwegen technische Hilfestellung und Unterstützung bei der **Ausarbeitung und Einführung von EU-Rechtsvorschriften zur Seeverkehrssicherheit**, zur Verschmutzung durch Schiffe und durch Öl- und Gasanlagen, zur Intervention bei Ölverschmutzungen, zur Gefahrenabwehr auf Schiffen und in Häfen, zur Überwachung von Schiffen sowie zur Fernidentifizierung und -verfolgung von Schiffen.

Die EMSA **sorgt dafür, dass die Umsetzung von Rechtsvorschriften und Standards der EU überprüft und überwacht werden**. Die Agentur leistet technische Hilfe und wissenschaftliche Beratung in Fragen im Zusammenhang mit Sicherheitsstandards für Schiffe und unterstützt zudem den Kapazitätsaufbau, indem sie Fachwissen bereitstellt, Schulungen anbietet, Forschungen durchführt sowie Zusammenarbeit ermöglicht und Instrumente zur Verfügung stellt. Ferner beteiligt sich die EMSA in enger Zusammenarbeit mit der Europäischen Kommission und den Mitgliedstaaten an der Verbreitung bewährter Verfahren und der Förderung einer nachhaltigen Schifffahrt, einschließlich der Umsetzung und Durchsetzung bestehender oder vorgeschlagener

internationaler und EU-Rechtsvorschriften, sowie an der **Kooperation mit zahlreichen Interessenträgern der Industrie und öffentlichen Stellen**. Die EMSA hat ihren Sitz in Lissabon (Portugal).

Eisenbahnagentur der Europäischen Union (ERA)

Aufgabe der [Eisenbahnagentur der Europäischen Union \(ERA\)](#) ist es, „Europa zu einem nachhaltigen und sicheren Eisenbahnsystem ohne Grenzen zu bewegen“. Dazu **trägt die ERA in technischen Angelegenheiten zur Durchführung der EU-Rechtsvorschriften bei**, die darauf abzielen, die Wettbewerbsfähigkeit des Eisenbahnsektors durch eine **Erhöhung der Interoperabilität der Eisenbahnsysteme** zu verbessern, ein gemeinsames Konzept für die Sicherheit des europäischen Eisenbahnsystems zu entwickeln und zur Schaffung eines europäischen Eisenbahnraums ohne Grenzen beizutragen, **der ein hohes Sicherheitsniveau gewährleistet**.

Auf Satellitenanwendungen basierende Zugnavigrations- und -ortungssysteme sind künftige Komponenten des Teilsystems für Zugsteuerung, Zugsicherung und Signalgebung. Die ERA legt entsprechend die Regeln für die Genehmigung dieser Systeme fest, und zwar unter Berücksichtigung der von den Eisenbahnunternehmen durchgeführten Erprobungen und der Systementwicklung, die unter der Schirmherrschaft des gemeinsamen Unternehmens [Shift2Rail](#) erfolgt, an dem die ERA beteiligt ist. Dieses gemeinsame Unternehmen ist die erste europäische Initiative für den Schienenverkehr, mit der sowohl zielgerichtete Forschung und Innovation als auch marktorientierte Lösungen unterstützt werden sollen, indem die Integration neuer, modernster Technologien in innovative Schienenverkehrsprodukte beschleunigt wird. Die ERA hat ihren Sitz in Valenciennes (Frankreich) und Lille (Frankreich).

Europäisches Forum für Seefunknavigation (EMRF)

Das Europäische Forum für Seefunknavigation (EMRF) **vertritt die maritimen Interessen in Europa und leistet fachkundige Beiträge zur europäischen Politik** im Bereich der Sicherheit der Schifffahrt und damit zusammenhängenden Fragen.

Das EMRF vereint verschiedene Einrichtungen, von Schifffahrtsverwaltungen bis hin zu Reederverbänden, und konzentriert sich auf die Koordinierung der europäischen maritimen Interessen im Bereich der Funknavigationssysteme für die Entwicklung in Europa. Insbesondere in Bezug auf globale Satellitennavigationssysteme werden innerhalb des EMRF verschiedene Tätigkeiten durchgeführt, die die Nutzung von GNSS betreffen, vor allem die Verbesserungen bei der Ortung und den damit verbundenen Verfahren, die Galileo und EGNOS für den maritimen Bereich bringen können.

Zu den Hauptzielen des EMRF gehören die Förderung der **maritimen Anforderungen für die Sicherheitsbewertung und Zertifizierung zukünftiger Satellitensysteme** sowie ihrer Augmentationssysteme und Backup-Systeme und die Entwicklung von Materialien, mit denen die Anerkennung und Betriebszulassung dieser Systeme als Teil des weltweiten Funknavigationssystems der IMO erreicht werden können.

Mitgliedstaaten

Im Mittelpunkt der EU stehen ihre [27 Mitgliedstaaten](#) und deren Bürgerinnen und Bürger. Das Alleinstellungsmerkmal der EU ist, dass alle diese Staaten souverän und unabhängig bleiben, aber einige ihrer hoheitlichen Befugnisse in Bereichen bündeln, in denen daraus ein Mehrwert entsteht.

Die Rolle der Mitgliedstaaten in Bezug auf PNT umfasst die Unterstützung und Beteiligung an der Ausarbeitung und Umsetzung von PNT-relevanten Rechtsvorschriften, Strategien und Maßnahmen, die Koordinierung mit anderen Mitgliedstaaten und den EU-Organen sowie den Beitrag zur Entwicklung neuer PNT-Technologien und -Anwendungen.

Die Mitgliedstaaten sind in verschiedenen Funktionen an PTN beteiligt:

- [Hauptnutzer](#) des Galileo-PRS und Behörden für SAR;
- [nationale Weltraumagenturen](#), die für die europäischen GNSS-Programme von zentraler Bedeutung sind;
- [nationale Frequenzagenturen](#), die das Funkfrequenzspektrum verwalten, die Koordinierung gewährleisten und bei RFI-Vorfällen intervenieren;

- Verkehrsministerien, die die Nutzung von sicherheitskritischen GNSS-Anwendungen in verschiedenen Bereichen wie Luft- und Seeverkehr unterstützen und überwachen.

Schließlich unterstützen die Mitgliedstaaten das Notfallmanagement bei größeren RFI-Vorfällen oder GNSS-Ausfällen, da sie bei der Koordinierung zwischen den betroffenen Akteuren eine zentrale Rolle spielen.

Sonstige Interessenträger

Die folgenden Interessenträger sind im Hinblick auf PNT-Dienste ebenfalls relevant:

- [Europäische Verteidigungsagentur \(EDA\)](#),
- [Internationale Zivilluftfahrt-Organisation \(ICAO\)](#),
- [Internationale Seeschiffahrtsorganisation \(IMO\)](#),
- [Internationaler Verband der Seezeichenverwaltungen \(IALA\)](#).

9 ANHANG E: EU-Bezugsrahmen

Die **GNSS-Ortung stützt sich auf das terrestrische Bezugssystem** (TRS, mit mathematischen und physikalischen Grundlagen für seine Definition und Eigenschaften) und den terrestrischen Bezugsrahmen (TRF, eine numerische Realisierung des TRS). Der am häufigsten verwendete Bezugsrahmen ist der internationale terrestrische Bezugsrahmen (ITRF), der für die kontinuierliche Überwachung der Bewegungen der tektonischen Platten der Erde (1,5 cm/Jahr für den größten Teil Europas) oder des mittleren Meeresspiegels mithilfe von kontinuierlich arbeitenden Referenzstationen (continuous operating reference stations, CORS), an denen kontinuierlich GNSS-Empfänger betrieben werden, von entscheidender Bedeutung ist.

Seit Jahrhunderten hat jedes Land sein lokales Netz und seine Mapping-Transformation beibehalten (d. h. die beste Anpassung der 2D-Landeskarten an ein globales Ellipsoid), um Transformationsfehler durch den unterschiedlichen Skalenfaktor zu verringern. Physisch wurden diese nationalen Netze anhand trigonometrischer Punkte eingerichtet. Gegenwärtig bewegen sich die **Mapping-Dienste der Länder** vom klassischen Ansatz weg und verwenden in großem Umfang Netz-RTK, die über ein Netz von CORS aufrechterhalten wird und somit auf GNSS basiert.

Dieser Trend, GNSS als globale Referenz zu nutzen, dürfte sich auf alle PNT-Aspekte ausweiten, insbesondere angesichts der für die Zukunft erwarteten Zunahme von hochpräzisen PNT-Diensten. Da das Skalenfaktor-Konzept anfällig für falsche Interventionen des Menschen ist, verlagern sich sogar die Kartierung und terrestrische Ingenieursarbeiten von nationalen Netzen zu GNSS-gestützten lokalen Netzen (in der Regel mit Helmert-Transformation).

Dieser Anhang enthält die wichtigsten TRF aus europäischer Sicht sowie einfache Leitlinien für bewährte Verfahren in Bezug auf ihre Verwendung.

Bezugsrahmen

Das internationale terrestrische Bezugssystem (ITRS) wurde von der geodätischen Gemeinschaft unter der Schirmherrschaft des internationalen Dienstes für Erdrotation und Referenzsysteme (International Earth Rotation and Reference Systems Service, IERS) entwickelt. Seine genaueste Realisierung ist der internationale terrestrische Bezugsrahmen (ITRF), der in Wirklichkeit eine Reihe von verbesserten Versionen des ITRF ist. Die neueste Version ist der ITRF2020, allerdings werden einige frühere ITRF-Versionen (in der Regel nicht älter als ITRF2000) möglicherweise noch verwendet. Eine Transformation zwischen den Rahmen ist möglich, wenn die Definition und die Epochen beider Rahmen bekannt sind. Während frühere Rahmen seit ITRF94 bis auf die Dezimeterebene geändert wurden (seit ITRF2005 für die Höhenkomponente), liegen die Unterschiede auf der Millimeterebene. Dass zu verschiedenen Zeitpunkten aktualisierte Rahmen eingerichtet werden, trägt in erster Linie dem Effekt der Plattentektonik Rechnung.

Für Galileo wird der terrestrische Bezugsrahmen für Galileo (GTRF) verwendet, der durch den Galileo Geodetic Reference Service Provider realisiert und seit 2018 durch den Galileo Service Operator verwaltet wird. Die neueste GTRF-Lösung (GTRF19v01) ist mit einer Genauigkeit im Millimeterbereich an den ITRF2014 angepasst. Auch andere GNSS-Systeme haben den ITRF als Bezugsrahmen übernommen, und alle beziehen sich derzeit auf ITRF2014.

Das Europäische Terrestrische Referenzsystem 1989 (ETRS89) basiert auf dem ITRF89, Epoche 1989.0, und wird von einem Netz von rund 250 permanenten GNSS-Tracking-Stationen, dem EUREF Permanent Network, überwacht. Da das ETRS89 auf die Epoche 1989.0 festgelegt ist, unterscheiden sich das ETRS89 und das ITRS aufgrund der europäischen Kontinentaldrift (etwa 2,5 cm pro Jahr). Anfang 2023 betrug der Unterschied mehr als 80 cm.

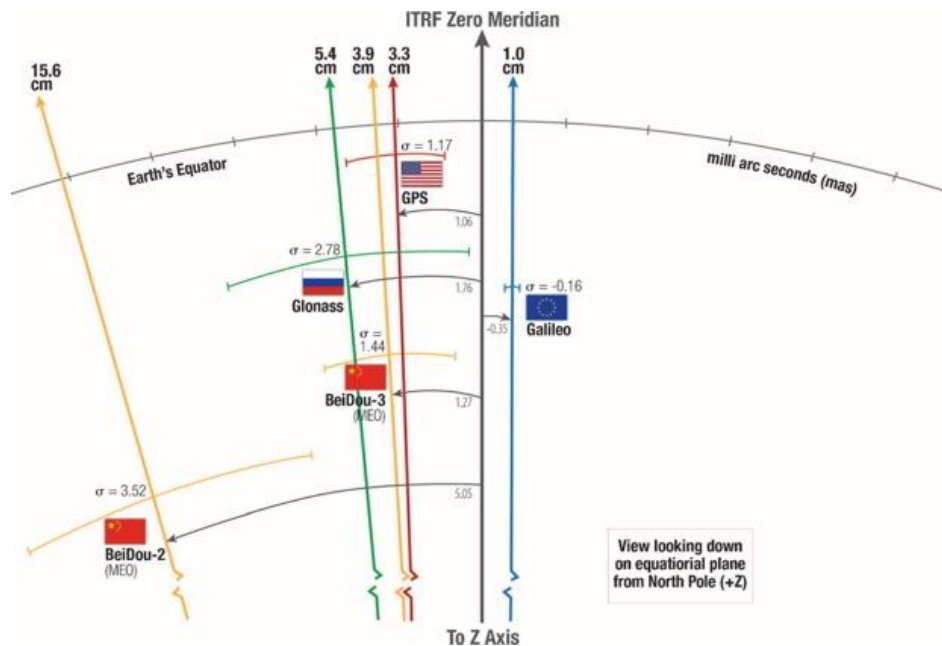


Abbildung 66 – Vergleich eines vom GNSS-TRF realisierten Bezugsmeridians mit dem IGS14-Nullmeridian (Quelle: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117720308292>)

Für weitere Informationen zu Bezugsrahmen, Transformationen und IGS-Produkten siehe:

- P. Teunissen und O. Montenbruck, *Springer handbook of global navigation satellite systems*, Springer International Publishing, 2017.
- Y. J. Morton, F. S. T. Van Diggelen, J. J. Spilker und B. W. Parkinson, Hrsg., *Position, navigation, and timing technologies in the 21st century: Integrated satellite navigation, sensor systems, and civil applications*, Erste Ausgabe. Hoboken: Wiley/IEEE Press, 2021.

Bewährte Verfahren

Ausgehend von den obigen Ausführungen und als Faustregel sollte bei **Koordinatangaben stets auf den Zeitpunkt der Errichtung des betreffenden ITRF verwiesen werden**. Für die meisten Länder Kontinentaleuropas ist der ETRS89 der perfekte Ersatz. In bestimmten Gebieten mit erhöhter tektonischer Aktivität, z. B. Griechenland, erfordert die Transformation bekannte Standortgeschwindigkeiten. Dies schließt jegliche Diskontinuität aufgrund von Erdbeben aus (die Punkte müssen neu festgelegt werden).

Im Falle eines GNSS-gestützten Systems ist zu beachten, dass sich NRTK- und PPP-Bezugsrahmen tendenziell unterscheiden. In Europa sind die meisten NRTK-CORS damit auch die endgültigen Koordinaten im Rahmen des ETRF89 definiert. Für die PPP wird der terrestrische Bezugsrahmen (in der Regel der neueste ITRF) durch das Datum der Korrekturen definiert. In ähnlicher Weise wird der EGNOS-Bezugsrahmen durch die geodätischen Koordinaten der EGNOS-Stationen (Stationen zur Entfernungsmessung und Integritätsüberwachung) bestimmt, die im [ITRF2000](#) etabliert sind.

Bei terrestrischen Systemen sollte nur bei Einsatz in kleinem Maßstab (unter 10 km²) und in Innenräumen eine lokale Netzimplementierung verwendet werden, sofern sich die Koordinaten auf das ETRF (ITRF einschließlich Transformationsepoche) beziehen. Vorgeschlagen werden von GNSS bereitgestellte lokale Netze via [Helmert-Transformation](#).

Für jeden größeren Einsatz sollte das ETRF/ITRF direkt verwendet werden. Es sei darauf hingewiesen, dass die Verwendung der globalen Koordinaten nicht intuitiv ist (der Abstand zwischen Breiten- und Längengrad variiert mit dem Längengrad, und die kartesische XYZ-Höhenkomponente ist schwer lesbar), sodass für die Visualisierung (nicht aber für das zugrunde liegende System) wahrscheinlich lokale Koordinaten verwendet werden.

10 ANHANG F: ABKÜRZUNGEN

Nachstehend findet sich das Abkürzungsverzeichnis:

ABAS	Luftfahrzeuggestütztes Augmentationssystem (aircraft-based augmentation system)	ESA	Europäische Weltraumorganisation (European Space Agency)
ACAS	Unterstützter CAS (assisted CAS)	ETCS	Europäisches Zugsicherungs- und Zugsteuerungssystem (European Train Control System)
ADS-B	Automatische bordabhängige Flugüberwachung – RundsendebetrieB (automatic dependant surveillance – broadcast)	ETSI	Europäisches Institut für Telekommunikationsnormen (European Telecommunication Standard Institute)
AIS	Automatisches Identifikationssystem	EUSPA	Agentur der Europäischen Union für das Weltraumprogramm (European Union Agency for the Space Programme)
ARAIM	Moderne autonome empfangerseitige Integritätsüberwachung (advanced receiver autonomous integrity monitoring)	FAA	US-amerikanisches Luftfahrtbundesamt (Federal Aviation Administration)
ASF	Zusätzlicher sekundärer Faktor (additional secondary factor)	FCC	US-amerikanische Bundesbehörde für das Fernmeldewesen (Federal Communications Commission)
ATC	Flugverkehrskontrolle (air traffic control)	FDMA	Vielfachzugriff im Frequenzmultiplex (frequency division multiple access)
ATM	Flugverkehrsmanagement (air traffic management)	FOC	Volle Betriebsfähigkeit (full operation capability)
AtoN	Navigationshilfen (aids to navigation)	G2G	Galileo – 2. Generation
BVLOS	Außerhalb direkter Sicht (beyond visual line of sight)	GBAS	Bodengestütztes Augmentationssystem (ground-based augmentation system)
CAS	Kommerzieller Authentifizierungsdienst (commercial authentication service)	GEO	Geostationäre Erdumlaufbahn (geostationary Earth orbit)
KNA	Kosten-Nutzen-Analyse	GIS	Geografisches Informationssystem
CDMA	Vielfachzugriff im Codemultiplex (code division multiple access)	GIVE	Ionosphärischer Vertikalfehler des Netzes (grid ionospheric vertical error)
CER	Gemeinschaft der Europäischen Eisenbahnen (Community of European Railway)	GLA	Allgemeine Seezeichenverwaltungen (general lighthouse authorities) des Vereinigten Königreichs und Irlands
KNI	Kritische nationale Infrastruktur	GLONASS	Globalnaya Navigazionnaya Sputnikovaya Sistema (Satellitennavigationssystem Russlands)
CNS	Kommunikation, Navigation und Überwachung (communication, navigation and surveillance)	GMDSS	Weltweites Seenot- und Sicherheitsfunksystem (Global Maritime Distress and Safety System)
COG	Kurs über Grund (course over ground)	GNSS	Globales Satellitennavigationssystem (global navigation satellite system)
DFMC	Zweifrequenz-Multikonstellation (dual-frequency multi-constellation)	GPS	Global Positioning System
DGNSS/ DGPS	Differenzielles globales Satellitennavigationssystem (differential global navigation satellite system)/Differenzielles globales	GSC	GNSS-Dienstzentrum (GNSS Service Centre)

DOP	System zur Positionsbestimmung (differential global positioning system) Verringerung der Genauigkeit (dilution of precision)	GSS	Galileo-Sensorstation
EASA	Europäische Agentur für Flugsicherheit (European Aviation Safety Agency)	HAL	Horizontale Alarmgrenze (horizontal alert limit)
EK	Europäische Kommission	HAS	Hochpräzisionsdienst (high-accuracy service)
EDAS	EGNOS-Datenübertragungsdienst (EGNOS data access service):	HMI	Gefährlich irreführende Informationen (hazardously misleading information)
EGNOS	Europäische Augmentation des geostationären Navigationssystems (European Geostationary Navigation Overlay Service)	HPL	Horizontale Sicherheitsebene (horizontal protection level)
EMRF	Europäisches Forum für Seefunknavigation (European Maritime Radio Navigation Forum)	IALA	Internationaler Verband der Seezeichenverwaltungen (International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities)
ERA	Europäische Eisenbahnagentur (European Railway Agency)	ICAO	Internationale Zivilluftfahrt-Organisation (International Civil Aviation Organization)
ERNP	Europäischer Funknavigationsplan (European Radionavigation Plan)	ICG	Internationaler Ausschuss für GNSS (International Committee on GNSS)
ERTMS	Europäisches Zugsicherungs- und Zugsteuerungssystem (European Train Control System)	IEC	Internationale Elektrotechnische Kommission (International Electrotechnical Commission)
IGS	Internationaler GNSS-Dienst (International GNSS Service)	RNP	Vorgeschriebene Navigationsleistung (required navigation performance)
IMO	Internationale Seefahrtskommission (International Maritime Organization)	RPAS	Ferngesteuertes Flugsystem (remotely piloted aircraft system)
IMU	Trägheitsplattform (inertial measurement unit)	RTCA	Funktechnische Kommission für die Luftfahrt (Radio Technical Commission for Aeronautics)
IoT	Internet der Dinge (Internet of Things)	RTCM	Funktechnikkommission für Seefunkdienste (Radio Technical Commission Maritime for Maritime Services)
ISM	Nachricht zur Integritätsunterstützung (integrity support message)	RTK	Echtzeit-Kinematik (real time kinematic)
IVS	Intelligente Verkehrssysteme	SAR	Suche und Rettung (search and rescue)
ITU	Internationale Fernmeldeunion (International Telecommunication Union)	SARPS	Richtlinien und Empfehlungen (standard and recommended practices)
JRC	Gemeinsame Forschungsstelle (Joint Research Centre)	SAS	Signalauthentifizierungsdienst (signal authentication service)
LBS	Standortgestützter Dienst (location-based service)	SBAS	Satellitengestütztes Augmentationssystem (satellite-based augmentation systems)
LEO	Erdnahe Umlaufbahn (low Earth orbit)	SDD	Dokument mit der Dienstdefinition (service definition document)
LIDAR	Lasererfassung und Entfernungsmessung (light detection and ranging)	SES	Einheitlicher europäischer Luftraum (Single European Sky)
MEO	Mittlere Erdumlaufbahn (medium Earth orbit)	SESAR	Forschung zum Flugverkehrsmanagementsystem für den

MFMC	Mehrfrequenz-Multikonstellation (multi-frequency multi-constellation)	SOG	einheitlichen europäischen Luftraum (Single European Sky ATM Research)
MOPS	Mindestbetriebsleistungsnorm (minimum operational performance standard)	SIS	Geschwindigkeit über Grund (speed over ground) Weltraumsignal (signal in space)
MSC	Schiffssicherheitsausschuss (Maritime Safety Committee)	SoL	Sicherheitskritischer Dienst (safety of life service)
MSI	Dienst für Informationen zur Sicherheit im Seeverkehr (maritime safety information service)	SOLAS	Schutz des menschlichen Lebens auf See (safety of life at sea)
NLOS	Nicht gradlinig (non-line of sight)	SPP	Einzelpunkt-Positionierung (single point positioning)
NMI	Nationales Metrologieinstitut (national metrology institute)	SSR	Zustandsraum-Repräsentation (state space representation)
OS	Offener Dienst (open service)	STL	Satellitenzeit und -ortung (satellite time and location)
OSNMA	Authentisierung von Navigationsnachrichten im offenen Dienst (open service navigation message authentication)	TEC	Gesamtelektronengehalt (total electron content)
PBN	Leistungsbasierte Navigation (performance-based navigation)	ToA	Ankunftszeit (time of arrival)
PNT	Ortung, Navigation und Zeitgebung (positioning, navigation and timing)	TSI	Technische Spezifikation für die Interoperabilität
PPP	Präzise Punktpositionierung	TTA	Zeit bis Alarm (time to alarm)
PRS	Öffentlicher regulierter Dienst (public regulated service)	TTFF	Zeit bis zur ersten Positionsbestimmung (time to first fix)
PVT	Position, Geschwindigkeit und Zeit (position, velocity and time)	UAM	Urbane Luftmobilität (urban air mobility)
QZSS	Quasi-Zenith Satellite System	UAS	Unbemanntes Luftfahrtsystem (unmanned aircraft system)
RAIM	Autonome empfängerseitige Integritätsüberwachung (receiver autonomous integrity monitoring)	UTC	Koordinierte Weltzeit (Universal Coordinated Time)
RF	Funkfrequenz (radio frequency)	VAL	Vertikale Alarmgrenze (vertical alert limit)
RFI	Funkfrequenzstörung (radio frequency interference)	VDES	Datenaustausch-System auf UKW-Kanälen (VHF data exchange system)
RIMS	Stationen zur Überwachung des Signals und seiner Integrität (ranging and integrity monitoring stations)	WAAS	Wide Area Augmentation System
RLS	Rückkanaldienst (return link service)	WWRNS	Weltweites Funknavigationssystem (world-wide radionavigation system)