

Alles auf Anfang? Satellitennavigation aus dem niedrigen Erd-Orbit (LEO-PNT)

Everything back to Square One? Satellite Navigation from Low Earth Orbit (LEO-PNT)

Bernd Eissfeller

Zusammenfassung

Seit etwa 2017 sind ca. zehn spezielle Satellitennavigationssysteme in Entwicklung, die den niedrigen Erd-Orbit verwenden wollen (LEO-PNT). Hinzu kommen noch verschiedene Konzepte, die auf der Nutzung von Kommunikationssignalen der Megakonstellation wie Starlink, OneWeb und Kuiper aufbauen. Sämtliche Entwicklungen sind noch in einer Frühphase. Aus geodätischer Sicht ist der niedrige Erd-Orbit für PNT (Positioning Navigation and Timing) aus den Anfängen der Satellitengeodäsie in den 1970er Jahren mit allen Vor- und Nachteilen durch die Nutzung von TRANSIT bestens bekannt. Durch die derzeit vielfältigen LEO-PNT-Aktivitäten ist auch für Insider eine unübersichtliche Situation entstanden. In dem vorliegenden Artikel soll ein Überblick über die unterschiedlichen Konzepte und Systeme gegeben werden. Primäre Systemparameter, wie die Wahl der Trägerfrequenz, werden kritisch diskutiert.

Schlüsselwörter: LEO-PNT, Mega-Konstellationen, Signals-of-Opportunity (SOOP), C-Band, Präzise Punktbestimmung

Summary

Since 2017, about ten dedicated LEO-PNT (low-earth-orbit positioning, navigation & timing) activities are under way on a worldwide basis. Additionally, concepts are investigated, which make use of communication signals from Starlink, OneWeb, Kuiper and others. All developments are in an early phase. In geodesy, the low-earth orbit for PNT is historically known from the Doppler navigation system TRANSIT in the 1970's. TRANSIT was an important step in the practical application of satellite geodesy. Because of the many promoted LEO-PNT concepts, the situation is unclear and confusing. In this paper, we try to give a top-level overview about the different concepts and developments. Primary system parameters like the carrier-frequency of choice is critically discussed.

Keywords: LEO-PNT, Mega Constellations, Signals-of-Opportunity (SOOP), C-Band, Precise Point Positioning

1 Einführung

Die Konstellationen der globalen Satellitennavigationssysteme GPS, Galileo, Beidou, GLONASS verwenden einen mittleren Erdorbit (MEO: Mean Earth Orbit) mit einer Bahnhöhe von rd. 20.000 km. Diese MEO-PNT (Positioning, Navigation, Timing aus dem MEO)-Systeme und ihre regionalen Ergänzungen zeigen heute einen hohen Reifegrad, obwohl alle Systeme aufgrund von Modernisierungsaktivitäten noch nicht fertiggestellt sind. Insgesamt finden wir ~110 operationelle MEO GNSS-Satelliten (GPS: 31, Galileo: 25, Beidou: 27, GLONASS: 24) im Weltraum und 6,1 Milliarden GNSS L-Band-Empfänger im Weltmarkt (EUSPA 2024, S. 21). Zusätzlich werden derzeit neun weltraumgestützte Ergänzungssysteme (WAAS, EGNOS, MSAS, GAGAN usw.) im geostationären Orbit (GEO) bereitgestellt bzw. entwickelt. Hinzu kommen noch die regionalen Ergänzungssysteme (NavIC) über dem indischen Ozean und das QZSS (Quasi-Zenith Satellite System) im pazifischen Raum. Letztere verwenden inklinierte geosynchrone Bahnen (IGSO) und inklinierte hoch-elliptische Bahnen (HEO).

Fast unbemerkt von weiten Teilen der GNSS-Nutzergemeinschaft wurden seit etwa 2017 massiv neue Konzepte (Reid 2017) entwickelt, die auf den niedrigen Erdorbit (LEO: Low Earth Orbit) zurückgreifen. Mittlerweile sind mehr als 10 LEO-PNT-Konzepte weltweit erkennbar. Alle GNSS-Systembetreiber, Raumfahrtagenturen und Privatfirmen favorisieren ein spezielles Konzept. Hinzu kommen die Anbieter von Diensten der Satellitenkommunikation (z. B. Starlink, OneWeb, Iridium, Amazon Kuiper) sowie die US Space Forces. Man kann mit Fug und Recht feststellen, dass eine richtige Euphorie beim Thema LEO-PNT ausgebrochen ist. Diese Euphorie ist teilweise berechtigt, da ein gut durchdachtes und vernünftig konzipiertes LEO-PNT-System bestehende Lücken des MEO-PNT schließen kann. Auf der anderen Seite ist die Euphorie deutlich überhöht. Dies führt dazu, dass teilweise das »Rad neu erfunden« wird, und technische Annahmen getroffen werden, die in 65 Jahren Satellitennavigation (seit TRANSIT) bereits mehrfach als überholt verworfen wurden. Trotzdem ist diese Entwicklung für Geodäten der 1970er Jahre sehr interessant, da zum einen die Rückbesinnung auf den LEO-Orbit ziemlich unerwartet gekommen ist, und zum anderen die Erfahrungen mit dem realen TRANSIT-Doppler-Navigationssystem wieder verwendet werden können.



Abb. 1: Animation einer LEO-PNT Konstellation mit 300 Satelliten (XONA Space Systems, Reid 2022) im 1000-km-Orbit

Was hat zu dieser Rückbesinnung der Satellitennavigation aus dem niedrigen Erdorbit geführt?

Um diese Frage zu beantworten, muss man drei wesentliche Impulse sehen:

- Die Anforderungen der GNSS-Nutzer (Genauigkeit, Verfügbarkeit, Integrität, Kontinuität, Resilienz) sind in fast allen Anwendungsbereichen in den letzten Jahren immer weiter gestiegen.
- Trotz der Reife der MEO-PNT-Systeme können die Anforderungen vieler »High-End«-Nutzer nicht mehr erfüllt werden. Dies hat bei den GNSS-Nutzern zu einer gewissen Frustration geführt: Die Stör- und Täuschfestigkeit des GNSS reicht für sicherheitskritische Anwendungen nicht aus. Für hochpräzise Nutzer lässt die Konvergenzzeit und Zuverlässigkeit bei der Bestimmung der Phasemehrdeutigkeiten noch Wünsche offen.
- Die Entwicklung von Mega-Konstellationen nach dem New-Space-Paradigma hat zum Bau von kostengünstigen Kleinsatelliten und zu sehr niedrigen Launch-Kosten (60 Satelliten pro Rakete) für den Zugang zum Welt- raum geführt. Zur Kostenreduktion von Satellit und Nutzlast setzt man hierbei auf den Einbau kommerzieller Bauteile (COTS, Industriestandard), was natürlich auch zusätzliche Risiken (z. B. Einfluss der Weltraumstrahlung) mit sich bringt.

Mit einem LEO-PNT (Abb. 1) lassen sich prinzipiell die Performance-Lücken der MEO-PNT-Systeme schließen. Durch die niedrigere Bahnhöhe (< 1200 km) sind höhere Leistungspegel der Signale an der Erdoberfläche bei kleinerer Hochfrequenz-Leistung der Satellitennutzlast leicht erreichbar. Eine niedrigere Bahnhöhe führt in der schnelleren Relativbewegung vom Satelliten zum Nutzer auf der Erde zu einer größeren Dopplerverschiebung der empfangenen Trägerfrequenz. Ein höherer Leistungspegel impliziert eine höhere Störfestigkeit, und der höhere Dopplereffekt eine schnellere Auflösung der Phasemehrdeutigkeit

(Konvergenzzeit). Sollte es dann noch zutreffen, dass man das LEO-PNT zu einem Bruchteil der MEO-Kosten realisieren kann, entsteht eine äußerst lukrative Alternative für die MEO-Systeme. Soweit zunächst mal die Vision der Akteure und Promoter.

In dem Papier wollen wir zunächst einen Überblick über die bestehenden LEO-PNT-Entwicklungen inklusive der Vor- und Nachteile solcher Systeme geben. Generell sind vier Konzepte erkennbar, um Navigationssignale aus dem LEO für PNT nutzbar zu machen. Der Schwerpunkt des Papiers liegt auf den sogenannten dedizierten Systemen, da diese das größte Potenzial haben, die Performance-Lücken der MEO-Systeme zu schließen. Die anderen Konzepte werden jedoch erwähnt. Das Ziel des Papiers ist es, bei aller Euphorie, eine möglichst objektive Einschätzung zu geben. Die Gemeinsamkeiten der LEO-PNT-Konzepte enden sehr schnell bei der Bahnhöhe von ca. 1200 km (eine höhere Bahn kann man aufgrund der Weltraumstrahlung und der Einwirkung auf industrielle Bauteile nicht verwenden). Zwischen den LEO-PNT-Vorschlägen gibt es viele technische und nicht-technische Unterschiede. Wir haben es mit einer komplexen bzw. unübersichtlichen Situation zu tun. Es zeigt sich, dass der wesentliche Systemparameter, der die Performance und Machbarkeit des LEO-PNT bestimmt, die Trägerfrequenz ist, auf der die Navigationsnutzlast im Orbit sendet. Die Variation in den Frequenzen der LEO-PNT-Konzepte ist hierbei sehr groß: VHF/UHF, L-Band, S-Band, C-Band bis zu Ku-Band. Die Trägerfrequenz bzw. die Wellenlänge des Trägers bestimmt vielfältige Eigenschaften eines GNSS: Dämpfungseffekte durch Atmosphäre und Laub, erreichbares Signal-zu-Rauschverhältnis, nutzbare Signalbandbreite, Größe der Mehrwegeausbreitung und Komplexität der Endgeräte.

Wird also alles wieder auf Anfang gestellt bei GNSS? Die Antwort beinhaltet ein kleines Ja, was den LEO-Orbit und die TRANSIT-Erfahrungen betrifft, aber ein großes Nein: Ein LEO-PNT, wie es auch immer ausgelegt ist, muss sich in die Welt der heutigen Satellitennavigation einpassen, so wie diese sich seit 1960 entwickelt hat, und modernste Technologien einsetzen.

2 Vor- und Nachteile der LEO-PNT-Systeme

Über die letzten Jahre ist bereits ein umfangreiches Schrifttum zum Thema LEO-PNT entstanden. Als technische Referenzen, die eine gute Übersicht über die Thematik des LEO-PNT geben, verweisen wir auf Reid et al. (2018) und Prol et al. (2022).

Im Vergleich zu MEO-PNT hat das LEO-Konzept nicht nur Vorteile, sondern auch vielfältige Nachteile, die man bei einer Einschätzung berücksichtigen muss.

2.1 LEO-PNT: Vorteile

Die Vorteile des LEO-PNT ergeben sich im Wesentlichen durch die niedrigere Bahnhöhe (< 1200 km) und kleinere Satelliten, die mit COTS (Commercial-of-the-Shelf)-Bauteilen hergestellt werden:

- Potenziell niedrigere Freiraumdämpfung (nur bei identischer Trägerfrequenz MEO-LEO),
- höhere Relativgeschwindigkeit (Satellit – Nutzer) (ca. Faktor 6–8 in Distanzänderung pro Zeit):
 - schnellere Veränderung der Geometrie (Satellit – Nutzer),
 - die Konvergenzzeiten bei PPP reduzieren sich (ca. Faktor 10), präzise Positionierung wird schneller und zuverlässiger (Mehrdeutigkeitslösung),
 - Abschattungen sind zwar häufiger, aber kürzer,
 - Mehrwegeeffekte mitteln sich besser heraus (Verrauschen oder »Whitening«),
- kleinere und kostengünstigere Satelliten,
- Mehrfachlaunch 30 bis 60 Satelliten pro Rakete und geringere Launch-Kosten für Konstellationen,
- geringere Investitionskosten (ca. 35 % der MEO-Kosten),
- kürzerer Innovationszyklus: 5 Jahre,
- eventuell Kommerzialisierung möglich,
- Vision: Integration von Kommunikation mit Navigation (Vorsicht!).

Einige Protagonisten propagieren die Realisierung einer historischen Vision, nämlich die Integration von Kommunikation und Navigation in einem einheitlichen Signal. Hierbei ist jedoch Vorsicht geboten. Es muss beachtet werden, dass Satellitenkommunikation und Satellitennavigation unterschiedliche Ziele verfolgen: Bei der Kommunikation geht es um die möglichst fehlerfreie Übertragung von hohen Datenraten (Space-Internet). Da man für Datenraten von 200 Mbit/s größere Bandbreiten benötigt, steigert man die Trägerfrequenzen bis ins Ku-Band (10–18 GHz). Hierfür nimmt man dann größere Antennen (Array-Antennen) und Endgeräte mit größerem Formfaktor in Kauf. In der Navigation ist das Ziel, eine sehr genaue Synchronisation zwischen Satellit und Nutzer herzustellen, die präzise Laufzeitmessungen und Trägerphasen ermöglicht. Die Raten der Navigationsdaten sind dabei sehr niedrig (<< 1 kBit/s). Es wird von den meisten Nutzern erwartet, dass der Formfaktor (Gewicht, Abmessung, Stromverbrauch) der mobilen Endgeräte (Receiver) sehr kompakt ist. Höhere Trägerfrequenzen können für PNT-Anwendungen sehr problematisch sein.

2.2 LEO-PNT: Nachteile

Aus niedriger Bahnhöhe, Raumsegment aus preisgünstigen Kleinsatelliten und eventuell höheren Trägerfrequenzen als L-Band (1,5 GHz) resultieren einige potenzielle Nachteile, die es zu begrenzen gilt:

- Freiraum- und Regendämpfung bei hohen Frequenzen sehr groß,
- Bodeninfrastruktur wird aufwendiger (kurze Sichtbarkeit: < 20 min),
- Sensorstationen: $\approx 60^*$ (bei voller Resilienz, d. h. MEO-unabhängig), Faktor 4–5 mehr,
- Up-Link-Antennen: $\approx 300^*$ (= Zahl der Satelliten),
- Anzahl globaler Referenzstationen für PPP-Korrekturen: $\approx 1000+$, Faktor 6–10 mehr,
- Frequenzregulierungen (international und bilateral) erforderlich,
- über 2 GHz-Trägerfrequenz: Neuentwicklung der GNSS-Receiver-Bauelemente erforderlich,
- Endgeräte SWAP-C (Size, Weight & Power, Cost) zu hoch?
- Endgeräte bei Betriebsbeginn nicht konkurrenzfähig (Time-to-Market sehr kurz),
- Nutzlast-Formfaktor zu klein für Bordautonomie (Software-radio),
- Weltraumstrahlung für COTS-Komponenten im Satelliten kritisch,
- Investitionskosten müssen alle fünf Jahre aufgebracht werden.

Anmerkung: * Anzahl kann mit Inter-Satellite-Links um rd. 60 % reduziert werden. Die genannten Zahlen reduzieren sich weiter, wenn man für das LEO-PNT einen nicht-resilienten Ansatz wählt: In diesem Fall werden Bahn und Zeit der LEO-Satelliten mit einem GNSS-Raumfahrtempfänger in Echtzeit bestimmt. Es ergibt sich eine Abhängigkeit vom MEO-PNT.

Das Problem bei der Beurteilung von LEO-PNT-Konzepten besteht darin, dass die genannten Nachteile meistens ignoriert oder übersehen werden, wodurch ein viel zu optimistisches Bild entsteht. In Eissfeller et al. (2024) haben wir versucht, eine realistische Einschätzung im Detail abzugeben.

3 LEO-PNT-Konzepte

Das Arbeitsgebiet des LEO-PNT ist sehr heterogen besetzt. Es sind bisher Beiträge aus den Bereichen New-Space (Raumfahrt), Satellitenkommunikation und Navigation erbracht worden. Nicht zuletzt aus diesem Grund sind zurzeit vier Forschungs- und Entwicklungsrichtungen des LEO-PNT erkennbar. Diese sollte man auseinanderhalten, da bei allen Konzepten Stärken und Schwächen erkennbar sind. Wie noch später ausgeführt wird, liegt der Schwerpunkt dieses Artikels auf den dedizierten LEO-PNT-Entwicklungen, da diese die größte Realisierungswahrscheinlichkeit besitzen und die höchsten Genauigkeiten bieten.

3.1 Opportunistisches LEO-PNT

In der opportunistischen Navigation verwendet man technische und natürliche Signale, die primär nicht für die Navigation angedacht waren. Man spricht hierbei auch von SOOP (Signals-of-Opportunity). Im Zusammenhang mit LEO-PNT geht es um die Verwendung von Signalen der Megakonstellationen (Tab. 1) wie z. B. Starlink oder OneWeb, die originär als HTS (High Throughput Satelliten)-Systeme für Breitbandkommunikation aus dem Weltraum ausgelegt wurden.

Breitband-Kommunikationssignale sind im Prinzip auch Zeitsignale, die in Bezug auf eine On-Board-Uhr im Satelliten generiert werden, und die selbstverständlich den geometrischen Weg zwischen Satellit und Endgerät durchlaufen. Von daher liegt die Idee nahe, diese Kommunikationssignale als Pseudo-Range-Messung wie bei GNSS aufzufassen und für eine Positionsbestimmung zu verwenden.

Hierzu gibt es bei Kommunikationssatelliten jedoch erhebliche Einschränkungen: Da es sich in fast allen Fällen um kommerzielle Systeme handelt, werden Signale und Datenstrukturen als proprietäre Information der Dienste-Anbieter behandelt, d. h. es ist kein öffentliches ICD (Interface Control Document) zugänglich. Zusätzlich sind die Datenstrukturen der Kommunikationskanäle sehr komplex. Obwohl es erfolgreiche Versuche gab, die Starlink-Datenstruktur zu dekodieren (Humphreys et al. 2023) hat man es prinzipiell mit unbekanntem Signal- und Datenstrukturen bei der SOOP-Methode auf Nutzerebene zu tun. Zur Umgehung des Problems kann man die digitale Datenstruktur im Empfänger unterdrücken (z. B. durch Quadrieren) und arbeitet anschließend auf Frequenzebene mit der Dopplerverschiebung weiter. Dies hat zu einer »Renaissance« der Doppler-Navigation aus den 1970er Jahren geführt. Es sei an dieser Stelle an die Grundgleichung der Doppler-Translokation nach (Stansell 1978) erinnert:

$$N_{1,2} = (f_G - f_T)(t_2 - t_1) + \frac{f_G}{c}(R - R_1) \tag{1}$$

$$N_{1,2} = \text{int} \left[\int_{t_1}^{t_2} (f_G - f_T) dt \right] \tag{2}$$

- $N_{1,2}$ Doppler-Count (integrierte instantane Dopplerverschiebung) im Zeitintervall $t_2 - t_1$
- f_G Frequenz des Referenzoszillators im Empfänger
- c Lichtgeschwindigkeit
- f_T Trägerfrequenz des Signals (Sendefrequenz)
- R_2, R_1 Entfernung zwischen Empfänger und Satellit zu den Zeitpunkten t_2, t_1

Man erkennt, dass der gemessene Doppler-Count neben einer Frequenzabweichung proportional zur Streckendifferenz zwischen Nutzer und Satellit zu unterschiedlichen Zeitpunkten ist. Der Doppler-Count (integrierter Doppler) definiert einen geometrischen Ort in Form eines Hyperboloids im 3D-Raum. Der Schnitt von drei oder mehreren Hyperboloiden ermöglicht die absolute Positionierung in

Tab. 1: Übersicht über einige Megakonstellationen für die Kommunikation nach Kassas et al. (2021)

Konstellation	Anzahl der Satelliten	Verwendete Frequenzbänder
Orbcomm	36	VHF
Globalstar	48	S, C
Iridium	66	L, Ka
OneWeb	882	Ku, Ka
Lightspeed (TeleSat)	198	Ka
Starlink (SpaceX)	11943	S, Ku, Ka, V
Kuiper (Amazon)	3236	Ku, Ka

X, Y, Z. Sind die Anfangswerte einer Mission bekannt, so gibt es noch die weitere Möglichkeit, dass man mit der Geschwindigkeit, berechnet aus dem instantanen Doppler, eine Koppelortung durchführt.

Weitere Einschränkungen der Genauigkeit des SOOP-Verfahrens mit Kommunikationssatelliten sind noch durch potenziell große Bahnfehler (200 m), ungenaue On-Board-Synchronisation und fehlende Systemzeitskala sowie fehlende Modelle für die Korrektur der Atmosphären-Fehler gegeben. Hinzu kommt teilweise die Verwendung einer Mehrfachantenne (bei Starlink hat die Satellitenantenne 48 Keulen). Dies kann zur Folge haben, dass die Dopplerverschiebung nicht kontinuierlich, sondern nur in einem kurzen Zeitintervall (Antennen-Keule bewegt sich am Boden durch Umschalten im Zeitmultiplex) bestimmt werden kann. Da die Antennenkeulen stark gebündelt sind, ist ein Beam-Hopping integriert, mit dem die Elementarzellen auf der Erde (24 km bei Starlink) sequentiell abgefahren werden müssen. Eine solche Beam-Steuerung ist bei Satellitennavigation ein völlig neues (kritisches) Element. Die erreichbare Genauigkeit mit Starlink liegt nach Kassas et al. (2021) bei ± 30 m. Die Stärke der Megakonstellationen ist selbstverständlich die hervorragende Verfügbarkeit und Sichtbarkeit, denkt man an die tausenden Satelliten im Orbit.

3.2 Fusioniertes LEO-GNSS

Das fusionierte LEO-GNSS-Konzept basiert auch auf Megakonstellationen. Allerdings werden hierbei nicht direkt die Kommunikationssignale (wie bei SOOP) verwendet, sondern man baut das Navigationssignal in das Kommunikationssignal ein oder integriert eine zusätzliche Navigationsnutzlast in den Satelliten (Hosted-Payload). Ein Beispiel hierfür ist das Satelle (Satellite Time and Location)-Signal auf IRIDIUM Next. Es gibt offensichtlich in den USA Überlegungen bei SpaceX, ein solches Navigationssignal bei einer nächsten Generation von Starlink abzustrahlen. Die Universität Texas hatte vor 2022 Forschungsmittel von der US Army erhalten, um die Nutzung von Starlink als GPS-Alternative zu untersuchen. Es wird

berichtet, dass Elon Musk eine Implementierung eines Navigationssignals abgelehnt hat, da es nicht in das Portfolio von Starlink passt (Kan 2022). Das letzte Wort ist darüber aber wohl noch nicht gesprochen. Eine ähnliche Diskussion gibt es auch bei Kuiper von Amazon.

3.3 Dediziertes LEO-PNT

Bei den dedizierten LEO-PNT-Konzepten wird eine Konstellation von etwa 300 Satelliten in einer Bahn unterhalb 1200 km verwendet. Man würde eine solche Konstellation nicht als Megakonstellation bezeichnen. Eine Anzahl von 250 bis 300 Satelliten im LEO ist erforderlich, um eine mit GNSS vergleichbare Sichtbarkeit auf der Erde zu erhalten. Der primäre Zweck dieser Konstellation ist die Bereitstellung eines sehr genauen und robusten Navigationssignals. Der LEO-PNT-Satellit ist funktional ähnlich aufgebaut wie ein GNSS-Satellit. Die Ein- bzw. Mehrfrequenznutzlast wird mit COTS-Technik aufgebaut. Das System ist auf geometrische Genauigkeit optimiert und liefert auf der Messwertebene Pseudostrecken und Trägerphasen. Das Konzept schließt eine präzise Bahn- und Systemzeitbestimmung mit ein. Es entsteht somit ein PNT-System, das mit MEO-GNSS vergleichbar und integrierbar ist.

Es kann noch eine weitere Differenzierung vorgenommen werden: Systeme mit voller Resilienz und Systeme mit beschränkter Resilienz. Im ersten Fall arbeitet das LEO-PNT völlig unabhängig von MEO-GNSS. Ein vollständiges und unabhängiges Boden- und Kontrollsegment wird für die Bahn- und Zeitbestimmung und die Datenkommunikation benötigt. Im Falle der beschränkten Resilienz wird die Bahn- und Zeitbestimmung an Bord der LEO-Satelliten mit einem GNSS-Raumfahrtempfänger durchgeführt. Dieser arbeitet mit den MEO-PNT-Signalen von GPS und Galileo. Hieraus ergibt sich eine systemtechnische und risikorelevante Abhängigkeit des LEO-PNT von den MEO-Systemen.

Das Navigationssignal kann alternativ auch über eine »Hosted-Payload« generiert werden. Hierbei handelt es sich um eine sekundäre Nutzlast, die neben der Primärmission auf dem Satelliten eingesetzt wird. Ein gutes Beispiel für eine kommerziell zugängliche »Hosted-Payload« ist die Aireon ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast)-Nutzlast auf Iridium Next (EO Portal 2024).

3.4 LEO-Ergänzung von MEO-GNSS

Bei diesem Konzept wird das MEO-PNT-System (GPS, Galileo, Beidou) als Kernsystem verwendet. Das LEO-PNT mit bis zu 180 Satelliten stellt ein Ergänzungssystem dar, um einige Schwachstellen des MEO-PNT zu kompensieren (Jun 2022). Die Konstellation von < 180 Satelliten reicht nicht aus, um ein selbstständiges System aufzubauen. LEO-Ergänzungssysteme sind eine Untergruppe der dedizierten Systeme. Das chinesische Centispace fällt beispielsweise in diese Kategorie (siehe weiter unten).

4 Übersicht über dedizierte LEO-PNT-Konzepte

In diesem Abschnitt geben wir einen Überblick und eine kurze Beschreibung der wichtigsten LEO-PNT-Konzepte, die derzeit entwickelt und diskutiert werden. Der Vollständigkeit halber haben wir die historischen LEO-PNT-Systeme TRANSIT und INES mit aufgenommen. Wir gehen kurz auf die Systeme ein und heben die wichtigsten Merkmale hervor. Für die vielen Details, die berichtet werden könnten, verweisen wir auf die enthaltenen Referenzen und auf Tab. 2.

Iridium Next (USA) bietet eine operationelle PNT-Funktionalität (STL, Satellite Time & Location) im L-Band mit höherer Leistung (+ 30 dB) im Vergleich zu GPS (Whelan et al. 2011). Das Signal wurde von Satelles, Inc. entwickelt und hat eine Bandbreite von etwa 5,2 MHz. Es ist ein gutes Beispiel für die Implementierung eines Hochleistungssignals im L-Band, um Robustheit gegen Interferenzen und Störungen zu erreichen. Außerdem ist es für die In-Door-Ortung nutzbar. Die Anzahl der aktiven Iridium Next-Satelliten beträgt 66 (Stand Dezember 2024). Hinzu kommen 15 Ersatzsatelliten (neun im Orbit, sechs am Boden).

Das von Globalstar und Echo-Ridge entwickelte »*Augmented Positioning System* (APS)« war eine Aktivität im Rahmen des Projekts »Demonstration of Backup and Complementary PNT Capabilities of GPS« des US-Verkehrsministeriums. Es handelt sich um einen experimentellen Aufbau im S-Band des MSS (Mobile Satellite Service) von Globalstar. Es verwendet ein SOOP-Konzept (CDMA-Signale im S-Band), da keine dedizierten PNT-Signale generiert werden (Hansen et al. 2021).

OneWeb (UK, EU) spielte nach dem Brexit im Dezember 2020 eine besondere Rolle, da Großbritannien nach einer Galileo-Alternative suchte. Anfang 2020 meldete OneWeb Insolvenz nach »Chapter 11 des US-amerikanischen Insolvenzrechtsgesetzes« an. Daraufhin investierte die britische Regierung 500 Mio. US-Dollar, um das Industriekonsortium zu stabilisieren. Vor diesem Hintergrund kam die Idee auf, das Kommunikations-Ku-Band für eine PNT-Funktion zu nutzen. Die Problemstellung wurde untersucht (Foust 2021). Man kam jedoch zu dem Schluss, dass in der ersten Generation von OneWeb eine PNT-Funktion im Ku-Band unrealistisch ist. Das Problem wurde daher auf OneWeb der zweiten Generation verlagert, aber der Status ist unklar.

PULSAR (USA) ist ein kommerzielles System, das von XONA Space Systems Inc. entwickelt wurde, einem im Silicon Valley ansässigen Startup der Stanford University. Aus europäischer Sicht ist XONA ein hervorragendes Beispiel für ein New-Space-Unternehmen, das kommerzielle LEO-Dienste anbietet. Die Stärke von XONA besteht darin, dass das Unternehmen hochrangige private Investoren finden konnte (z. B. Lockheed Martin, Toyota Venture). Darüber hinaus verfügt das Unternehmen über viele sogenannte Ökosystempartner aus der Welt der GNSS-Empfänger und Chipsatz-Entwicklung (z. B. Hexagon/NovAtel, Septentrio, STMicroelectronics) und aus der Welt der

Tab. 2: Vergleich verschiedener LEO-PNT-Konzepte (TBD: To-Be-Defined, TBC: To-Be-Confirmed, DL: Design Life)

System	Konstellation	Bahn, Höhe, Inklination	Satelliten SWAP	Frequenz-Band	Höhere Leistung, Signal	Finanzierung Ansatz	ODTS
IRIDIUM Next STL, Satteltes (USA)	66 SVs auf 6 Ebenen, global	780 km, $i = 86,4^\circ$	3 m, 860 kg, 2200 W, DL < 15 y, Iridium Next Bus	L = 1621–1626 MHz, Iridium MSS	+30 dB spezielles Signal	privat	GSEC, GPS, ISL (TBC)
APS-Globalstar (USA)	32 SVs auf 8 Ebenen, global	1410 km, $i = 52,0^\circ$	3 m, 700 kg, 2400 W, DL < 15 y, Globalstar Bus	S = 2483–2500 MHz, Globalstar MSS	Ja (TBD) SOOP	US DoT, experimentell	GSEC, GPS
OneWeb (UK, EU)	648 SVs auf 18 Ebenen, global	1200 km, $i = 86,4^\circ$	1,3 m, 150 kg, 210 W, DL < 5 y, (Airbus) Arrow Bus	Ku = 10,7–18,1 GHz (TBC)	unbekannt, UK GPS, on hold	privat und UK Regierung	GSEC, GPS
PULSAR (USA)	260 SVs auf 6 Ebenen (TBC)	1000 km, $i = 52,5^\circ$	0,6 m, 150 kg, 200 W, DL = 5 y, firmeneigener Bus	L = 1260 MHz und C = 5020 MHz (TBC)	+20 bis +30 dB	privat und Forschungsmittel	GPS, GSEC (back-up)
TrustPoint	≈ 300 SVs, Ebenen (TBD)	500–800 km, $i = TBD$	6 U Cubesat, 10 kg, 60 W OAP	C ≈ 5000 MHz, kein L-Band	Nein, eigene Signalstruktur	privat (TBC)	GSEC
Synchrocube (F)	TBD	TBD	6 U Bus	L-Band (TBD) bis S-Band (TBD)	TBD	CNES, F&E Mittel	TBD
Black-Jack (USA)	4 (20), reduziert	550 km, $i = 97,6^\circ$ sonnen-synchron	1 m, 200 kg, 108 W, X-Sat Saturn Class Bus (Blue Canyon)	L-, C-Band und höher; optisch: sichtbar bis IR (TBC)	unbekannt, experimentelle PNT-Nutzlast SEARGANT	US DoD Budget, experimentell, verantwortlich (neu) US Space Forces	GSEC, optische ISL (TBC)
Centispace (CHN)	¹⁾ 120 SVs / 12 Ebenen plus ²⁾ 30 SVs / 3 Ebenen plus ³⁾ 40 SVs / 4 Ebenen	¹⁾ 975 km, $i = 55,0^\circ$ ²⁾ 1100 km, $i = 87,4^\circ$ ³⁾ 1100 km, $i = 30,0^\circ$	1,3 m, 100 kg, TBD W, DL < 10 y, CAS Microspace WN-100 Bus	CL1 = 1569–1581 MHz, CL5 = 1170–1182 MHz	Ja, +3 dB (TBC) kompatibel mit Beidou (MEO-GNSS)	Regierung	GSEC, Beidou, optische ISL (TBC)
GeeSpace/ Geely (CHN)	240 SVs / Ebenen (TBD)	620 km, $i = TBD$, geneigt	GeeSat GSP100, 100 kg, < 1500 W (TBC), DL = 5 y	L-Band (TBC)	unbekannt, kompatibel mit Beidou	privat, Geely Motor Company	GSEC, GNSS, ISL (TBC)
IRIS ² (EU)	≈ 260 SVs / Ebenen (TBD)	TBD	700 kg (TBC)	L, C, Ku, Ka (TBD) Com+Nav	unbekannt, PNT Hosted Payload TBC	Public Private Partnership (TBC)	Galileo & GPS, ISL (TBC)
JAXA LEO-PNT (Japan)	Phase I: 240 SVs / 24 Ebenen Phase II: 480 SVs / 48 Ebenen	975 km, $i = 55^\circ$	unbekannt	C = 5030–5250 MHz	unbekannt	unbekannt	Phase 1 GNSS Phase 2 GSEC & GNSS
INES (F, EU) (historisch)	70 SVs auf 7 Ebenen	1416 km, $i = 62,8^\circ$, geneigt	unbekannt	E1 = 1589,74 MHz, E4 = 1258,29 MHz	nein, kompatibel mit GPS	CNES, EU nicht realisiert	GSEC
TRANSIT (USA) (historisch)	10–12 SVs auf 5–6 Ebenen	1075 km, $i = 90,0^\circ$, polar	1,0 m, 140 kg, 45 W, DL = TBD	$f_1 = 149,98$ MHz, $f_2 = 399,98$ MHz	1–3 W f_1 2–5 W f_2	DoD, US Navy	GSEC

GNSS-Konstellationssimulatoren (Spirent, Safran, Syntony, Rhode & Schwarz). Ursprünglich sollten die Trägerfrequenzen für PULSAR (Reid et al. 2022) im L-Band und C-Band liegen. Um die Robustheit gegen Störungen und Störsignale zu erhöhen, sollen höhere Leistungspegel abgestrahlt werden. Aus Gesprächen mit XONA geht hervor, dass derzeit das Grundkonzept darin besteht, mit dualen L-Band-Frequenzen zu arbeiten. PULSAR hatte von Anfang an ein klares Geschäftsmodell im Bereich des automatisierten Fahrens und war mit den Nutzeranforderungen an hohe Genauigkeit und hohe Integrität für autonome Fahrzeuge kompatibel. Ende 2023 hat XONA seinen Anwendungsbereich in Richtung des Massenmarktes erweitert. PULSAR verwendet einen weltraumgestützten GNSS-Empfänger für ODTs (Orbit Determination & Time Synchronisation), verfügt jedoch über eine Backup-ODTs-Funktion basierend auf einem herkömmlichen GSEC (Ground Segment). Einige Systeme wollen Inter-Satellite-Links (ISL) für Kommunikation und Bahnbestimmung verwenden. Diese können sowohl im Hochfrequenzbereich als auch im optischen Bereich arbeiten.

TrustPoint (USA) ist ein weiterer Vorschlag für ein kommerzielles LEO-PNT-System (80 % kommerziell, 20 % staatlich). TrustPoint (Shannon 2022) beabsichtigt, höhere Frequenzen zwischen 2 GHz und 10 GHz zu verwenden, vermutlich C-Band bei etwa 5 GHz. TrustPoint plant die Verwendung kostengünstiger 6 U-Satelliten mit einem Gewicht von 10 kg (1 U bzw. Unit ist das Bezugsmaß für die Größe eines CubeSats mit $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$), L-Band-Signale sind nicht vorgesehen. TrustPoint scheint eine bodengestützte ODTs-Technik auf Basis sogenannter LEONS zu verwenden. Die Verwendung von weltraumgestützter GNSS-Positionierung wird nicht erwähnt.

Synchrocube (F) ist eine von der französischen Raumfahrtagentur CNES finanzierte Aktivität unter dem Motto: »Synchrocube, eine genaue und sichere Zeitreferenz«. Im Rahmen des Synchrocube-Projekts, dessen ursprünglicher Auftragnehmer Syrlinks (heute Teil von SAFRAN Electronics and Defense) war, wird ein erster LEO-Testsatellit gebaut. Synchrocube soll Synchronisationsfunktionen bereitstellen, wenn GNSS nicht verfügbar ist.

Blackjack (USA) ist ein »bahnbrechendes« Weltraumprogramm (Projektbeginn: 2017) der DARPA (Defense Advanced Research and Program Agency) zum Testen verschiedener militärischer Nutzlasten im Low-Earth-Orbit: »Aufzeigen des militärischen Nutzens von Konstellationen im LEO«. Das Konzept besteht darin, eine kommerziell erhältliche Plattform zu verwenden und eine militärische Nutzlast darauf zu integrieren (Forbes, keine Jahresangabe). Northrop Grumman entwickelt zwei experimentelle PNT-Nutzlasten (SERGEANT). Neben verschiedenen RF-Links werden optische Space-to-Space- und Space-to-Ground-Links zur präzisen Zeitmessung verwendet. Ursprünglich plante Blackjack mit 20 Satelliten. Das Projekt wurde nun auf nur noch vier Satelliten reduziert. Die Entwicklung von SERGEANT (Software Enabled Reconfigurable GNSS Embedded Architecture for Navigation and

Timing) wurde in das pLEO-Programm (proliferated LEO architecture) der Space Development Agency (SDA) innerhalb der US Space Forces übergeben.

Centispace (China) ist ein staatlich finanziertes LEO-PNT-Programm zur Erweiterung des Beidou MEO-PNT-Systems (MU 2023). Es ist ein Zweifrequenz-L-Band-System mit Leistungspegeln, die mit GNSS vergleichbar sind (-157 dB-W). Die Idee besteht darin, eine gute Kompatibilität und Synergie mit MEO-PNT-Systemen zu gewährleisten. Es wurden mehrere ITU-Anmeldungen vorgenommen. Das Servicekonzept besteht darin, eine hohe Genauigkeit, einen Integritätsergänzungsdienst und einen GNSS-Überwachungsdienst aus dem Weltraum bereitzustellen. Die Anwendungen richten sich an den Massenmarkt und den professionellen Markt.

Geely (China) ist eine private Initiative (Geely 2023). Geospace baut die Satelliten in einer neuen Satellitenfabrik. Es ist eine Tochtergesellschaft des Technologiekonzerns Geely, zu dem auch Geely Automobile gehört, ein bedeutendes chinesisches und internationales Automobilunternehmen (Volvo, Lotus, Polestar, Terrafugia). Der Geschäftszweck von Geely besteht daher darin, präzise Ortung mit Zentimetergenauigkeit und Konnektivität für autonome Fahrzeuge bereitzustellen. Die vorgesehenen Trägerfrequenzen und andere Systemparameter sind unbekannt (vermutlich wird es das L-Band sein).

IRIS² (Europa) steht für »Infrastructure for Resilience, Interconnectivity and Security by Satellite«. Seine Hauptaufgabe ist die sichere Kommunikation für staatliche und kommerzielle Zwecke durch die Nutzung von Breitbandsignalen (Europäische Kommission 2023). Das Weltraumsegment besteht aus mehreren Schichten: GEO-, MEO-, LEO-Satelliten. Derzeit befindet sich das Projekt in der Entwicklung. Die LEO-Schicht wird etwa 260 Satelliten umfassen. Aus europäischer Sicht ist es die erste LEO-Konstellation der Europäischen Kommission (EC). In der frühen Phase von IRIS² kam die Idee auf, eine sekundäre oder Galileo-Hosted-Payload zu verwenden. Soweit bekannt, steht eine endgültige Entscheidung zu diesem Punkt noch aus. Parallel dazu hat die Europäische Weltraumorganisation (ESA) im Rahmen des FutureNav-Programms ein LEO-PNT-Projekt gestartet. Eine Ausschreibung (ITT) wurde veröffentlicht, um Vorschläge für die Entwicklung einer LEO-PNT-Demonstration im Orbit einzuholen (Ries et al. 2023). Im März 2024 wurden Entwicklungsaufträge an die europäische Industrie (Thales und GMV) vergeben.

Die japanische Raumfahrtagentur JAXA hat ebenfalls einen LEO-PNT-Vorschlag veröffentlicht (Murata 2024). Das Konzept ist für die hochpräzisen PNT-Nutzer interessant, da die erklärte Zielsetzung die ultra-schnelle präzise Punktbestimmung (PPP) ist. In einer ersten Phase (2030) sollen 10 cm (r.m.s) in $< 3 \text{ min}$ Konvergenzzeit, und in einer zweiten Phase (2035) 10 cm (r.m.s.) unter einer Minute Konvergenzzeit erreicht werden. Die primäre Anwendung wird im autonomen Fahren gesehen. Die Untersuchungen sind noch in einem frühen Stadium.

Das Konzept *INES* (Innovative European Navigation System), das eine LEO-PNT-Konstellation (zuzüglich einiger GEOs) favorisierte, stammt aus der Zeit der GNSS2-Studien zwischen 1994 und 1999, die seinerzeit in Europa von der ESA und EC durchgeführt wurden. Bei *INES* handelte es sich um eine Alternative in der Konzeptionsphase von Galileo, die von der französischen Raumfahrtagentur CNES vorgeschlagen wurde. *INES* wurde nicht realisiert.

Die Entwicklung von *TRANSIT* begann 1958 (ein Jahr nach dem Flug von Sputnik I) mit einer Initiative der Johns Hopkins University. Der Vorschlag wurde in nur 17 Tagen auf 50 Seiten erarbeitet und bei der US Navy eingereicht und akzeptiert. Dies war die Geburtsstunde des ersten globalen Satellitennavigationssystems. Die offizielle Entwicklungsphase fing im Jahr 1959 an. *TRANSIT* war 1964 operativ für militärische Nutzer. Das System wurde im Jahr 1967 für die zivile Nutzung freigegeben, das Launch-Programm mit insgesamt 24 Satelliten wurde bis 1988 weitergeführt.

Um die Dynamik in den LEO-PNT-Entwicklungen aufzuzeigen, sei noch folgende Information gegeben, die allerdings noch nicht exakt referenziert werden kann. Eine zusätzliche neue staatliche Entwicklung durch China wurde auf der ICG-18-Konferenz (UNOOSA 2024) in Wellington angekündigt: Im Zuge des Aufbaus der Breitband-Konstellation *GuoWang* mit 12.992 Satelliten wird erwogen, eine PNT-Funktion über eine »Hosted-Payload« auf 504 Satelliten (72 polare Bahnen, 432 geneigte Bahnen, < 1200 km) zu integrieren (*SATNET-LEO*). Das Konzept ist wohl kompatibel mit *Beidou* auf den Frequenzen L1, L5. Auch Russland hat auf der ICG-18 die Entwicklung einer ergänzenden LEO-PNT-Komponente mit 240 Satelliten bis 2030 angekündigt. Leider gibt es zu diesen Vorhaben zurzeit noch keine Dokumentation.

5 Technische Betrachtungen

Die technische Bewertung der LEO-PNT-Vorschläge nach Tab. 2 und die weitergehenden Vorschläge bezüglich der Megakonstellationen (z. B. *Starlink* und *Kuiper*) sind sehr komplex, da der Parameterraum der Systeme sehr groß ist und stark variiert. In dieser Ausarbeitung wollen wir uns auf den zentralen Parameter der LEO-PNT-Systeme konzentrieren, nämlich die verwendete Trägerfrequenz. Wie aus Tab. 1 und Tab. 2 ersichtlich, variieren die vorgeschlagenen Frequenzbänder von $L = 1,1$ GHz, über $S = 2,5$ GHz, $C = 5$ GHz bis hin zu $Ku = 18$ GHz. Die Trägerfrequenz bestimmt die Größe der Satelliten (Antennen und abgestrahlte Leistung), die Dämpfung in der Atmosphäre (Freiraumdämpfung, Dämpfung durch Gase, Regendämpfung, Dämpfung durch Laub) und die Komplexität des LEO-PNT-Empfängers (Antenne, Rechenleistung, Größe, Stromverbrauch).

5.1 Abhängigkeiten der Empfängerfunktion von der Frequenz

Wie im Anhang formelmäßig beschrieben, ist das Verhältnis von empfangener Leistung zur empfangenen Rauschleistung C/N_0 [Hz] wesentlich für die Funktion eines GNSS-Empfängers. Vom C/N_0 hängt das Akquisitionsverhalten (Time-to-First-Fix), die Genauigkeit der Pseudo-Range- und Phasenmessung (Rauschen), die Bitfehlerwahrscheinlichkeit bei der Übertragung der Navigationsdaten und nicht zuletzt die Störsicherheit der Signale ab. Es sei hier erwähnt, dass beim zukünftigen GPS IIIIF die Leistung C in regionalen Gebieten der Erde durch die Verwendung von gebündelten Antennen (Spot-Beams) erheblich erhöht werden soll. Dies hat zur Folge, dass militärische Signale deutlich störsicherer (im Vergleich zu den zivilen Signalen) sein werden. Ein guter Arbeitswert für zivile GNSS-Empfänger liegt bei einem $C/N_0 = 10.000$ Hz bzw. 40 dB-Hz. Man beachte, dass in der Hochfrequenztechnik Leistungswerte und deren Verluste in einer logarithmischen Skala gerechnet werden, d. h. symbolisch geschrieben: x [dB-Hz] = $10 \log_{10} x$ [Hz].

Die Analyse des C/N_0 als Funktion der Trägerfrequenz ist hiernach ein ganz wesentliches Primärkriterium, um die Stärken und Schwächen eines Satellitennavigationssystems beurteilen zu können. Selbstverständlich gibt es zusätzlich eine große Zahl von Sekundärkriterien, deren Betrachtung aber den Umfang dieses Artikels sprengen würde. Zu mehr Einzelheiten sei auf Eissfeller et al. (2024) verwiesen. Um numerische Werte für das C/N_0 für einen charakteristischen Signalpfad zu erhalten, wird eine Leistungsbilanz durchgerechnet. Hierbei handelt es sich um eine einfache Eingangs-zu-Ausgangsberechnung, bei der Gewinne und Verluste in der Signalamplitude mit mathematischen Modellen bestimmt und additiv in der dB-Skala zusammengefasst werden.

Der Wert für die Rauschleistung ist aus Kaplan (1996) entnommen. Er stellt einen guten Mittelwert für Empfänger auf der Erdoberfläche mit einer üblichen Front-End-Technologie dar. Die angenommene Ausgangsleistung des Endverstärkers von 8 W ist eine Annahme, die mit Kleinsatellitentechnologie umsetzbar ist. Bei der endgültigen Frequenzwahl kann dieser Designparameter der Nutzlast vergrößert oder auch verkleinert werden. Der durch die Bündelungswirkung der Antenne erzielbare Antennengewinn gilt für eine Bahnhöhe von 1200 km und eine globale Abdeckung der Erde. Die Freiraumdämpfung, die Dämpfung durch die Atmosphäre und die Regendämpfung wurden durch den ITU (International Telecommunications Union)-Formalismus, z. B. ITU-R PN. 837-1 (ohne Jahr) berechnet. Für den LEO-PNT-Empfänger am Boden wurde eine 0 dB-Antenne ohne Richtwirkung unterstellt.

In Abb. 2 ist die Gesamtdämpfung als Funktion der Trägerfrequenz eingerechnet worden. Hierbei wurde neben der Freiraumdämpfung die Dämpfung der trockenen Atmosphäre (N_2 , O_2 , Ar, CO_2 , Ne usw.) genauso berücksichtigt

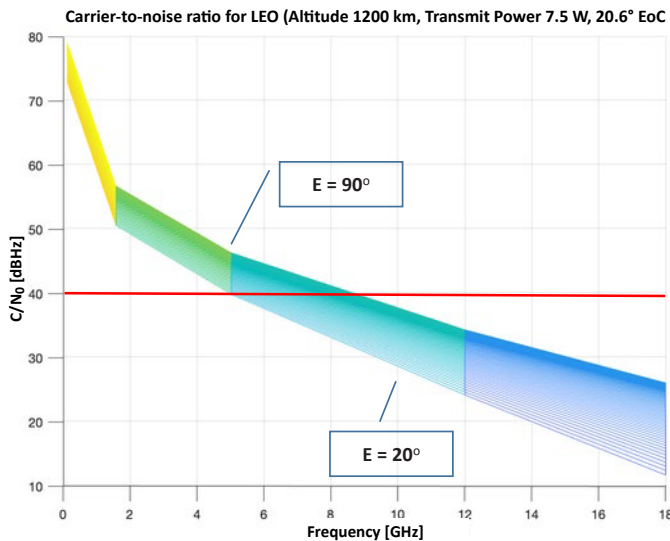


Abb. 2: C/N_0 als Funktion der Trägerfrequenz für eine Flughöhe von 1200 km und einem variierenden Elevationswinkel ($E = 20^\circ$ bis 90°)

wie die Regendämpfung, Wolkendämpfung und atmosphärische Szintillationen (sehr klein). Wie in Tab. 3 wurden die vorgeschriebenen ITU-Modelle zugrunde gelegt.

Wie man aus Tab. 3 bereits erkennt, ist neben der Freiraumdämpfung die Dämpfung durch Regen ein sehr wichtiger Dämpfungsterm, der mit höheren Frequenzen massiv ansteigt. Der physikalische Grund ist in der Tatsache zu sehen, dass man mit kleineren Wellenlängen (höhere Frequenz) in die Abmessungen von Regentropfen kommt. Es wird häufig übersehen, dass die bei der LEO-PNT-Systemauslegung angenommene Regenrate [mm/h] unmittelbar mit der Signalverfügbarkeit zusammenhängt. So muss bei einer globalen Verfügbarkeit von 99,9 % von einer Regenrate von 60 mm/h ausgegangen werden. Eine globale Verfügbarkeit von 99,99 % ist bei einer Regenrate von 150 mm/h gegeben. Hier ist zu erwähnen, dass viele Nutzeranforderungen (Luftfahrt, Autonomie, Schifffahrt, präzise Landwirtschaft, Behörden und Organisationen mit

Sicherheitsaufgaben) Verfügbarkeiten von 99,9 % und höher verlangen. Es macht aus Sicht der PNT-Nutzer wenig Sinn, mit deutlich niedrigeren Verfügbarkeiten zu arbeiten. Insbesondere auch deswegen, weil die Regenraten durch den Klimawandel (Starkregen) erheblich ansteigen werden.

Es ist außerdem anzumerken, dass das in Tab. 3 berechnete C/N_0 nur bei freier Sicht nach oben gilt. Soll der LEO-PNT-Empfänger unter Bewuchs (Laub) im Signalweg betrieben werden, ergeben sich zusätzliche frequenzabhängige Dämpfungseffekte (Tab. 4). Dies führt bei hohen Frequenzen zu einer fast kompletten Auslöschung des Signals. Hierin ist sicherlich auch ein Unterschied zur Satellitenkommunikation zu sehen, bei der das Terminal bevorzugt unter freien Sichtbedingungen aufgestellt wird.

Aus Tab. 3 in Verbindung mit Abb. 2 lassen sich folgende Schlussfolgerungen für die Trägerfrequenz des LEO-PNT ziehen:

- Im L-Band ergibt sich aufgrund der niedrigen Freiraum- und atmosphärischen Dämpfungen das größte C/N_0 . Man erreicht gute Kompatibilität mit den MEO-PNT-Systemen. Allerdings ist das L-Band bereits sehr überfüllt mit SatNav und sonstigen Signalen.
- Der interessante Punkt ist, dass das C-Band bei LEO-PNT im Gegensatz zu MEO-PNT funktioniert. Bei Galileo wurde das C-Band aufgrund von Nachteilen seinerzeit nicht genutzt. Für steilere Elevationswinkel ist bereits eine Spanne von plus 8 dB im C/N_0 vorhanden, die sich noch durch etwas höhere Ausgangsleistung am Satelliten für bessere Störsicherheit vergrößern lässt.
- Bei etwa 8 GHz erkennt man einen Kipppunkt. Ab dieser Trägerfrequenz wird das C/N_0 zunehmend kleiner als der Schwellwert von 40 dB-Hz. Für hohe Frequenzen ab 8 GHz hat man zwei Möglichkeiten: Erstens, man erhöht signifikant die Ausgangsleistung des Satelliten. Hierdurch wird der Satellit größer, schwerer und teurer. Dies widerspricht dem New-Space-Ansatz mit Verwendung von Kleinsatelliten. Zweitens, man muss die

Tab. 3: Leistungsbilanz eines LEO-PNT als Funktion der Frequenz (1200 km Flughöhe, Elevation = 20°)

Parameter	L-Band [1,6 GHz]	C-Band [5 GHz]	Ku-Band [18 GHz]
Endverstärker Satellit	9 dB-W (8 W)	9 dB-W (8 W)	9 dB-W (8 W)
Gewinn Sendeantenne (Satellit)	7 dB	7 dB	7 dB
Freiraumdämpfung	-164 dB	-174 dB	-186 dB
Dämpfung Atmosphäre (99,9 %)	-0,34 dB	-0,76 dB	-4,3 dB
Dämpfung Regen (60 mm/h = 60 l/m ² /h) für Verfügbarkeit 99,9 %	-0,02 dB	-0,56 dB	-15 dB
Gewinn Empfangsantenne (omni-direktional)	0 dB	0 dB	0 dB
Empfangene Leistung C	-148,4 dB-W	-159,3 dB-W	-189,3 dB-W
Empfangene Rauschleistung N_0	-201 dB-W/Hz	-201 dB-W/Hz	-201 dB-W/Hz
Verhältnis C/N_0 ($C-N_0$ auf log-Skala)	52,6 dB-Hz	41,7 dB-Hz	11,7 dB-Hz

Tab. 4: Dämpfung durch Laub und Baumbestände als Funktion der Frequenz, Durchmesser der Baumgruppe bei einer Elevation von 45°. Annahme einer mittleren Blattgröße mit Hilfe ITU (2021).

Trägerfrequenz	Dämpfung durch Laub (d = 5 m)	Dämpfung durch Laub (d = 50 m)
0,4 GHz	-5 dB	-8 dB
1 GHz	-7 dB	-14 dB
5 GHz	-13 dB	-22 dB
12 GHz	-17 dB	-31 dB
18 GHz	-25 dB	-36 dB

Komplexität des LEO-PNT-Empfängers erhöhen. Wesentliches Element zur Verbesserung der Leistungsbilanz nach Tab. 3 ist die Verwendung gerichteter Antennen, die eine Verstärkung von mindestens 15 dB aufbringen müssen. Weitere Möglichkeit ist die Anwendung der hochsensitiven Signalverarbeitung mit mehreren Tausend parallelen Korrelatoren im Endgerät.

- Im Ku-Band bei 18 GHz lässt sich eine gute Systemfunktion mit hoher Verfügbarkeit kaum mehr gewährleisten. Hier muss man in die Trickkiste der GNSS-Empfängertechnik greifen, z. B. durch die Anwendung einer tiefen Kopplung (Deep-Coupling) mit Trägheitsnavigation wie bei militärischen Empfängerkonzepten. Die Empfänger werden komplex und teuer.

Wir haben bisher die Frequenzachse als kontinuierliche Koordinatenachse behandelt. In der Realität ist dies jedoch nicht der Fall, da über ITU (International Telecommunications Union)-Regulierungen und bi-laterale Verträge viele einschränkende Randbedingungen bei der Frequenznutzung vorhanden sind (siehe Fai 2016).

5.2 Bedeutung der Trägerfrequenz für die Endgeräte

Ein typischer geodätischer L-Band-GNSS-Empfänger (professioneller Markt) baut sich heute aus drei Hochfrequenz-Chips (L1, L2, L5) auf, besitzt einen sehr leistungsfähigen Digital ASIC für die Signalverarbeitung und einen Mikroprozessor für die Anwendungssoftware. Der indicative Formfaktor (SWAP) zeigt sich in einer Größe des Boards von ca. 80 mm × 50 mm, 30 g Gewicht und einer Leistungsaufnahme von 1,5 W. Professionelle Empfänger besitzen typischerweise 300 und mehr Digitalkanäle. Die Antenne wird aus drei L-Band-Elementen (eines pro Frequenz) aufgebaut. Diese Parameter können als Referenz für einen zukünftigen LEO-PNT-Empfänger verwendet werden.

Wie in Abb. 3 gezeigt, wird ein LEO-PNT-Empfänger für Frequenzen > 8 GHz mit einer ebenen Array-Antenne ausgestattet werden müssen, um eine Richtwirkung (Antennengewinn) von 15 bis 20 dB zu erzielen. Dies ist erforderlich, um den Arbeitspegel von 40 dB-Hz im C/N_0 sicherzustellen. In Eissfeller et al. (2024) wurde die Zahl der Antennenelemente für das Ku-Band abgeschätzt: Für einen Antennengewinn von 15 dB benötigt man 30 Antennenelemente und für einen Antennengewinn von 20 dB bereits 100 Elemente (für nur eine LEO-PNT-Trägerfrequenz). Der Vorteil der hohen Frequenz ist ein kleineres Antennenelement in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ des Signals. Bei Ku = 18 GHz hat das Antennenelement eine Größe von etwa 3,2 mm und bei L = 1,5 GHz von etwa 30 mm. Eine Ku-Band-Antenne mit 30 Elementen hat damit eine Abmessung von 5 cm und ist kaum größer als die entsprechende Antenne im L-Band (ca. 4 cm). Die Baugröße der Antenne ist nicht das Problem. Das Problem für das Endgerät ergibt sich nach Abb. 3 aus der Tatsache, dass hinter jedem Element der Array-Antenne eine eigene Front-End-Elektronik sitzt (Vorverstärker, Mischstufe, A/D-Wandler). Des Weiteren müssen die dreißig und mehr Antennensignale in einem speziellen Digitalchip vorverarbeitet werden (Array-Prozessierung vor der Korrelation). Auch auf der

Phased Array Receiver

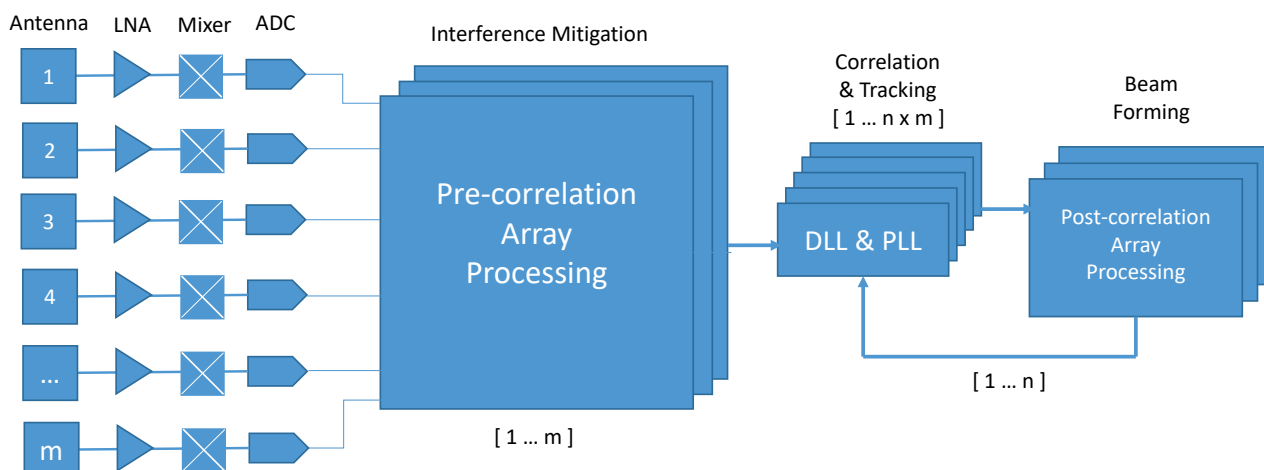


Abb. 3: Konzeptioneller Aufbau eines LEO-PNT-Empfängers für höhere Trägerfrequenzen

Cuntz et al. 2016

Nachverarbeitungsebene (Array-Prozessierung nach der Korrelation) ist ein zusätzlicher Rechenaufwand bzw. Chip erforderlich. Jeder Satellit (n Satelliten insgesamt) wird in dieser Empfängerstruktur mit m Antennen und Regelkreisen verfolgt. Es ergibt sich insgesamt eine Steigerung der Komplexität eines Ku-Band-Empfängers um den Faktor von mindestens m (Zahl der Array-Elemente). Eine vereinfachte lineare Abschätzung würde bei $m = 30$ Antennen zu einer Leistungsaufnahme von rd. 45 W relativ zu einem heutigen geodätischen Empfänger mit 1,5 W führen. Als Gegenmaßnahme bleibt hier nur die höhere Halbleiterintegration unterhalb von 5 nm (Abstand von zwei Transistoren auf Siliziumstruktur). Mit dieser Technologie wären hohe Fertigungskosten der Chips verbunden, die dann den Preis des Endgerätes sicherlich nach oben treiben würden. Dies gilt unter der Annahme, dass der professionelle Empfängermarkt keinen Massenmarkt darstellt. Sollten solche Empfänger für autonome Fahrzeuge in großer Zahl eingesetzt werden, kann sich bezüglich der Produktkosten ein günstigeres Bild ergeben.

5.3 Bedeutung des LEO-PNT für die präzise Punktbestimmung (PPP)

Eine wichtige Motivation für ein LEO-PNT besteht in der Verkürzung der Konvergenzzeit bei der Mehrdeutigkeitsbestimmung in der präzisen Punktbestimmung (PPP). Erste Simulationen siehe Hong et al. (2023) oder Juez (2023) zeigen, dass die Konvergenzzeiten für die Bestimmung der reellwertigen und auch ganzzahligen Phasen-Mehrdeutigkeiten des MEO-PNT (bei Hinzunahme von LEO-Messungen) um einen Faktor 10 verkürzt werden können. Geht man nach dem Stand der Technik der MEO-Mehrdeutigkeitsbestimmung bei einem Multi-Systemansatz (GPS, Galileo, Beidou, GLONASS) von ca. 3 Minuten Konvergenzzeit aus, so könnte bei der Einbeziehung von LEO-Beobachtungen die Konvergenzzeit auf unter 20 s reduziert werden. Diese Möglichkeit ist für das autonome Fahren sehr wichtig. Aber auch die kinematische Vermessung und die präzise Landwirtschaft können davon profitieren. Für den Einsatz von Bearbeitungsrobotern, z. B. im Weinbau oder im Spargelbau kommt es auf eine sehr schnelle und sichere Akquisition bzw. Re-Akquisition der Position mit Zentimetergenauigkeit an. Im klassischen Ansatz werden die Pseudostrecken und Trägerphasen auf mindestens zwei Trägerfrequenzen nach Kouba et al. (2017) ionosphärenfrei linear kombiniert und in einem Schätzprozess (Kalman Filter bzw. Methode der kleinsten Quadrate in sequentieller Formulierung) bestimmt. Aus der Ausgleichsrechnung ist hierbei bekannt, dass sich unbekannte Parameter über die Zeitachse besser schätzen lassen, wenn die Spaltenvektoren der Beobachtungsmatrix sich stärker mit der Zeit ändern. Aufgrund der großen Entfernung der MEO-Satelliten von der Erde ist die kinematische Variation eher langsam. Bei LEO-Satelliten im niedrigen Orbit ändert sich die Distanz zur Erde erheblich schneller. Dies hängt

Tab. 5: Streckenänderung (Maximalwert im Horizont) eines stationären Nutzers als Funktion der Flughöhe von Satelliten

Konstellation	Flughöhe [km]	Umlaufzeit [h]	Max. Änderung der Distanz [m/s]	Faktor relativ zu MEO [-]
GPS	20.000	11,9	940	1
LEO 1	1200	1,8	6100	6,5
LEO 2	600	1,6	6900	7,3

mit der zeitlichen Variation der Strecke zwischen Beobachter und Navigationssatellit zusammen, die auch direkt die Größe des Doppler-Effektes beeinflusst (Tab. 5).

Die bisher durchgeführten Simulationen (Hong et al. 2023) kombinieren MEO-PNT-Pseudo-Range- und Phasenbeobachtungen mit entsprechenden LEO-PNT-Messungen. Die LEO-PNT-Messungen werden beim Fehlermodell als normalverteiltes Rauschen modelliert. In der Realität sind die Messwerte zu den LEOs aber auch mit konstanten Fehlern (Bias-Fehler) auf Kode und Phase verfälscht. Dies gilt insbesondere, falls die Bahn- und Zeitbestimmung an Bord des Satelliten autonom mit einem GNSS-Empfänger durchgeführt wird. Die von den Modulationen abhängigen elektrischen Laufzeiten zwischen dem GNSS-Empfänger und dem Phasenzentrum der LEO-Satellitenantenne sind schwer zu präzisieren, da diese auch temperaturabhängig und abhängig von der Alterung der Bauteile sind. Von daher ist die prinzipielle Problematik bei LEO-PNT nicht anders als bei den MEO-Systemen. Es stellt sich somit die Frage, wie groß ein Bodensegment von Referenzstationen sein muss, um diese Bias-Größen zu bestimmen (da LEOs niedrig fliegen, benötigt man aufgrund der limitierten Sichtbarkeitsintervalle viel mehr Referenzstationen als bei MEOs). Es ist im Moment festzustellen, dass die Protagonisten des hochpräzisen LEO-PNT das Bias-Problem in der Satellitennutzlast ignorieren. Zu diesem Thema müssen weitere Forschungsarbeiten durchgeführt werden. Ein weiterer offener Punkt bei LEO-PNT besteht in der Fragestellung, wie solche zukünftigen Systeme in aktive RTK- bzw. PPP-RTK-Netzwerke einbezogen werden sollen.

6 Schlussbetrachtung und Ausblick

Man kann im Wesentlichen drei unterschiedliche Philosophien sehen:

Man erkennt hinter einigen Vorschlägen ein eher *conservatives* Konzept: Die Signale sind hierbei weitgehend kompatibel mit den L-Band-Signalen des MEO-PNT. Es wird versucht, z. B. durch Abstrahlung höherer Leistung, einige Performance-Lücken der MEO-Systeme zu schließen. Vorteile sind ein niedriges Entwicklungsrisiko, eine

hohe Akzeptanz der Nutzer und die Weiterverwendbarkeit der bestehenden L-Band-GNSS-Empfänger. Das Problem liegt im Auffinden von nutzbarer Signalbandbreite im stark besetzten L-Band.

Hinter vielen Vorschlägen, insbesondere bei der Verwendung von Kommunikationssatelliten für die Positionierung, steht ein klar *visionäres* Konzept, das im Endeffekt zu einer Fusion von Kommunikation und Navigation führt. Hierbei wird man in den NTN (Non-Terrestrial Networks) im 5G-/6G-Standard das Ku-Band nutzen müssen. Die Konzepte sind sehr ambitioniert. Allerdings besteht das Risiko in einer hohen Akzeptanzschwelle bei den PNT-Nutzern. Die Endgeräte müssen komplett neu entwickelt werden. Fraglich ist, ob man im Ku-Band die gleichen hochintegrierten Formfaktoren (SWAPs) erreichen kann wie heute im L-Band.

Es ist drittens noch ein *pragmatisches* Konzept erkennbar. Hierbei wird das L-Band mit dem C-Band, beispielsweise auf zwei Frequenzen kombiniert. Die Hinzunahme des C-Bandes ergibt einen neuen Freiheitsgrad auf der Frequenzachse. Das Entwicklungsrisiko ist moderat und die End-Geräte müssen im Prinzip nur im Front-End erneuert werden. Der Empfang mit einer Antenne ist gut möglich.

»Alles auf Anfang«? Der Paradigmenwechsel vom LEO-zum MEO-Orbit im Jahr 1973 wird nun wieder teilweise revidiert: Allerdings werden für LEO-PNT die modernsten Technologien eingesetzt.

Anhang

Das Verhältnis zu empfangener Leistung C des Signals und der Rauschleistung N_0 in 1 Hz-Bandbreite ist ein primärer Parameter in einem Satellitennavigationssystem. Zum Verständnis der in Abschnitt 5 durchgeführten Analysen und der abgeleiteten Aussagen sollen an dieser Stelle kurz die wesentlichen Formeln angegeben werden:

- Such-Rate für die Akquisition des Signals [Zellen/sec]:

$$S_R \sim \frac{C}{N_0} \times \text{Faktor}(P_d, P_{fa}) \tag{A-1}$$

- Bit-Fehler-Wahrscheinlichkeit für die Demodulation der Navigationsdaten:

$$P_e = \frac{1}{2} \left[1 - \text{erf} \left(\sqrt{\frac{C/N_0}{R_b}} \right) \right] \tag{A-2}$$

- Genauigkeit der Laufzeitmessung bzw. Kode-Messung (1σ):

$$\sigma_R \sim T_c \sqrt{\frac{B_L}{C/N_0}} \tag{A-3}$$

- Genauigkeit der Phasenmessung (1σ)

$$\sigma_\phi \sim \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt{\frac{B_L}{C/N_0}} \tag{A-4}$$

- Störsicherheit:

$$\left(\frac{C}{N_0} \right)_{eq} = \frac{\frac{C}{N_0}}{1 + \frac{C}{N_0} \frac{J/S}{2QR_c}} \tag{A-5}$$

Die Variablen in den Beziehungen haben die folgende Bedeutung:

Parameter Definition

P_d	Wahrscheinlichkeit der Detektion des Signals
P_{fa}	Wahrscheinlichkeit einer falschen Detektion (Falsch-Alarm-Wahrscheinlichkeit)
R_b	Bit-Rate der Navigationsdaten (Datenfrequenz)
R_c	Chip-Rate des Spreizkodes (Kodefrequenz)
T_c	Länge des Kodechips ($c = T_c \times R_c$) mit Lichtgeschwindigkeit c
λ	Wellenlänge des Trägersignals
J/S	Verhältnis von Störleistung zu Signalleistung
Q	Gütefaktor der Signalstruktur (Charakteristik für Signalform)
B_L	Rauschbandbreite des Empfängers
N_0	Rauschleistung, $N_0 = k_b T_{sys}$ (Boltzmann Konstante \times System-Temperatur des Empfängers)

Man erkennt an den Systemgleichungen (A-1) bis (A-5) die Abhängigkeit vom C/N_0 des GNSS-Signals. Das C/N_0 muss eine ausreichende Größe besitzen, damit der Empfänger im Satellitennavigationssystem, wie erwartet, funktioniert.

Erklärung und Dank

Das Papier gibt die persönliche Sicht und Einschätzungen des Autors wieder. Es stellt keine raumfahrtpolitische Bewertung des LEO-PNT von institutioneller oder staatlicher Seite dar. Es wurde versucht, eine möglichst objektive Einführung in den Themenkomplex der Satellitennavigation aus dem niedrigen Erdorbit zu geben. Aufgrund von Limitierungen bei der Seitenzahl konnten nicht alle Aspekte des LEO-PNT beleuchtet werden. Das Papier verwendet Auszüge aus einer Studie (242 Seiten), die die Universität der Bundeswehr für die Deutsche Raumfahrtagentur (DLR) in Bonn unter der Vertragsnummer 313/2022/6831737 in den Jahren 2022 bis 2023 durchgeführt hat. Wir bedanken uns bei der DLR-Raumfahrtagentur für die Förderung des Vorhabens.

Literatur

- Cuntz, M., Kononov, A., Meurer, M. (2016): Concepts, development, and validation of multi-antenna GNSS receivers for resilient navigation. In: Proceedings of the IEEE, vol. 104, issue 6, 1288–1301. DOI: 10.1109/JPROC.2016.2525764.
- Eissfeller, B., Pany, T., Dötterböck, D., Förstner, R. (2024): A Comparative Study of LEO-PNT Systems and Concepts. In: Proceedings of the ION 2024 Pacific PNT Meeting, Honolulu, Hawaii, April 2024, 758–782. DOI: 10.33012/2024.19646.
- EO Portal (2024): Iridium NEXT (Hosting Payloads on a Communications Constellation). https://www.eoport.org/maintenance_page/#space--hardware-components, letzter Zugriff 04.12.2024.
- European Commission (2023): Press release on Space: Commission invites the industry to submit proposals to deploy the new EU secure connectivity satellite constellation, IRIS². EC Media, March 24, Brussels.
- EUSPA (2024): EO and GNSS Market Report. Issue 2, European Union Agency for the Space Programme, Publication Office of the European Union, Luxembourg. DOI: 10.2878/73092.
- Fai, Ng, H. (2016): RNSS & ITU Radio Regulations. ICG-11, 6–11. Nov., Sochi, Russia.
- Forbes, S. (no year): Blackjack. Retrieved from DARPA: www.darpa.mil/program/blackjack.
- Foust, J. (2021): OneWeb continues to study offering navigation services. Retrieved from Spacenews: <https://spacenews.com/oneweb-continues-to-study-offering-navigation-services/>.
- Geely (2023): Aerospace Technology Empowering Future Mobility. Proceedings of Munich Satellite Navigation Summit, Session 9, March 13–15, Munich.
- Hansen, A., Mackey, S., Wassaf, H., Shah, V., Wallischeck, E., Scarponne, C., Barzach, M., Baskerville, E. (2021): Complementary PNT and GPS backup, Department of Transportation. Retrieved from: www.transportation.gov/sites/dot.gov/files/2021-01/FY%2718%20NDAA%20Section%201606%20DOT%20Report%20to%20Congress_Combinedv2_January%202021.pdf.
- Hong, J., Tu, R., Zhang, P., Zhang, R., Han, J., Fan, L., Wang, S., Lu, X. (2023): GNSS rapid precise point positioning enhanced by low Earth orbit satellites, *Satellite Navigation*, Springer Open Access, 13 pp. DOI: 10.1186/s43020-023-00100-x.
- Humphreys, T.E., Iannucci, P.A., Komodromos, Z.M., Graff, A.M. (2023): Signal structure of the Starlink Ku-band downlink. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 59, no. 5, 6016–6030.
- Iannucci, P., Humphreys, T. (2022): Fused Low-Earth-Orbit GNSS. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 60, no. 4, 3730–3749. DOI: 10.48550/arXiv.2009.12334.
- ITU (no year): ITU Recommendation ITU-R PN.837-1. Characteristics of precipitation for propagation modelling. Application note.
- ITU (2021): ITU-R P.833-10. Attenuation in vegetation. P-Series Radio-wave Propagation.
- Juez, A (2023): LEO-PNT: Vision, Alternatives and Challenges. GMV Presentation, Munich Satellite Navigation Summit.
- Jun, L. (2022): LEO enhanced PNT, International Committee on Global Navigation Satellite Systems (ICG): Annual Meeting (Hybrid Format). Abu Dhabi. Retrieved from: www.unoosa.org/oosa/en/our-work/icg/meetings/ICG-2022.html.
- Kan, M. (2022): Researchers Find Way to Use Starlink Signals As Alternative to GPS. *PC MAG*, 21. October. <https://uk.pcmag.com/networking/143391/researchers-find-way-to-use-starlink-signals-as-alternative-to-gps>.
- Kaplan, E. D. (1996): Understanding GPS. Principles and applications (Mobile communications series eds.), Norwood: Artech House, 256 ff.
- Kassas, Z. M., Neinavaie, M., Khalife, J., Khairallah, N., Haidar-Ahmad, J., Sharbel K., S., Shadram, Z. (2021): Enter LEO on the GNSS Stage: Navigation with Starlink Satellites. *Inside GNSS Magazine*, 29. Nov., 42–51.
- Kouba, J., Lahaye, F., Tetreault, P. (2017): Precise Point Positioning. Springer Handbook, Global Navigation Satellite Systems. Eds.: Teunissen, Montenbruck: Springer International Publishing AG, 723–747.
- Mu, X. (2023): Centispace LEO Augmentation Navigation System Status. Workshop on Low Earth Orbit (LEO) Positioning Navigation and Timing (PNT) Systems. Vienna International Centre, Vienna, 9 June. www.unoosa.org/documents/pdf/icg/2023/ICG_WG-S_LEO-PNT_Workshop_June_2023/ICG_LEO-PNT_Workshop_2023_01.pdf.
- Murata, M. (2024): Preliminary Study on JAXA LEO-PNT System. Multi-GNSS Asia, 14. Annual Conference, 30. Januar – 2. Februar, Chiang Rai.
- Prol, F.S., Morales Ferre, R., Saleem, Z., Välisuo, P., Pinell, C., Lohan, E.S., Elsanhoury, M., Elmusrati, M., Islam, S., Celikbilek, K., Selvan, K., Yliaho, J., Rutledge, K. Ojala, A., Ferranti, L., Praks, J., Bhuiyan, M. Z. H., Kaasalainen, S., Kuusniemi, H. (2022): Position, Navigation, and Timing (PNT) Through Low Earth Orbit (LEO) Satellites: A Survey on Current Status, Challenges, and Opportunities. *IEEE ACCESS*, Volume 10, 83971–84002. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3194050.
- Reid, T. (2017): Orbital diversity for global navigation satellite systems. Stanford University: Dissertation.
- Reid, T., Banville, S., Chan, B., Gunning, K., Manning, B., Marathe, T., Neish, A., Perkins, A., Sibois, A. (2022): PULSAR. A New Generation of commercial satellite navigation. Presentation, ION GNSS+, Denver, Colorado.
- Reid, T., Neish, A.M., Todd, W., Enge, P.K. (2018): Broadband LEO constellations for navigation. *NAVIGATION*, 65(2), 205–220. DOI: 10.1002/navi.234.
- Ries, L., Anghileri, M., Prieto-Cerdeira, R. (2023): FutureNAV LEO-PNT, In-Orbit Demonstration and Future System Perspectives. Workshop on Low Earth Orbit (LEO) Positioning Navigation and Timing (PNT) Systems, Vienna International UN Centre, Vienna, 9 June. www.unoosa.org/documents/pdf/icg/2023/ICG_WG-S_LEO-PNT_Workshop_June_2023/ICG_LEO-PNT_Workshop_2023_01.pdf.
- Shannon, P. (2022): Leveraging a LEO Satellite Constellation for Accurate & Reliable PNT-Less is More “The Case for Going Aggressively Small”. 27th PNT Advisory board meeting, Redondo Beach, CA, Nov. 16-17. <https://www.gps.gov/governance/advisory/meetings/2022-11/>.
- Stansell, T. A. (1978): The TRANSIT Navigation Satellite System, Status, Theory, Performance, Applications. MAGNAVOX Government and Industrial Electronics Company, Report R-5933A, Printed in U.S. in June, 1983.
- UNOOSA (2024): International Committee on Global Navigation Satellite Systems (ICG)-18, United Nations Office for Outer Space Affairs, Wellington, New Zealand, 6–11 October.
- Whelan, D., Gutt, G., Enge, P. (2011): Boeing timing & location. An indoor capable time transfer and geolocation system. Presentation Stanford PNT Symposium, Retrieved from: https://web.stanford.edu/group/scpnt/pnt/PNT11/2011_presentation_files/13_Whalen-PNT2011.pdf.

Kontakt

Prof. i. R. Dr.-Ing. habil. Bernd Eissfeller
 Exzellenter Emeritus
 Universität der Bundeswehr München
 Werner-Heisenberg-Weg 39, 85579 Neubiberg
 bernd.eissfeller@unibw.de

Dieser Beitrag ist auch digital verfügbar unter www.geodaesie.info.