

Energieforschungsprogramm – Ausschreibung 2023

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Energieforschungsprogramm

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

31/03/2026

Projekttitel: STARS

Schwarz Start Algorithmen durch
Resiliente Satellitenkommunikation

Projektnummer: FO999914870

Energieforschungsprogramm – Ausschreibung 2023

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Ausschreibung	Ausschreibung Energieforschungsprogramm 2023
Projektstart	01.10.2024
Projektende	31.12.2025
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	15 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	Salzburg Research Forschungsgesellschaft m.b.H. AIT Austrian Institute of Technology GmbH Universität Passau Lehrstuhl für Informatik mit Schwerpunkt Rechnernetze und Rechnernetzwerkommunikation
Ansprechpartner	Christof Brandauer
Postadresse	Jakob-Haringer-Straße 5/3, 5020 Salzburg
Telefon	+43 662 2288 200
Fax	+43 662 2288 222
E-Mail	info@salzburgresearch.at
Website	www.salzburgresearch.at

STARS

Schwarz Start Algorithmen durch Resiliente Satellitenkommunikation

AutorInnen:

Edmund Widl, Anta Adolfo (AIT)

Anna Volkova, Prof. Hermann de Meer (Universität Passau)

Christof Brandauer, Jonas Wahnig (Salzburg Research)

Energieforschungsprogramm – Ausschreibung 2023

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	4
2	Einleitung	5
2.1	Aufgabenstellung	5
2.2	Schwerpunkte des Projektes	5
2.3	Einordnung in das Programm	6
2.4	Verwendete Methoden	6
2.5	Aufbau der Arbeit	7
3	Inhaltliche Darstellung	7
3.1	Problemstellung	7
3.2	Stromnetzmodell	9
3.3	Black-Start-Algorithmus	11
3.4	IKT-Systemmodell	12
3.4.1	Annahmen Satellitennetzwerkmodellierung	12
3.4.2	Annahmen zur Modellierung terrestrischer Netzwerke	13
3.5	Methodik zur analytischen Charakterisierung der Latenzen im hybriden Netzwerk unter verschiedenen Wettereinflüssen	14
3.5.1	Definition des Problems der Kommunikation mit minimaler Latenz	14
3.5.2	Analytische Charakterisierung der Verbindungskapazität	15
3.5.3	Ermittlung stabiler Netzwerkkonfigurationen	16
3.5.4	Modellierung von Wetterstörungen	17
3.5.5	Reduktion des aggregierten Graphen	20
3.6	Methodik zur Charakterisierung von Latenzzeiten durch Messungen	20
3.7	Co-Simulation Setup	22
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	23
4.1	Ergebnisse der analytischen Untersuchung von Latenzzeiten und Wetterauswirkungen	23
4.1.1	Untersuchung zur Beeinträchtigung der Verbindungskapazität	24
4.1.2	Auswirkungen der degradierten Linkkapazität auf die End-to-End-Latenz	26
4.2	Starlink Messungen	28
4.2.1	Tagesabhängigkeiten	32
4.3	Charakterisierung der Latenz	33
4.4	Charakterisierung des Fehlermodells	34
4.5	Schwarzstart-Simulation	34
5	Ausblick und Empfehlungen	39
5.1	Empfehlungen aus der analytischen Untersuchung	39
5.2	Empfehlungen aus der simulationsbasierten Untersuchung	39
6	Literaturverzeichnis	43
7	Kontaktdaten	45

Energieforschungsprogramm – Ausschreibung 2023

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

2 Einleitung

2.1 Aufgabenstellung

Die Gewährleistung der Versorgungssicherheit ist das zentrale Leitprinzip für Planung und Betrieb elektrischer Energiesysteme. Der steigende Anteil volatiler, leistungselektronisch gekoppelter Erzeugungsanlagen (*inverter-based resources*, IBR) reduziert jedoch Systemträgheit und Kurzschlussleistung und erhöht damit die Anfälligkeit für großflächige Störungen und Blackouts [1]. Zusätzliche Risiken ergeben sich durch klimawandelbedingte Extremwetterereignisse wie Waldbrände oder Eisstürme, die gleichzeitige Komponentenausfälle begünstigen. Im Falle eines Blackouts muss die Netzwiederherstellung (Schwarzstart) schnell, koordiniert und stabil erfolgen. Dabei gewinnt die informations- und kommunikationstechnische (IKT) Unterstützung zunehmend an Bedeutung, insbesondere durch die wachsende Anzahl dezentraler und netzbildender Erzeugungseinheiten. Gleichzeitig sind konventionelle terrestrische Kommunikationsinfrastrukturen bei langanhaltenden Stromausfällen nur begrenzt verfügbar, was die Umsetzbarkeit zentral koordinierter Restaurationsstrategien einschränkt. Nicht-terrestrische Kommunikationssysteme, insbesondere Satellitennetze in erdnahen Umlaufbahnen (*Low Earth Orbit*, LEO), bieten potenziell eine resiliente Alternative zu terrestrischen Netzen [2]. Deren dynamische Topologie und Wetterabhängigkeit erfordern jedoch eine fundierte Leistungsbewertung im Hinblick auf die strengen Latenz- und Zuverlässigkeitsanforderungen von Schwarzstartprozessen.

Ziel des STARS-Projektes ist die Entwicklung und Bewertung einer integrierten Simulationsumgebung, welche die Dynamik von LEO-Satellitenkommunikation und Netzwiederaufbaustrategien gemeinsam abbildet. Auf dieser Grundlage soll die technische Machbarkeit sowie der potenzielle Nutzen von LEO-Kommunikationssystemen für kommunikationsabhängige Schwarzstartverfahren systematisch untersucht werden.

2.2 Schwerpunkte des Projektes

Im Rahmen von STARS wurde zunächst ein kommunikationsbasierter Schwarzstartregler für die Wiederherstellung des Übertragungsnetzes entwickelt. Der Regler wurde in ein gekoppeltes Modellierungsframework eingebettet, das das elektrische Übertragungsnetz mit einem LEO-Satellitenkommunikationsnetz verbindet. Neben der rein simulationsbasierten Abbildung des Systems erfolgte eine analytische Modellierung der Kommunikations- und Systemdynamik, um Stabilitätsbedingungen und Robustheitskriterien formal zu untersuchen und die regionalen Szenarien und Zusammenhänge besser zu verstehen. Zusätzlich wurde ein Modellierungsansatz integriert, der die nachteiligen Auswirkungen extremer Wetterereignisse auf das hybride terrestrisch-satellitengestützte Netzwerk bewertet. Auf dieser Grundlage lassen sich koordinierte Stromnetzdienste wie Restaurationsmaßnahmen oder Monitoring über nicht-

Kommentiert [AV1]: M. Braun, J. Brombach, C. Hachmann, D. Lafferte, A. Klingmann, W. Heckmann, F. Welck, D. Lohmeier und H. Becker, „The Future of Power System Restoration: Using Distributed Energy Resources as a Force to Get Back Online,“ *IEEE Power and Energy Magazine*, Bd. 16, Nr. 8, pp. 30-41, 2018.

Kommentiert [AV2]: A. Volkova, J. Schmidhuber, H. de Meer, R. Hess, K. Schilling, A. Wellhöfer und M. H. Zink, „Design and Simulation of LEO Satellite Communication Networks for Reliable Monitoring and Control in Power Systems,“ *Proceedings of the DACH+ Conference on Energy Informatics, ACM Energy Informatics Review*, Bd. 5, Nr. 3, 2025.

Energieforschungsprogramm – Ausschreibung 2023

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

terrestrische Kommunikationsverbindungen unter variierenden Umweltbedingungen systematisch bewerten.

Zur Bewertung der Leistungsfähigkeit kommerzieller Satellitenkommunikation wurde eine strukturierte Methodik zur Performance-Analyse des LEO-Netzwerks Starlink konzipiert und umgesetzt. Diese umfasst den Aufbau einer Messinfrastruktur, die Erfassung relevanter Netzwerkparameter unter realen Betriebsbedingungen sowie eine statistische Auswertung des beobachteten Kommunikationsverhaltens.

Auf Basis der erhobenen Messdaten wurde eine datengetriebene Charakterisierungsstrategie entwickelt, mit der empirisch beobachtete Latenz- und Paketverlusteigenschaften in realistische stochastische Kommunikationsmodelle überführt werden. Diese Modelle wurden in das gekoppelte Simulationsframework integriert, um realitätsnahe Kommunikationsbedingungen in Restaurationsszenarien abzubilden.

Abschließend wurde eine auf dem Standard *Functional Mock-up Interface* (FMI) basierende Co-Simulationsumgebung implementiert. Diese erlaubt die gekoppelte Simulation der kontinuierlichen dynamischen Prozesse des Energiesystems und der ereignisbasierten Kommunikationsabläufe. Auf diese Weise können insbesondere verzögerungssensitive Regelungsinteraktionen während des Schwarzstarts präzise untersucht werden.

2.3 Einordnung in das Programm

Das Projekt STARS ist ein Sondierungsprojekt, das im Rahmen der Ausschreibung „*Energieforschung 2023*“ gefördert wurde. Es adressiert primär den Ausschreibungsschwerpunkt 2: *Basistechnologien für die Strom- und Wärmewende*.

2.4 Verwendete Methoden

Im Rahmen des Projekts wurden die folgenden Methoden angewendet:

- Die Dynamik des Übertragungsnetzes wurde durch kontinuierliche Differentialgleichungsmodelle beschrieben.
- Das Kommunikationsverhalten wurde mittels stochastischer Prozesse für Latenz und Paketverlust abgebildet. Zur Reduktion der Modellkomplexität und zur Sicherstellung redundanter Kommunikationsstrukturen wurden kapazitätsbewusste Optimierungsansätze zur Bestimmung effektiver Pfade angewandt.
- Zur Parametrisierung kamen statistische Auswertungsmethoden und Verteilungsanpassungen auf Basis empirischer Messdaten zum Einsatz.
- Die Bewertung von Stabilität und Robustheit erfolgte mithilfe zeitreichsbasierter Simulationen sowie analytischer Sensitivitäts- und Verzögerungsanalysen.

Energieforschungsprogramm – Ausschreibung 2023

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

- Die gekoppelte Untersuchung von Energie- und Kommunikationssystem erfolgte in einer Co-Simulationsumgebung, die kontinuierliche Systemdynamik und ereignisdiskrete Kommunikationsprozesse konsistent integriert.

2.5 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich in fünf aufeinander aufbauende Schritte. Zunächst wurde ein hybrides terrestrisch-satellitengestütztes IKT-Modell entwickelt, das unterschiedliche Verbindungstypen sowie wetterabhängige Einflüsse auf die Linkqualität systematisch abbildet. Dieses Modell ermöglicht ein besseres Verständnis der Systemkomplexität und der Kommunikationsflüsse zwischen terrestrischen Netzwerken, nicht-terrestrischen Netzwerken und Stromnetzkomponenten.

Ein zentral koordiniertes Schwarzstartkonzept mit einem stabilitätssichernden Regler und definierten Schwarzstartszenerarien wurde entwickelt. Darauf folgte die messtechnische Evaluation eines operativen LEO-Netzwerks (Starlink) zur Erfassung realer Kommunikationsparameter unter schwarzstartrelevanten Bedingungen. Die gewonnenen Daten wurden anschließend in ein datengetriebenes, stochastisches Latenz- und Fehlermodell überführt. Abschließend wurden Energieversorgungsmodell, Regler, Satelliten- und Kommunikationsmodell in einer integrierten Simulationsumgebung zusammengeführt, um die Auswirkungen der Kommunikationsdynamik auf Stabilität und Robustheit des Netzwiederaufbaus zu analysieren.

3 Inhaltliche Darstellung

3.1 Problemstellung

Die Schwarzstart- und Wiederaufbauprozesse von Übertragungsnetzen basieren zunehmend auf geografisch verteilten Erzeugungseinheiten und zentralisierten Leitstrukturen. In zukünftigen Energiesystemen werden diese Kommunikationspfade nicht ausschließlich terrestrische Infrastrukturen (z. B. LTE/5G, Glasfaser) umfassen, sondern auch nicht-terrestrische Netze einbeziehen [3]. Die Leistungsfähigkeit kommerziell verfügbarer LEO-Dienste unter realistischen Schwarzstartbedingungen ist bislang jedoch nur unzureichend untersucht. Bestehende Studien vernachlässigen entweder die Dynamik der Kommunikation vollständig oder verwenden stark vereinfachte Latenzmodelle, die nicht durch reale Messdaten validiert sind.

STARS adressiert die Konzeption und Bewertung zentral koordinierter, kommunikationsabhängiger Schwarzstartverfahren für das Übertragungsnetz, wobei eine Leitstelle mit mehreren verteilten Kraftwerksstandorten über nicht-terrestrische Kommunikationsnetze interagiert. Im Mittelpunkt stehen zwei zentrale Fragestellungen:

Kommentiert [AV3]: B. Hu, X. Zhang, Q. Zhang, N. Varyani, Z. M. Mao, F. Qian und Z.-L. Zhang, „LEO Satellite vs. Cellular Networks: Exploring the Potential for Synergistic Integration,“ in Companion of the 19th International Conference on Emerging Networking EXperiments and Technologies, Paris, France, 2023.

Energieforschungsprogramm – Ausschreibung 2023

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

1. Wie kann die Leistung des nicht-terrestrischen Netzes für Stromnetzanwendungen bewertet werden? Welche Bedeutung haben die nicht-terrestrischen Netze als Teil der hybriden Netzinfrastruktur (terrestrisch – nicht-terrestrisch)?
2. Wie lassen sich empirisch erhobene Leistungsdaten kommerzieller LEO-Dienste in Kommunikationsmodelle überführen, die für hochauflösende Restaurationssimulationen geeignet sind?
3. Wie beeinflussen Wechselwirkungen zwischen der dynamischen Systemantwort des elektrischen Energiesystems und zeitvariablen Kommunikationsverzögerungen die Stabilität und Robustheit zentraler Schwarzstartstrategien?

Zur Bearbeitung dieser Fragestellungen wurde folgende Methodik angewandt:

1. Im ersten Schritt wurde ein LEO-Satellitenkommunikationsmodell für die Kommunikation im Übertragungsnetz entwickelt. Hierzu wurde ein Modellierungsansatz für ein hybrides terrestrisch-satellitengestütztes IKT-Netzwerk konzipiert. Dieser Ansatz bildet unterschiedliche Verbindungstypen (z. B. Glasfaser, Mobilfunk, LEO-Satellitenlink) sowie deren spezifische Eigenschaften wie Latenz und Bandbreite analytisch ab. Darüber hinaus wurde ein Modellierungsansatz integriert, der die nachteiligen Auswirkungen extremer Wetterereignisse auf das betrachtete hybride Netzwerk analytisch abbildet. Dadurch können die Qualitätsparameter einzelner Kommunikationsverbindungen (z.B. Latenz und effektive Bandbreite) adaptiv in Abhängigkeit von wetterinduzierten Beeinträchtigungen analytisch bewertet werden. Diese Schritte unterstützten auch die weitere Modellierung der lokalen Szenarien im Stromübertragungs- und -Verteilungsnetz, da sie auf offene Daten zur Beschreibung der Infrastruktur abzielten.
2. Im zweiten Schritt erfolgte die Entwicklung eines zentral koordinierten Wiederaufbaukonzepts sowie die Definition repräsentativer Schwarzstartsznarien. Ein zentrales Element bildet dabei die Auslegung eines Reglers, der während des Wiederaufbauprozesses die Netzstabilität sicherstellt. Der Regelalgorithmus spezifiziert den erforderlichen Informationsaustausch zwischen der Leitstelle und den dezentralen Netzelementen.
3. Im dritten Schritt wurde eine messbasierte Evaluierung realisiert, um die Leistungsfähigkeit von LEO-Satellitenkommunikation unter für Schwarzstart relevanten Bedingungen empirisch zu erfassen. Hierzu wurden in Salzburg und Passau Zugänge zu einem kommerziell verfügbaren LEO-System (Starlink) installiert. Die Messinfrastruktur erfasste Leistungsparameter wie Latenz, Paketverlustrate, Verbindungsunterbrechungen sowie wetterabhängige Einflüsse.
4. Im vierten Schritt wurden die erhobenen Messdaten in ein datengetriebenes Latenz- und Fehlermodell überführt, das in Schwarzstartsimulationen integriert werden kann. Latenz und Paketverluste wurden statistisch charakterisiert und mithilfe parametrischer Verteilungen modelliert.
5. Im abschließenden Schritt wurden das Energiesystemmodell, der Restaurationsregler, das Satellitensystem sowie das datenbasierte Kommunikationsmodell in einer

Kommentiert [AV4]: Muss hier das extra einbauen, um meine Forschung zu integrieren

Kommentiert [CB5]: Haben wir uns nicht "nur" auf eine Phase des gesamten Schwarzstart-Verfahrens konzentriert?

Energieforschungsprogramm – Ausschreibung 2023

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

integrierten Simulationsumgebung zusammengeführt. Diese Umgebung ermöglichte eine systematische Analyse der Auswirkungen der Kommunikationsdynamik auf Stabilität und Robustheit des Wiederaufbauprozesses.

3.2 Stromnetzmodell

Während die Systemwiederherstellung sowohl Übertragungs- als auch Verteilnetze betrifft, liegt die Hauptverantwortung für den Netzwiederaufbau nach einem Blackout beim Übertragungsnetzbetreiber. Aus diesem Grund konzentriert sich die vorliegende Arbeit auf Verfahren auf der Übertragungsebene, wobei die zugrunde liegenden Konzepte grundsätzlich auch auf Verteilnetze übertragbar sind. Im Rahmen der Untersuchungen wurden zwei unterschiedliche Stromnetzmodelle betrachtet:

1. Für die **analytische Bewertung** wurde das Stromnetz stark abstrahiert. Die Netzelemente wurden als rein geografische Punkte modelliert, ohne explizite Abbildung physikalischer Leitungen oder elektrischer Netzparameter. Diese Vereinfachung ermöglichte eine fokussierte Analyse der Kommunikationsstruktur, der Routingoptimierung sowie der Latenz- und Kapazitätsmodelle bei reduzierter Komplexität. Für die Modellierung der Netzinfrastruktur wurden Geodaten aus OpenStreetMap¹ sowie aus der Open Energy Platform² verwendet.
2. Für die **gekoppelte Energie- und Kommunikationssimulation** wurde eine detailliertere Stromnetzkonfiguration eingeführt. Dieses Modell erlaubt die Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Kommunikationsverzögerungen und energietechnischer Systemdynamik im Kontext von Schwarzstart- und Restaurationsszenarien.

Schwarzstart-Prozesse bestehen aus einer Abfolge eng aufeinander abgestimmter Schritte, die eine zuverlässige Kommunikation erfordern, um eine sichere und geordnete Wiederherstellung des Energiesystems zu gewährleisten. Üblicherweise beginnt der Prozess mit der Beanspruchung eines ersten Netzabschnitts mithilfe schwarzstartfähiger Kraftwerke (zum Beispiel Wasserkraftwerke, obwohl heutzutage auch Batteriespeichersysteme in Betracht gezogen werden). Anschließend werden weitere Erzeugungsanlagen schrittweise synchronisiert, sodass das Übertragungsnetz sukzessive wieder aufgebaut wird. Sobald das Übertragungsnetz ausreichend stabilisiert ist, erfolgt die Wiederschaltung der Verteilnetze. In dieser Arbeit werden zentralisierte Wiederherstellungsansätze betrachtet, da in der Praxis die Koordination weltweit überwiegend durch zentrale Entscheidungsstrukturen der Systembetreiber erfolgt.

Obwohl der gesamte Netzwiederaufbauprozess zahlreiche Phasen umfasst, liegt der Fokus hier auf einem spezifischen, besonders kommunikationsintensiven Schritt. Dieser dient dazu

¹ <https://www.openstreetmap.org/>, Zugriff: 20.01.2026

² <https://openenergy-platform.org/>, Zugriff: 20.01.2026

Energieforschungsprogramm – Ausschreibung 2023

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

zu zeigen, wie satellitengestützte Kommunikation während eines Schwarzstarts eine resiliente Alternative zu terrestrischen Kommunikationsinfrastrukturen darstellen kann.

Konkret betrachten wir die Phase nach der Bespannung im Übertragungsnetz, wenn die Lastzuschaltung beginnt und ein stabiler Betrieb eine wirksame Spannungs- und Frequenzregelung erfordert. In diesem Stadium werden Spannungs- und Frequenzmessungen an verschiedenen Netzknoten erfasst und an einen zentralen Regler übermittelt, der die Einhaltung der vorgegebenen Sollwerte sicherstellt.

Da die Netzfrequenz im gesamten System nahezu ähnlich ist, kann eine angemessene Aufteilung der Wirkleistung dezentral auf Basis lokaler Messgrößen realisiert werden. Die Spannung hingegen ist eine ortsabhängige Größe und variiert im Netz. Während eine lokale Spannungsregelung grundsätzlich unabhängig erfolgen kann, erfordert eine korrekte Aufteilung der Blindleistung in der Regel eine Kommunikation zwischen den Erzeugungsanlagen.

Dieses Regelungskonzept ist in Abbildung 1 anhand des IEEE-9-Bus-Testsystems dargestellt. Die Netzfrequenz wird mit f bezeichnet, die Blindleistung der Anlagen mit Q_i , und die Sollwerte für Wirkleistung und Spannung mit P_i beziehungsweise V_{ref_i} . Die Übertragungsleitungen werden durch π -Sections modelliert, während die Lasten als passiv angenommen werden. Jede Erzeugungsanlage ist über einen Hochspannungstransformator mit dem Netz verbunden.

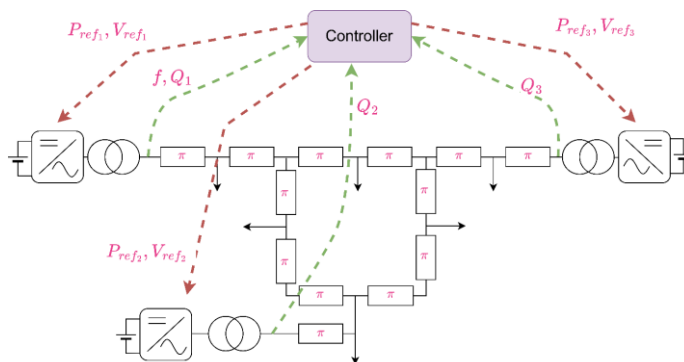


Abbildung 1 - IEEE 9-Bus Stromnetz Modell. Der Regler erhält Frequenz- und Blindleistungsmessungen und passt die Sollwerte für Wirkleistung und Spannung an.

Da der Fokus auf Hochspannungsübertragungsnetzen liegt, werden die Leitungen als überwiegend induktiv angenommen. Unter dieser Annahme wird die Frequenz im Wesentlichen durch die Wirkleistung beeinflusst, während die Spannung über die Blindleistung geregelt wird, sodass eine Entkopplung beider Regelkreise möglich ist. Zur Vereinfachung werden für die Winkeldynamik sogenannte „droop“-basierte Regler zur Sicherstellung einer proportionalen Wirkleistungsaufteilung verwendet, während ein PI-Regler die lokale Spannungsamplitude regelt. Sowohl Wirk- als auch Blindleistung werden mithilfe von Tiefpassfiltern gemessen.

Energieforschungsprogramm – Ausschreibung 2023

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Abschließend ist anzumerken, dass das Design der Regler üblicherweise ohne explizite Berücksichtigung von Kommunikationsverzögerungen erfolgt. Zwar existieren Methoden zu *time-delay Systems*, diese sind jedoch häufig komplex und berücksichtigen meist nur konstante Verzögerungen oder Worst-Case-Delays, was zu konservativen Parametrierungen führen kann. In dieser Arbeit werden das Netzmodell sowie die zugrunde liegenden netzbildenden Regler von [4] verwendet.

3.3 Black-Start-Algorithmus

Im Folgenden werden zwei Regler für Spannung und Frequenz betrachtet, die alle verfügbaren Kraftwerke koordinieren. Wie zuvor erläutert, können Frequenz und Spannung in Übertragungsnetzen näherungsweise als entkoppelt angenommen werden. Im Fall der Frequenzregelung werden die Wirkleistungs-Sollwerte auf Basis der gemessenen Frequenz angepasst, um die Frequenz auf den Nennwert f_{ref} (50 Hz bzw. 60 Hz) zurückzuführen und die Leistungsflüsse entsprechend einzustellen:

$$P_{ref_i} = \frac{S_{nom_i}}{\sum_i S_{nom_i}} (K_{pf} e_f + K_{i_{fnt}} \int e_f(t) dt)$$

wo $e_f = f_{ref} - f$ die Frequenzabweichung bezeichnet, f die gemessene Frequenz (typischerweise an einem netzstarken Knoten), K_{if} und K_{pf} die PI-Reglerparameter, P_{ref_i} den Wirkleistungs-Sollwert der Anlage i und S_{nom_i} deren Nennleistung.

Analog dazu werden bei der Blindleistungsregelung die Spannungssollwerte der einzelnen Erzeugungsanlagen so verteilt, dass eine angemessene Leistungsaufteilung gewährleistet ist:

$$V_{ref_i} = K_{pQ} e_Q + K_{iQ} \int e_Q(t) dt$$

Hierbei ist $Q_{ref_i} = \frac{S_{nom_i}}{\sum_i S_{nom_i}} \sum_i Q_{nom_i}$ die von Anlage i bereitzustellende Soll-Blindleistung, $e_Q = Q_{ref_i} - Q_i$ die Blindleistungsabweichung, V_{ref_i} der Sollwert für den lokalen Spannungsregler und K_{iQ} sowie K_{pQ} sind die entsprechenden PI-Reglerparameter.

Die Reglerparameter werden so ausgelegt, dass eine schnelle und präzise Nachführung der Sollwerte erreicht wird, üblicherweise ohne explizite Berücksichtigung von Kommunikationsaspekten (Latenzen, Verluste). Im Gegensatz zur klassischen Sekundärregelung im Normalbetrieb, die auf einer Zeitskala von mehreren zehn Sekunden arbeitet, ist im Black-Start-Fall eine deutlich schnellere Regelung erforderlich, um den Netzwiederaufbau zu beschleunigen. Dadurch reagieren die Regelkreise empfindlicher auf Kommunikationsverzögerungen und -ausfälle.

Es ist zu beachten, dass die Frequenz im stationären Zustand im gesamten Netz identisch ist. Für eine übergeordnete Regelung genügt daher im Prinzip eine Messung an einem einzelnen

Energieforschungsprogramm – Ausschreibung 2023

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

(idealerweise netzstarken) Knoten in der Nähe einer großen Erzeugungsanlage. Die Spannungen hingegen können sich zwischen verschiedenen Netzknoten unterscheiden. Bei nahegelegenen Knoten können die PI-Spannungsregler gegebenenfalls durch reine P-Regler ersetzt werden, um unerwünschte Wechselwirkungen zwischen den Anlagen zu vermeiden.

3.4 IKT-Systemmodell

3.4.1 Annahmen Satellitennetzwerkmodellierung

In dieser Arbeit wurde eine Kommunikationsarchitektur für das elektrische Energiesystem angenommen, die auf einem Satellitennetzwerk basiert.

Es wurden zwei Kommunikationsszenarien analysiert:

1. Der Fall, in dem das Satellitennetzwerk nur im weltraumgestützten Modus arbeitet, wurde als optimaler Betriebsmodus analysiert. Das vorgeschlagene LEO-Satellitensystem basiert auf einer von terrestrischer Infrastruktur unabhängigen Routing-Architektur, bei der die Weiterleitung sämtlicher Datenpakete von Netzknoten ausschließlich über Inter-Satelliten-Links erfolgt. Bodenstationen oder terrestrische Relaisknoten werden im Routing nicht berücksichtigt. Im Rahmen der Untersuchung wurde auch ein hybrides Netzwerk analysiert. Dabei wurde ein terrestrisches, zelluläres Long Term Evolution (LTE)-Netz mit einem LEO-Satellitensystem ergänzt.
2. Für eine realistischere Co-Simulationskonfiguration wurde eine Konfiguration eingeführt, bei der terrestrische Knoten wie Bodenstationen in die Kommunikation einbezogen wurden.

Für die analytische Bewertung wurden LEO-Satellitensystemmodelle verwendet, die mit dem Simulationstool Hypatia [5] generiert wurden. Die Satellitenkomponente basierte auf mit dem Hypatia-Framework generierten Konstellationsdynamiken, welche zeitabhängige Orbitalpositionen, Inter-Satelliten-Links (ISL), Ground-Satellite-Links (GSL) sowie Routingpfade bereitstellen. Entsprechend resilienter Architekturkonzepte wurde das LEO-Satellitennetz unter der Annahme eines gateway-unabhängigen Routings modelliert, bei dem die Weiterleitung der Datenpakete primär über ISL erfolgt.

Für den simulationsbasierten Ansatz wurde ein realitätsnäheres Modell des LEO-Satellitennetzes verwendet. Zur Anpassung an die spezifischen Anforderungen in STARS wurden Erweiterungen am zugrunde liegenden Netzwerksimulator ns-3 implementiert. Erstens wurde ein angepasstes Routingverfahren integriert: Basierend auf den Ergebnissen der Messkampagne wird der Datenverkehr zwischen Nutzerterminals (Netzelemente und Leitstelle) nicht direkt, sondern über die jeweils nächstgelegene permanente Bodenstation geführt. Das standardmäßige kürzeste-Pfad-Routing von Hypatia wurde entsprechend modifiziert. Zweitens wurden zusätzliche Verarbeitungslaufzeiten berücksichtigt. Während Hypatia standardmäßig lediglich die physikalisch bedingten Ausbreitungsverzögerungen über ISL und GSL modelliert, wurden hier deterministische und stochastische Verzögerungsanteile ergänzt, um real beobachtete

Kommentiert [AV6]: S. Kassing, D. Bhattacharjee, A. B. Aguas, J. E. Saethre und A. Singla, „Exploring the “Internet from space” with Hypatia,” in Proceedings of the ACM Internet Measurement Conference, Virtual Event, USA, 2020.

Energieforschungsprogramm – Ausschreibung 2023

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Paketlaufzeiten abzubilden. Drittens wurde ein einfaches Burst-Fehlermodell implementiert, das auf den im Rahmen der Messkampagne ermittelten Netzwerkleistungskennzahlen basiert und realistische Paketverlustmuster nachbildet.

Die Netzelemente des Energiesystems sind über Dual-Mode-Modems angebunden, die sowohl satellitengestützte als auch terrestrische Kommunikation unterstützen [6]. Boden-Satelliten-Verbindungen können grundsätzlich zwischen allen Netzknoten und jeweils sichtbaren Satelliten aufgebaut werden. In der Praxis ist dies jedoch durch technologische Restriktionen hinsichtlich der verfügbaren Schnittstellen begrenzt. So kann beispielsweise ein Starlink-Satellit gleichzeitig bis zu 48 Downlink-Beams zur Erde ausrichten, realisiert über drei Phased-Array-Antennen mit jeweils 16 Beams [7]. Die Anzahl der Nutzer pro Beam hängt unter anderem von der verfügbaren Bandbreite, dem Versorgungsgebiet, der individuellen Datenrate, der spektralen Effizienz sowie weiterer Systemparameter ab. Auch die Anzahl der Inter-Satelliten-Links ist limitiert; Starlink V2 Mini-Satelliten verfügen beispielsweise über drei operative Inter-Satelliten-Verbindungen³. Der in dieser Arbeit verwendete Modellierungsansatz berücksichtigt eine Obergrenze für die Anzahl gleichzeitig unterstützter Verbindungen, ohne dabei zwischen Boden-Satelliten- und Inter-Satelliten-Links zu unterscheiden.

3.4.2 Annahmen zur Modellierung terrestrischer Netzwerke

Für den analytischen Ansatz wurde zusätzlich ein terrestrisches Kommunikationsnetz berücksichtigt. Dabei wird angenommen, dass das terrestrische LTE-Netz exklusiv kritischen Infrastrukturen vorbehalten ist. Die Netzwerkarchitektur umfasst Basisstationen (eNB), welche Messdaten von räumlich verteilten Netzelementen erfassen, eine LTE-Richtfunk-Backhaul-Ebene sowie ein glasfaserbasiertes Kernnetz. Backhaul- und Kernnetz transportieren die aggregierten Daten zur Leitwarte. Das Backhaul-Netz wird als Richtfunknetz im Frequenzbereich von 4-42 GHz modelliert und unterstützt Richtfunkstrecken mit Reichweiten von bis zu 55 km. Aufgrund geringer Implementierungskosten und schneller Installationsmöglichkeiten machen solche Verbindungen weltweit rund 50 % der mobilen Backhaul-Infrastruktur aus [8]. Das Kernnetz wird als ringförmige Glasfaserstruktur mit hoher Übertragungskapazität angenommen. Die Leitungen sind in der Regel unterirdisch verlegt können primär durch großflächige Naturereignisse wie Überschwemmungen beeinträchtigt werden.

Für STARS wurde eine Methodik zur Generierung eines terrestrischen LTE-Netzes auf Basis öffentlich verfügbarer Infrastrukturdaten sowie der Planungen für ein dediziertes Kommunikationsnetz angewendet. Dedizierte Netzwerke für kritische Infrastrukturen sind in letzter Zeit durch die Zuweisung der 450-MHz-Frequenz in Deutschland stärker in den Fokus gerückt⁴. Das Backhaul-Netz wird durch geografisches Clustering der Zugangsknoten entworfen. Innerhalb jedes Clusters werden die Knoten zunächst mithilfe eines Minimum-Spanning-Tree-

³ <https://www.starlink.com/technology>, Zugriff: 08.02.2026

⁴ <https://www.bundesnetzagentur.de/450MHz>, Zugriff: 30.03.2026

Kommentiert [AV7]: Z. Xu, Y. Gao, G. Chen, R. Fernandez, V. Basavarajappa und R. Tafazolli, „Enhancement of Satellite-To-Phone Link Budget: An Approach Using Distributed Beamforming,” IEEE Vehicular Technology Magazine, Bd. 18, Nr. 4, pp. 85-93, 2023.

Kommentiert [AV8]: W. Qin, A. M. Graff, Z. L. Clements, Z. M. Komodromos und T. E. Humphreys, „Timing Properties of the Starlink Ku-Band Downlink,” IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Bd. 62, pp. 727-744, 2025.

Kommentiert [CB9]: @Anna: Worauf bezieht sich das?

Kommentiert [AV10R9]: Ich modelliere nicht nur ein öffentliches terrestrisches Netz, sondern ein terrestrisches Netz in Form eines dedizierten Netzes, wie zum Beispiel 450connect in Deutschland

Kommentiert [AV11R9]: Ich habe einen Satz hinzugefügt + ref

hat formatiert: Hyperlink, Deutsch (Deutschland)

hat formatiert: Deutsch (Deutschland)

hat formatiert: Englisch (Vereinigtes Königreich)

hat formatiert: Englisch (Vereinigtes Königreich)

Feldfunktion geändert

Energieforschungsprogramm – Ausschreibung 2023

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Algorithmus verbunden und anschließend durch zusätzliche Verbindungen zu einer Mesh-Struktur erweitert. Ein Kernnetz-knoten wird jeweils im geografischen Mittelpunkt eines Clusters positioniert. Das resultierende Netz umfasst unterschiedliche terrestrische Verbindungstypen. Ein Beispiel für ein terrestrisches Kommunikationsnetzwerk mit Basisstationen und Richtfunknetz ist in Abbildung 2 dargestellt.

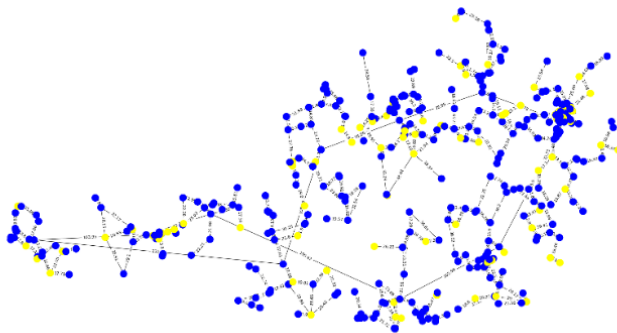


Abbildung 2 - Modell des terrestrischen Netzwerks für Österreich

Die Modellierung von witterungsbedingter Link-Degradation beschränkt sich auf Satelliten-netz-Verbindungen sowie auf das LTE-Backhaul, da hier kapazitive Einschränkungen durch lange Ausbreitungswege beziehungsweise durch die verwendeten Frequenzen auftreten. Kurzstreckenverbindungen zwischen Netzelementen und eNBs werden aufgrund ihrer geringen Distanz als weniger störanfällig angenommen. Inter-Satelliten-Links können ebenfalls beeinträchtigt sein, werden jedoch in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet und bleiben zukünftigen Untersuchungen vorbehalten.

3.5 Methodik zur analytischen Charakterisierung der Latenzen im hybriden Netzwerk unter verschiedenen Wettereinflüssen

3.5.1 Definition des Problems der Kommunikation mit minimaler Latenz

Für den analytischen Ansatz wurde das hybride satelliten-terrestrische Kommunikationsnetz mithilfe graphentheoretischer Konzepte modelliert. Die Gesamtstruktur besteht aus drei Teil-netzen: dem Stromnetz, dem terrestrischen LTE-Kommunikationsnetz sowie der LEO-Satellitenkonstellation. Jedes dieser Teilnetze wird als Knoten und Verbindungen beschrieben.

Das terrestrische LTE-Netz umfasst Zugangs-, Backhaul- und Kernknoten. Die Verbindungen zwischen diesen Knoten besitzen definierte Eigenschaften wie Übertragungskapazität, Leitungslänge und einen Parameter zur Beschreibung wetterbedingter Beeinträchtigungen.

Das Satellitennetz besteht aus einzelnen Satelliten und deren Verbindungen untereinander. Aufgrund technischer Beschränkungen kann jeder Satellit nur eine begrenzte Anzahl

Energieforschungsprogramm – Ausschreibung 2023

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

gleichzeitiger Verbindungen aufrechterhalten. Ergänzend werden Verbindungen zwischen Stromnetzknöten und LTE-Basisstationen sowie zwischen Stromnetzknöten und sichtbaren Satelliten berücksichtigt. Das gesamte Kommunikationssystem ist in ein geografisches Szenario eingebettet, wobei insbesondere die geografische Breite die Satellitensichtbarkeit und atmosphärische Dämpfung beeinflusst. Das Gesamtmodell wurde in der wissenschaftlichen Veröffentlichung [9] vorgestellt.

Die Kommunikation zwischen Netzknöten wird als Datenverkehrsnachfrage modelliert. Jede dieser Nachfragen ist durch einen Startknöten, einen Zielknöten und ein Verkehrsvolumen charakterisiert. Ziel ist es, den gesamten Kommunikationsverkehr so über das hybride Netzwerk zu verteilen, dass die Ende-zu-Ende-Verzögerung minimiert wird.

Die Gesamtverzögerung einer Verbindung setzt sich aus mehreren Anteilen zusammen:

- der Ausbreitungsverzögerung, die von der physikalischen Distanz abhängt,
- der Übertragungsverzögerung, also der Zeit zum Senden eines Pakets auf einen Link,
- der Verarbeitungsverzögerung in den Netzkomponenten,
- der Warteschlangenverzögerung, die mit zunehmender Auslastung einer Verbindung nichtlinear ansteigt.

Die Warteschlangenverzögerung wird mithilfe eines M/M/1 Warteschlangenmodells beschrieben, bei dem die Verzögerung stark zunimmt, wenn sich die übertragene Datenmenge der maximalen Linkkapazität nähert. Dadurch entsteht eine konvexe Kostenfunktion, welche hohe Auslastungszustände bestraft.

Zusätzlich gelten Nebenbedingungen:

- Die gesamte über einen Link geführte Datenmenge darf dessen Kapazität nicht überschreiten.
- Für jeden Kommunikationsstrom muss die Flusserhaltung gelten, das heißt, die ein- und ausgehenden Datenmengen eines Knötens müssen – außer an Quelle und Ziel – gleich sein.
- Die Anzahl gleichzeitig aktiver Satellitenverbindungen ist durch technische Beschränkungen begrenzt.

Das resultierende Optimierungsproblem zielt darauf ab, die Verkehrsflüsse so zu bestimmen, dass die Summe aller Verzögerungen im Netzwerk minimal wird, während alle Kapazitäts-, Technologie- und Flusserhaltungsbedingungen eingehalten werden. Das Gesamtproblem wurde in der wissenschaftlichen Veröffentlichung [9] vorgestellt.

3.5.2 Analytische Charakterisierung der Verbindungskapazität

Das hybride Kommunikationsnetz umfasst unterschiedliche Verbindungstypen. Terrestrische Leitungen haben feste Distanzen, während sich die Längen von Satellitenverbindungen dynamisch mit der Satellitenposition ändern. Im entwickelten analytischen Modell wurden kabelgebundene Verbindungen mit konstanter Kapazität sowie drahtlose Verbindungen

Kommentiert [AV12]: A. Volkova, J. Schmidhuber, H. de Meer und J. Rak, „Design of weather-resilient satellite-terrestrial ICT networks for power grid communications,“ IEEE Transactions on Network and Service Management, Bd. 23, pp. 967-984, 2026.

Kommentiert [CB13]: @Anna zwischen ZWEI Netzknöten?

Kommentiert [AV14R13]: fixed

Energieforschungsprogramm – Ausschreibung 2023

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

berücksichtigt, darunter ISL, GSL, Verbindungen zwischen Stromnetzknoten und LTE-Basisstationen sowie LTE-Richtfunk-Links. Der Fokus liegt auf Ground-Satelliten- und Richtfunkverbindungen, da diese sowohl distanzabhängig als auch besonders wetteranfällig sind.

Zur Berechnung der nominellen Kapazitäten drahtloser Links werden etablierte Funkkanalmodelle herangezogen. Grundlage ist zunächst die Bestimmung der freien Raumdämpfung, die von der Entfernung zwischen Sender und Empfänger sowie von der verwendeten Frequenz abhängt. Mit zunehmender Distanz oder höherer Frequenz steigt die Dämpfung, wodurch die am Empfänger verfügbare Signalstärke sinkt.

Die effektive Sendeleistung wird durch die äquivalente isotrope Strahlungsleistung beschrieben, welche sich aus der Sendeleistung und dem Antennengewinn zusammensetzt. Auf der Empfangsseite wird die Leistungsfähigkeit durch das Verhältnis von Antennengewinn zur Systemrauschteperatur charakterisiert. Diese Größe berücksichtigt sowohl geräteinterne Rauschanteile als auch atmosphärische Einflüsse. Aus diesen Parametern wird das Verhältnis von Nutzsignal zu Rauschleistung bestimmt. Dieses Verhältnis beschreibt die Qualität des Funkkanals innerhalb eines gegebenen Frequenzbandes. Unter Verwendung des Shannon-Hartley-Theorems wird daraus eine theoretische Obergrenze der erreichbaren Datenrate berechnet. Da reale Systeme durch Codierungseffizienz, Protokoll-Overhead und weitere praktische Effekte eingeschränkt sind, wird diese theoretische Kapazität mit Effizienz- und Overhead-Faktoren gewichtet, um eine realistische, nutzbare Linkkapazität zu erhalten. Das Gesamtmodell wurde in der wissenschaftlichen Veröffentlichung [9] vorgestellt.

Wetterbedingte Dämpfung, insbesondere durch Niederschlag, wird mithilfe standardisierter ITU-R-Modelle berücksichtigt⁵. Regen führt zu zusätzlicher Signalabschwächung, wodurch das Signal-Rausch-Verhältnis sinkt und damit die erreichbare Kapazität reduziert wird. Diese Kapazitätsanpassungen erfolgen zustandsabhängig für alle relevanten drahtlosen Links. Für jede ermittelte stabile Netzkonfiguration werden die Linkkapazitäten auf Basis der jeweiligen Distanzen und Wetterbedingungen aktualisiert.

3.5.3 Ermittlung stabiler Netzwerkkonfigurationen

Die Bewegung der Satelliten und die daraus resultierenden Topologieänderungen im hybriden Netz wurden graphentheoretisch modelliert. Grundlage bildet das mit Hypatia generierte zeitabhängige Satellitenmodell. Um die Dynamik des satelliten-terrestrischen Gesamtsystems abzubilden, wurde ein Diskretisierungsansatz verwendet. Der kontinuierliche Systemverlauf wird in eine Folge zeitlich aufeinanderfolgender Momentaufnahmen zerlegt.

Das Diskretisierungsintervall hängt von den Eigenschaften der jeweiligen Konstellation ab, insbesondere von Satellitendichte und -höhe. Zu kleine Intervalle führen zu sehr hoher Granularität und großem Rechenaufwand, während zu große Intervalle relevante

⁵ International Telecommunication Union, "Recommendation ITU-R p.838-3: Specific attenuation model for rain for use in prediction methods," Mar. 2005.

Energieforschungsprogramm – Ausschreibung 2023

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Zustandsänderungen verschleiern können. Für die in dieser Arbeit betrachtete Starlink-Konstellation wird ein Intervall von 15 Sekunden verwendet, basierend auf bekannten Rekonfigurationszyklen [10].

Um die Anzahl notwendiger Routing-Neukonfigurationen zu reduzieren, wurde nicht jede Momentaufnahme separat betrachtet. Stattdessen wird nach stabilen Systemzuständen gesucht, in denen eine einmal gefundene Netzkonfiguration über mehrere Diskretisierungsschritte hinweg gültig bleibt. Der verwendete Algorithmus teilt den betrachteten Simulationszeitraum rekursiv in Teilintervalle. Für jedes Intervall wird geprüft, ob die Schnittmenge der enthaltenen Snapshot-Graphen eine gemeinsame, durchgehend gültige Netzstruktur ergibt. Eine Konfiguration gilt als stabil, wenn in allen betrachteten Zuständen jeder Stromnetz-knoten über einen Satellitenpfad mit der Leitstelle verbunden bleibt. Ist dies nicht erfüllt, wird das Intervall weiter unterteilt, bis stabile Teilintervalle identifiziert werden. Für die modellierte Starlink-Konstellation mit einem 15-Sekunden-Intervall ergaben sich stabile Konfigurationen mit einer Dauer von etwa 180 Sekunden.

Um sicherzustellen, dass eine gefundene Konfiguration über das gesamte *aggregierte* Intervall hinweg gültig bleibt, wurden konservative Annahmen getroffen: Für jede Verbindung wurden die ungünstigsten Kapazitätswerte angesetzt, die sich aus den größten beobachteten Distanzen innerhalb des Intervalls ergeben. Ist eine Lösung unter diesen Worst-Case-Bedingungen zulässig, wird sie als für alle enthaltenen Systemzustände gültig betrachtet.

3.5.4 Modellierung von Wetterstörungen

Starke Niederschläge können die Qualität drahtloser Kommunikationsverbindungen erheblich beeinträchtigen. Besonders bei schweren Unwettern wie Hurrikanen sind sowohl satellitengestützte als auch terrestrische Funkverbindungen betroffen. Zur realitätsnahen Abbildung dieser Effekte wurde ein regionales Wetterstörungsmodell entwickelt. Das betrachtete geografische Gebiet wird in Rasterzellen unterteilt. Wetterereignisse, insbesondere Starkregen, werden deterministisch als kreisförmige Sturmzellen mit definiertem Zentrum, Radius, Bewegungsrichtung, Geschwindigkeit und Intensitätsfaktor modelliert. Die Beeinträchtigung nimmt vom Zentrum der Zelle zum Rand hin linear ab. Zusätzlich werden stochastische Effekte berücksichtigt, um natürliche Variabilität abzubilden. Wenn mehrere Einflüsse auf eine Rasterzelle wirken, wird jeweils der stärkste Effekt angesetzt. Die Ergebnisse der Modellierung für verschiedene Sturmszenarien sind in Abbildung 3, Abbildung 4 und Abbildung 5 dargestellt.

Für jede Kommunikationsverbindung wird geprüft, ob sie sich innerhalb einer betroffenen Rasterzelle befindet oder diese durchquert. In diesem Fall wird ihr ein Degradationsfaktor zwischen null und eins zugewiesen, der sich aus der deterministischen Sturmintensität und der stochastischen Komponente ergibt. Diese Degradation wird zeitlich synchron zur Systemdiskretisierung aktualisiert, hier alle 15 Sekunden.

Kommentiert [AV15]: L. Izhikevich, M. Tran, K. Izhikevich, G. Akiwate und Z. Durumeric, „Democratizing LEO Satellite Network Measurement,” in *Proceedings of the ACM on Measurement and Analysis of Computing Systems*, 2024.

Energieforschungsprogramm – Ausschreibung 2023

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

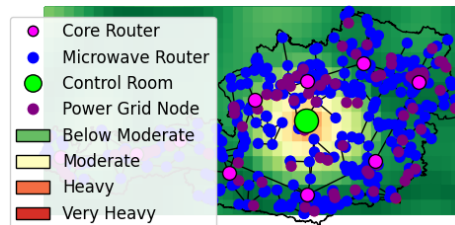


Abbildung 3 - Modell des leichten Unwetters über Österreich [11]

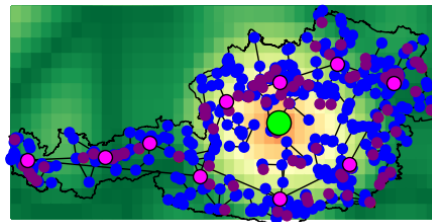


Abbildung 4 - Modell des mittelschweren Unwetters über Österreich [11]

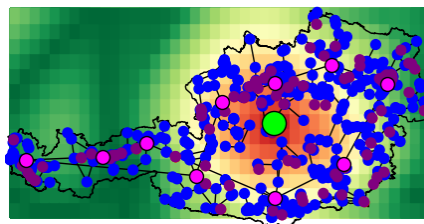


Abbildung 5 - Modell des schweren Sturms über Österreich [11]

Kommentiert [AV16]: A. Volkova, H. de Meer und J. Rak, „Toward Hybrid Satellite-Terrestrial Networks for Power Grid Control under Weather Disturbances,“ in Proceedings of European Wireless 2025 [publication in 2026], Sophia-Antipolis, France, 2026.

Die konkrete Berechnung der regenbedingten Dämpfung erfolgt auf Basis etablierter ITU-R-Modelle (ITU-R P.838-3). Für Satellitenverbindungen im Ku-Band wird die spezifische Regenabschwächung als Funktion der Frequenz und der lokalen Niederschlagsrate bestimmt. Dazu werden zunächst die geometrischen Parameter der Satellitenverbindung berechnet, insbesondere die effektive Länge des durch Regen beeinflussten Ausbreitungspfad, die vom Elevationswinkel und von der Regenhöhe abhängt. Aus der Regenrate wird mithilfe frequenzabhängiger Koeffizienten die spezifische Dämpfung pro Kilometer berechnet. Multipliziert mit der effektiven Pfadlänge ergibt sich die Gesamtdämpfung in Dezibel. Diese zusätzliche Dämpfung reduziert das Signal-Rausch-Verhältnis und damit die erreichbare Linkkapazität.

Für terrestrische LTE-Richtfunkverbindungen wird ein separates ITU-R-Modell P.530-18 für Richtfunkstrecken verwendet. Auch hier wird die regenbedingte spezifische Dämpfung aus der lokalen Regenrate bestimmt und unter Berücksichtigung einer effektiven Pfadlänge auf die gesamte Verbindung angewendet. Aufgrund der vollständigen Exposition gegenüber

Energieforschungsprogramm – Ausschreibung 2023

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Niederschlag sind Richtfunk-Backhaul-Links in vielen Fällen stärker betroffen als Satellitenverbindungen, bei denen nur ein Teil des Ausbreitungspfades durch die Regenzelle verläuft.

Die Dämpfung durch Nebel ist im Allgemeinen gering, gewinnt jedoch bei höheren Frequenzen (insbesondere im Ka-Band) an Bedeutung. Kritische Bedingungen treten auf, wenn der Flüssigwassergehalt der Luft hohe Werte erreicht, die Ausbreitungspfade lang sind oder Satellitenverbindungen mit niedrigen Elevationswinkeln betrieben werden. Unter solchen Umständen kann die zusätzliche Dämpfung die Linkqualität messbar reduzieren. Für Österreich wurde ein räumlich konsistentes Nebelszenario entwickelt, das auf verfügbaren klimatologischen Daten basiert. Der Fokus liegt auf typischen Nebelgebieten in Becken- und Tallagen, während hochalpine Regionen, aufgrund geringerer Relevanz für die betrachteten Stromnetzinfrastrukturen, nicht berücksichtigt werden. Die Modellierung der betroffenen Flächen erfolgt analog zur Regenmodellierung, jedoch mit angepasster Dynamik: Im Gegensatz zu Starkregen bewegt sich Nebel nicht schnell, sondern bildet sich allmählich und löst sich langsam wieder auf. Das Modell der Nebelverteilung und -intensität für Österreich ist in Abbildung 6 dargestellt. Die Intensität des Nebels wird durch den Flüssigwassergehalt beschrieben. Moderate Nebelereignisse liegen bei niedrigen Werten, während dichter Nebel deutlich höhere Konzentrationen aufweist. Dieser Parameter wird direkt als Degradationsfaktor in das Dämpfungsmodell integriert.

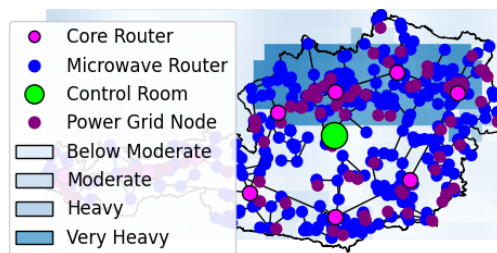


Abbildung 6 - Modell zur Nebelverteilung und -intensität für Österreich [11]

Zusätzlich wird Wolkendämpfung berücksichtigt. Diese wird insbesondere bei Richtfunksystemen oberhalb von etwa zehn Gigahertz relevant. Sofern Daten zum Flüssigwassergehalt verfügbar sind, kann die schräg verlaufende Dämpfung ebenfalls modelliert werden. In STARS wird eine statische Wolkendämpfung für Satellitenverbindungen sowohl in Regen- als auch in Nebelszenarien ergänzend berücksichtigt. Dadurch wird eine konsistente Abbildung mehrerer atmosphärischer Einflussfaktoren auf die Funkkapazität erreicht.

Die berechnete Dämpfung wird als zusätzlicher Verlustterm in die Linkbudget- und Kapazitätsberechnung integriert. Die reduzierte Kapazität fließt anschließend in das Optimierungsmodell ein, sodass sich wetterabhängig neue optimale Kommunikationspfade ergeben können. Dadurch wird eine dynamische, wetteradaptive Netzkonfiguration ermöglicht, die die Robustheit der Kommunikationsinfrastruktur unter Extremwetterbedingungen systematisch bewertet.

Energieforschungsprogramm – Ausschreibung 2023

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

3.5.5 Reduktion des aggregierten Graphen

Nach dem Diskretisieren der Systemzustände, der Bildung stabiler aggregierter Graphen und der Modellierung zustandsabhängiger Linkkapazitäten steht für jedes stabile Zeitfenster eine statische Netzkonfiguration zur Verfügung [9]. Das zugrunde liegende Optimierungsproblem gehört jedoch aufgrund binärer Entscheidungsvariablen und nichtlinearer Verzögerungsanteile zur Klasse gemischt-ganzzahliger nichtlinearer Probleme. Da stabile Konfigurationen in LEO-Systemen nur wenige Minuten gültig sind und gleichzeitig großskalige satelliten-terrestrische Netzgraphen betrachtet werden, wäre eine direkte Lösung in Echtzeit rechnerisch nicht praktikabel.

Zur Reduktion der Komplexität wird daher ein sogenannter *reduzierter* Graph eingeführt. Dieser stellt eine voroptimierte Teilmenge des aggregierten Graphen dar und enthält nur die für die Kommunikationsanforderungen relevantesten Verbindungen. Ziel ist es, Leistungsfähigkeit und Resilienz für Stromnetzkommunikation sicherzustellen. Für jede Kommunikationsbeziehung zwischen einem Netzknoten und der Leitstelle werden daher im Vorfeld mehrere knotendisjunkte Pfade identifiziert. Konkret werden drei disjunkte Pfade im Satellitennetz sowie drei disjunkte Pfade im terrestrischen Netz bestimmt. Die satellitenseitigen Pfade werden nach maximaler Kapazität ausgewählt, während im terrestrischen Netz die kürzesten disjunkten Pfade bevorzugt werden, um die Anzahl der Hops und damit die Verzögerung zu minimieren. Durch diese Pfadvorauswahl wird der Lösungsraum erheblich verkleinert, sodass das Optimierungsproblem innerhalb der kurzen Gültigkeitsintervalle stabiler Konfigurationen in praktikabler Zeit gelöst werden kann [9].

3.6 Methodik zur Charakterisierung von Latenzzeiten durch Messungen

Um die Qualität eines derzeit verfügbaren LEO-basierten Kommunikationssystems zu bewerten, wurden Messungen im Starlink-Netzwerk von SpaceX durchgeführt. Als Anwendungsfall diente die Wiederherstellung des Stromnetzes, bei der ein Schwarzstart-fähiges Kraftwerk und eine zentrale Leitstelle über ein LEO-basiertes Satellitennetzwerk kommunizieren. Zu diesem Zweck wurden zwei Starlink-Terminals auf den Dächern der Forschungsinstitute in Salzburg (A) und Passau (B) installiert. In beiden Fällen ist das Terminal mit einem Mess-PC verbunden, der seine Zeit mit der vom Terminal bereitgestellten präzisen, GPS-basierten, Zeitquelle synchronisiert. Die Messungen konzentrieren sich auf Metriken und Verfahren, wie sie von der „IP Performance Measurement“ (IPPM) Arbeitsgruppe⁶ der Internet Engineering Task Force (IETF) standardisiert wurden.

Im Hinblick auf den Schwarzstart-Anwendungsfall wurden die folgenden Einweg-Metriken („one-way“) ausgewählt: delay [12], delay variation [13], loss [14], reordering [15], sequence discontinuity [15] und duplication [16]. Die IPPM-Messungen wurden mit einer von Salzburg

⁶ IPPM Arbeitsgruppe: <https://datatracker.ietf.org/wg/ippm/about/>, Zugriff: 20.3.2026

Energieforschungsprogramm – Ausschreibung 2023

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Research selbst entwickelten Software⁷ [17], die seit mehr als 15 Jahren erfolgreich für Performanzbewertungen im akademischen und industriellen Umfeld im Einsatz ist, durchgeführt. Im Vergleich zu herkömmlichen Werkzeugen bietet sie präzisere Messungen durch hochgenaue Zeitstempel sowie die Möglichkeit, Einweg-Metriken zu messen. Dadurch können potenziell vorhandene Leistungs-Asymmetrien zwischen zwei Kommunikations-Endpunkten entdeckt werden.

Die erste Phase der Messkampagne wurden IPPM-Einwegmessungen zwischen A und B in beide Richtungen ohne konkurrierenden Verkehr durchgeführt. Gemäß [18] wurden periodische Datenströme mit zufälligen Startzeiten und Messungen endlicher Länge von etwa 30 Minuten verwendet. Der gesamte Aufbau und die Messkonfigurationen wurden über mehrere Monate hinweg entwickelt und getestet. Erst danach wurde der Datensatz für die anschließende Auswertung (siehe Abschnitt 4.2) und Modellierung (siehe Abschnitte 4.3 und 4.4) aufgezeichnet. Der IPPM-Messverkehr ist als leichtgewichtiger UDP-Datenstrom mit einer konstanten Rate von 10 Paketen/s und einer Nutzdatengröße von 100 B konfiguriert. Falls ein Messpaket nicht innerhalb von fünf Sekunden eintrifft, wird es als Verlust gewertet.

In der zweiten Phase der Messkampagne wurden die potenziell negativen Auswirkungen paralleler, TCP-basierter Uploads/Downloads auf die IPPM-Metriken untersucht. Die Uploads/Downloads erfolgten zwischen Standort A und einem zusätzlichen Messknoten, der in einem kommerziellen Rechenzentrum in Deutschland (Standort C) gehostet wurde. Es wurde verifiziert, dass der Engpass zwischen A und C innerhalb des Starlink-Netzwerks liegt. Die Konfiguration der IPPM-Messungen zwischen A und B entspricht derjenigen aus Phase 1. Es wurden zwei TCP-Varianten mit unterschiedlichen Staukontrollalgorithmen verwendet: TCP Cubic [19] und TCP BBR [20]. TCP Cubic ist in heutigen Betriebssystemen die Standardeinstellung. TCP Cubic interpretiert Paketverluste (und doppelte Bestätigungen) als Überlastsignal, woraufhin es sein Staufenster („congestion window“) verkleinert und folglich die Senderate reduziert. In Netzwerken, in denen Paketverluste auch aus anderen Gründen als Überlastung auftreten (z. B. während des Wechsels von einem Satelliten zum anderen), kann ein verlustbasierter Algorithmus wie Cubic möglicherweise nicht die volle Kapazität des Netzwerkpfads ausschöpfen. Daher wurden zusätzliche Messungen mit TCP BBR (Bottleneck Bandwidth und Round-Trip-Propagation-Time) durchgeführt. Es handelt sich um einen neuartigen modellbasierten Algorithmus, der die verfügbare Bandbreite und die minimale Round-Trip-Zeit des Pfades schätzt, damit er am optimalen Betriebspunkt arbeiten kann [21].

Der TCP-Verkehr (vier parallele Verbindungen) wurde jeweils mit dem Programm iperf3⁸ generiert.

⁷ MINER website: <https://miner.salzburgresearch.at/>, Zugriff: 20.3.2026

⁸ iPerf3 Messwerkzeug Version 3.16, siehe <https://iperf.fr/>, Zugriff: 20.3.2026

Energieforschungsprogramm – Ausschreibung 2023

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

In der dritten Phase wurden die Messungen aus Phase 2 unter realen Bedingungen im Feld wiederholt. Dazu wurde das Starlink-Terminal, das bisher „dauerhaft“ auf dem Dach von Standort A installiert war, ins Feld in die Nähe relevanter Erzeugungsanlagen gebracht. Dabei wurden auch einige herausfordernde Standorte in engen Alpentälern mit Ost-West- bzw. Nord-Süd-Ausrichtung ausgewählt, um die Auswirkungen einer eingeschränkten Sicht auf den Himmel zu untersuchen. Die Antenne wurde auf dem Dach eines Autos platziert und mithilfe der Starlink-App ausgerichtet. Sobald die Zeitsynchronisation ausreichend genau war, wurde mit den Messungen begonnen.

3.7 Co-Simulation Setup

Die vorhandenen Modelle für das Stromnetz und die LEO-Satellitenkommunikation wurden technisch so erweitert und aufeinander abgestimmt, dass sie in einer gemeinsamen Co-Simulation zuverlässig zusammenarbeiten können. Grundlage dafür war die Simulationsumgebung Hypatia, die speziell für die Modellierung von LEO-Satellitenkommunikation entwickelt wurde und auf dem Netzwerksimulator ns-3 basiert.

Um eine echte Kopplung zwischen den diskreten, ereignisbasierten Kommunikationsprozessen und den kontinuierlichen, zeitabhängigen dynamischen Abläufen des Stromnetzes zu ermöglichen, wurde Hypatia funktional erweitert. Das zuvor in MATLAB/Simulink erstellte Stromnetzmodell wurde nach dem FMI-Standard (Version 2.0) als Functional Mock-up Unit (FMU) exportiert. Diese FMU kann als eigenständige Simulationskomponente betrieben werden und bildet das kontinuierliche Verhalten des Stromnetzes ab. Ein speziell entwickeltes ns-3-Modul⁹ wurde in Hypatia integriert, um diese FMU zu importieren und mit den Kommunikationsmodellen zu verbinden. Dieses Modul wurde so gestaltet, dass mehrere Kommunikationsknoten gleichzeitig und konsistent auf dieselbe FMU zugreifen können, wodurch ein synchroner Austausch von Frequenz- und Spannungswerten, Steuerbefehlen und anderen Simulationsdaten möglich wird. Zusätzlich wurden Mechanismen implementiert (Callback-Funktionen), die es erlauben, Regler direkt einzubinden. Dies erlaubt das Verhalten des zentralen Black-Start-Algorithmus realitätsnah mit den zeitvariablen Verzögerungen der Satellitenkommunikation abzubilden. Dies führte zu einer Co-Simulationsumgebung, die sowohl die schnelle Dynamik des Stromnetzes als auch die stochastischen Kommunikationsprozesse mit hoher zeitlicher Genauigkeit abbildet.

⁹ FMU-attached Devices for Hypatia: <https://github.com/AIT-IES/hypatia-fmu-attached-device>

4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

4.1 Ergebnisse der analytischen Untersuchung von Latenzzeiten und Wetterauswirkungen

Zur Bewertung verschiedener hybrider satelliten-terrestrischer Netzvarianten und ihrer Anfälligkeit gegenüber ungünstigen Wetterbedingungen wurde ein Szenario mit 100 Hochspannungsumspannwerken in Österreich modelliert, die aus OSM extrahiert wurden. Das Verkehrsmodell entspricht einem Monitoring-Kommunikationsdienst (Wide-Area Monitoring, Protection and Control, WAMPAC) mit 60 Paketen pro Sekunde bei einer Nachrichtengröße von 800 B. Ein dediziertes LTE-Netz besteht aus 10 Clustern, die jeweils 40 Funkmasten, LTE-Richtfunkrouter und 10 Kernnetz-Knoten umfassen. Das Netz nutzt 450 MHz für den Zugang sowie 6 GHz und 24 GHz für den Richtfunk-Backhaul bei einer Bandbreite von 28 MHz. Die Hardwareparameter orientieren sich an gängigen Hardwarespezifikationen. Inter-Satelliten-Verbindungen werden mit 1 Gbit/s angesetzt, während kabelgebundene Verbindungen zwischen eNB und Backhaul sowie zwischen Backhaul und Kernnetz mit 100 Mbit/s ausgelegt sind. Kernnetz-Router verwenden Glasfaserverbindungen mit 1 Gbit/s. 15% der Hochspannungsnetz-Knoten wurden bewusst außerhalb der LTE-Abdeckung platziert. Das Szenario ist in Abbildung 3 dargestellt.

Das LEO-System basiert auf einer Starlink-Konfiguration mit 22×72 Satelliten, 53° Inklination, 25° Elevationswinkel und 550 km Orbithöhe und wurde mit Hypatia modelliert. Verwendet werden das Ku-Band (13 GHz, 100 MHz Bandbreite) sowie das Ka-Band (28,5 GHz, 100 MHz Bandbreite), wobei pro Satellit 48 Schnittstellen vorgesehen sind, entsprechend einem Nutzer beziehungsweise Beam pro Schnittstelle [7]. Die Gewitter- beziehungsweise Starkregenszenarien werden über einer Fläche von 83.879 km² in Österreich simuliert, die in Kacheln von jeweils 400 km² unterteilt ist. Das Nebelszenario ist in Zellen von 100 km² unterteilt. Die Nebelintensität erreicht anfangs ihr Maximum und nimmt im Vergleich zur Satellitenbewegung nur langsam ab.

Tabelle 1 fasst die Modellparametrisierung zusammen, die sich an früheren Forschungsarbeiten, den FCC-Regularien sowie an Hardwarespezifikationen orientiert. Für die Vergleichbarkeit wurden bei Ku- und Ka-Band Sendeleistung, Empfangsleistung und Antennengewinne konstant gehalten. Obwohl das Ka-Band Bandbreiten von bis zu 500 MHz unterstützt, wird in dieser Studie für die Nutzerverbindungen aus Vergleichsgründen eine Bandbreite von 100 MHz angesetzt. Die Parametrisierung des LTE-Modells orientiert sich an Hardwarespezifikationen sowie an durchschnittlichen Richtfunkkonfigurationen im niedrigen und hohen Frequenzbereich.

Kommentiert [CB17]: @Anna bitte checken, ob das ein Tippfehler ist. Erscheint mir unrealistisch klein. Die 1 Gbit/s im Kernnetz auch.

Kommentiert [AV18R17]: Das ist absichtlich so gehalten, damit es als baseline dient

Energieforschungsprogramm – Ausschreibung 2023

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Tabelle 1 - Systemparametrisierung für Experimente [11]

Parameter	LEO Ku-band	LEO Ka-band	LTE Microwave (Low)	LTE Microwave (High)
Frequency [GHz]	13	28.5	6	24
Bandwidth [MHz]	100	100	28	28
Tx Power [dB]	11	11	20	20
Tx Gain [dBi]	37	37	30	30
Rx Gain [dBi]	34	37.7	30	30
Noise Temp. [K]	535	535	300	300
Rain Coeff.	0.01	0.21	0.03	0.13
Rain Exponent	1.2	0.93	1.15	0.99
Elevation	25	25	-	-
Rain Height [km]	3	3	-	-

Kommentiert [CB19]: Tabelle bitte entweder Deutsch oder Englisch

4.1.1 Untersuchung zur Beeinträchtigung der Verbindungskapazität

Abbildung 7 zeigt den Einfluss ungünstiger Wetterbedingungen auf die Kommunikation anhand der durchschnittliche Verbindungskapazität (zur besseren Vergleichbarkeit wurden die Skalen entsprechend angepasst). Die Szenarien sind wie folgt benannt: *[LEO-Frequenz] – [LTE-Richtfunkfrequenz] – [Wetterauswirkung (Keine (0)/Nebel/Regen/Kombiniert (C))] – [Wetterintensität (0/Leicht/Mittel/Stark (H))]*. Das Ausmaß der Kapazitätsdegradation wird dabei im Wesentlichen durch die Betriebsfrequenz, die atmosphärische Dämpfung sowie die Freiraumdämpfung bestimmt. Starker Nebel reduziert die Kapazität der 6-GHz-Verbindungen um 1,9% und jene der 24-GHz-Verbindungen um 9,1 %. Niederschlag zeigt einen deutlich stärkeren Effekt und führt zu einer Reduktion um 10,4 % bei 6 GHz beziehungsweise um 19,2% bei 24 GHz. Bei gleichzeitigem Auftreten von Nebel und Regen ist die Beeinträchtigung am stärksten ausgeprägt: Die durchschnittliche Kapazität sinkt bei 6 GHz auf 94 Mbit/s, was einer Abnahme von 11,3% entspricht, und bei 24 GHz auf 77 Mbit/s, entsprechend einer Reduktion von 22,2%.

Energieforschungsprogramm – Ausschreibung 2023

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

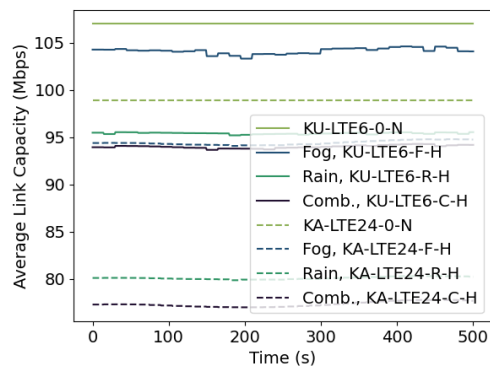


Abbildung 7 - Durchschnittliche Kapazität der Systemverbindungen in verschiedenen Wetterszenarien (Terrestrische Verbindungen) [11]

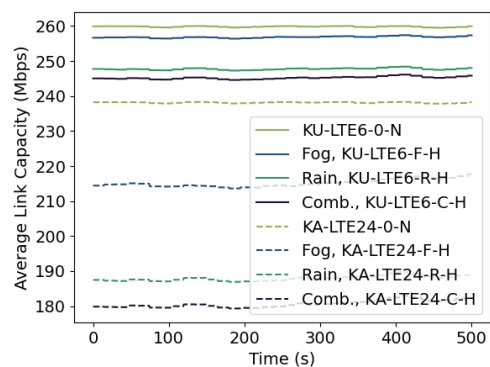


Abbildung 8 - Durchschnittliche Kapazität der Systemverbindungen in verschiedenen Wetterszenarien (LEO-Verbindungen) [11]

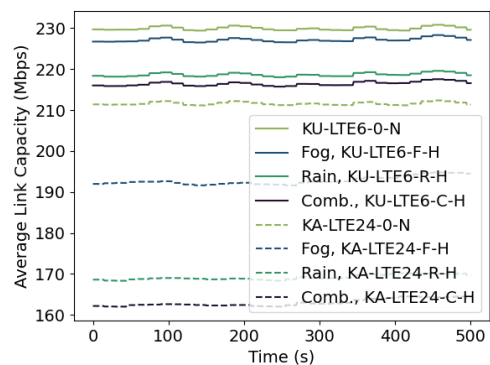


Abbildung 9 - Durchschnittliche Kapazität der Systemverbindungen in verschiedenen Wetterszenarien (Hybrides Netz) [11]

Energieforschungsprogramm – Ausschreibung 2023

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Für Satellitenverbindungen im Ku-Band bei 13 GHz zeigt die Abbildung 8, dass die durchschnittliche Kapazität auch unter widrigen Wetterbedingungen auf einem hohen Niveau verbleibt. Diese Ergebnisse unterstreichen die hohe Wetterrobustheit des Ku-Bands sowie die ausgeprägte Vulnerabilität des Ka-Bands, insbesondere gegenüber Niederschlag. Im Vergleich zu terrestrischen LTE-Systemen übertreffen Ku-Band-Satellitenverbindungen sowohl das 6-GHz- als auch das 24-GHz-System hinsichtlich Kapazität und Stabilität.

Hybride Systeme (Abbildung 9) weisen gegenüber einer rein terrestrischen LTE-Konfiguration eine deutlich erhöhte Wetterresilienz auf. Insgesamt zeigt sich, dass insbesondere Niederschlag, vor allem in Kombination mit Nebel, die stärkste Kapazitätsminderung verursacht. Dieser Effekt tritt besonders ausgeprägt in höheren Frequenzbereichen auf, da Dämpfungsprozesse bei Frequenzen wie 24 GHz und 28,5 GHz deutlich zunehmen.

4.1.2 Auswirkungen der degradierten Linkkapazität auf die End-to-End-Latenz

Abbildung 10, Abbildung 11 und Abbildung 12 zeigen die Leistungsfähigkeit der unterschiedlichen Konfigurationen unter variierenden Wetterbedingungen. Unter Clear-Sky-Bedingungen beträgt die durchschnittliche Verzögerung des Systems KU-LTE6 3,07 ms. Starker Nebel führt lediglich zu einem geringfügigen Anstieg auf 3,09 ms (wobei ein Ausschlag auf 3,64 ms auftritt), wenn Satellitenverbindungen ein Gebiet mit dichter Nebelausprägung durchqueren. Niederschlag wirkt sich gleichmäßiger aus und erhöht die durchschnittliche Verzögerung auf 3,14 ms, während kombinierte Wettereffekte zu einem ähnlichen Verzögerungsniveau führen. Dies bestätigt, dass Niederschlag den dominierenden degradierenden Einflussfaktor darstellt.

Für das hybride System KA-LTE24 zeigt sich (Abbildung 11), dass niedrigere Frequenzen deutliche Vorteile bieten. Unter kombinierten Wettereffekten weist KA-LTE24 eine durchschnittliche Verzögerung von 3,43 ms auf, während KU-LTE6 3,13 ms erreicht, was einer Reduktion der Verzögerung um 8,7% entspricht. Unter starkem Niederschlag fällt dieser Vorteil ebenfalls deutlich aus: KU-LTE6 erreicht 3,14 ms gegenüber 3,38 ms bei KA-LTE24, entsprechend einer Verbesserung um 7,1%. Selbst unter Nebelbedingungen reduziert KU-LTE6 die Latenz noch um 3,4%. Diese Vorteile sind auf die geringere atmosphärische Dämpfung bei niedrigeren Frequenzen zurückzuführen, die zu einer stabileren Verbindungsqualität führt.

Energieforschungsprogramm – Ausschreibung 2023

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

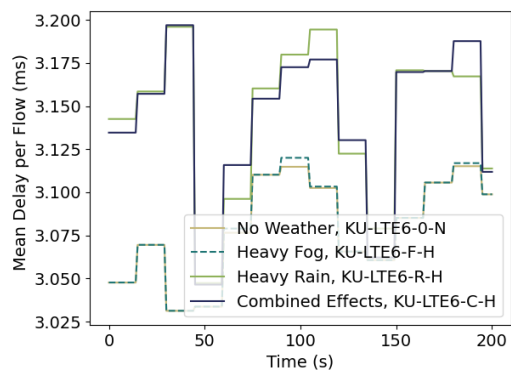


Abbildung 10 - Durchschnittliche Latenz pro Datenfluss (KU-LTE6 Hybrides Netz) [11]

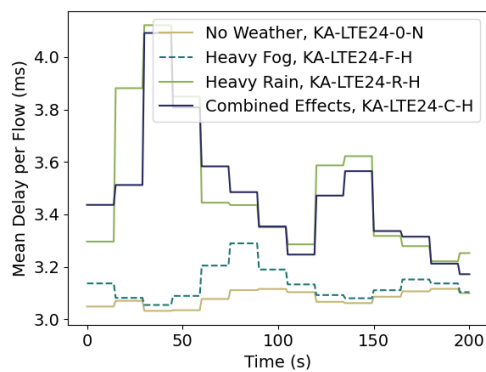


Abbildung 11 - Durchschnittliche Latenz pro Datenfluss (KA-LTE24 Hybrides Netz) [11]

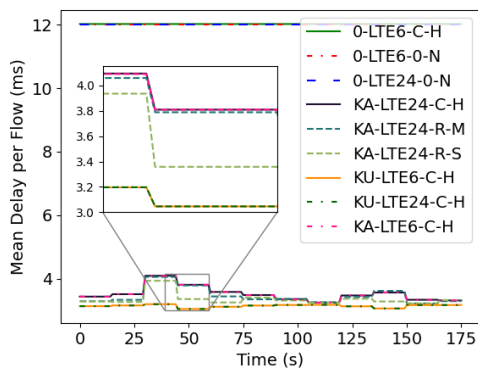


Abbildung 12 - Durchschnittliche Latenz pro Datenfluss (Vergleich mehrerer Architekturen und Wettereinfüsse) [11]

Energieforschungsprogramm – Ausschreibung 2023

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Der Vergleich der Verzögerungen zeigt insgesamt, dass hybride Konfigurationen, die Satellitenverbindungen im Ku-Band mit terrestrischem LTE im niedrigeren Frequenzbereich kombinieren, die stabilste Leistung aufweisen; die Verzögerungen bleiben dabei durchgehend unter 3,2 ms. Demgegenüber zeigen Systeme mit Satellitenverbindungen im Ka-Band und terrestrischem LTE in höheren Frequenzbereichen höhere Verzögerungswerte, wobei insbesondere unter kombinierten Wetterbedingungen Spitzen von über 4,0 ms auftreten. Diese Verzögerungswerte entsprechen weitgehend jenen des rein satellitengestützten Systems, da der Datenverkehr aufgrund der höheren Kapazität und der geringeren Anzahl an Hops primär über die Satellitenverbindungen geführt wird, sofern diese weder ausfallen noch ihre Kapazitätsgrenze erreichen.

4.2 Starlink Messungen

Die folgende Analyse basiert auf Daten, die in der ersten Phase der Messkampagne im Mai 2025 unter Verwendung des in Abschnitt 3.6 beschriebenen Aufbaus erhoben wurden. Aufgrund von Pausen zwischen den 30-minütigen Messläufen und einer gewissen Datenfilterung (z. B. zur Entfernung von Phasen mit unvermeidbaren Starlink-Firmware-Updates und Messdurchläufen mit Warnungen/Fehlern) umfasst der resultierende Datensatz etwa 28,6 Tage.

Abbildung 13 zeigt ein Violinen-Diagramm der in beide Richtungen gemessenen Einweg-Verzögerung (one-way-delay, OWD) zwischen den Starlink-Terminals in Salzburg (A) und Passau (B). Die Balken stellen das Minimum / Median / 99. Perzentil des OWD dar. Das beobachtete Minimum des OWD liegt in beiden Richtungen bei etwa 12 ms. Im unteren Teil der Abbildung sind die Kernel-Dichte-Schätzungen der beiden Richtungen weitgehend kongruent. Die Mediane unterscheiden sich um 0,7 ms. Ausgehend von knapp unterhalb des Medianwerts weist die Richtung B nach A eine leicht abweichende OWD-Verteilung auf. Die 99. Perzentile betragen 50,3 ms (A nach B) bzw. 51,0 ms (B nach A). Insgesamt besteht eine geringe Asymmetrie in der Latenz zwischen den beiden Richtungen. Diese wird jedoch nicht als signifikant angesehen, da sie innerhalb der Messunsicherheit liegt.

Abbildung 14 zeigt die kumulativen Verteilungsfunktionen (CDFs) des in die jeweilige Richtung gemessenen Einweg-Paketverlusts. Die kumulativen Wahrscheinlichkeiten für Verluste konzentrieren sich nahe 100% und beide Verbindungen bieten somit eine sehr hohe Zuverlässigkeit. Im Datensatz vom Mai sind 99,3 % der 1-Sekunden-Intervalle verlustfrei. Die Gesamtverlustrate beträgt 0,09 % (A nach B) bzw. 0,10 % (B nach A).

Energieforschungsprogramm – Ausschreibung 2023

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

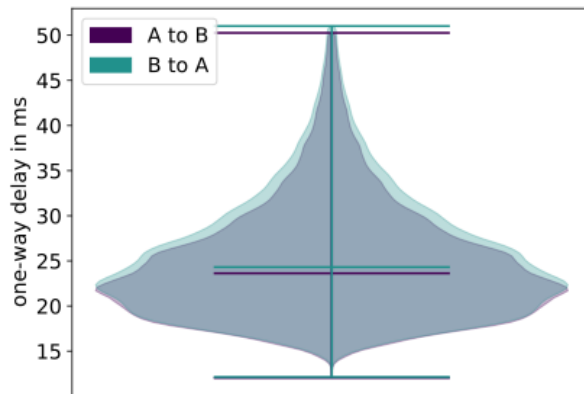


Abbildung 13 Violinen-Diagramm der Einweg-Verzögerung zwischen Salzburg (A) und Passau (B)

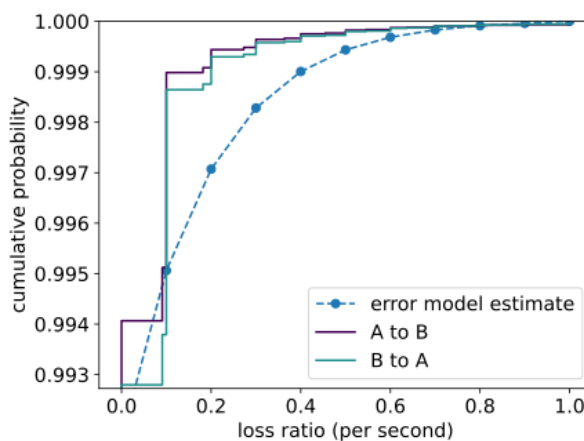


Abbildung 14 Kumulative Verteilungsfunktion des Einweg-Verlustes zwischen Salzburg (A) und Passau (B)

Die IPPM-Metrik „sequence discontinuity“ misst die Größe einer Lücke im Raum der empfangenen Sequenznummern (wobei ein Paket einer Sequenznummer entspricht). Eine Lücke kann entweder durch Paketverlust oder durch sich „überholende“ Pakete entstehen („re-ordering“: die Pakete kommen in einer anderen Reihenfolge beim Empfänger an, als sie beim Sender verschickt wurden). Es konnten „re-ordering“ Ereignisse beobachtet werden; diese traten jedoch mit einer Häufigkeit von etwa $1,3 \times 10^{-6}$ nur äußerst selten auf (insgesamt 32 neu geordnete Pakete im Mai Datensatz). Im Falle eines Verlusts bezeichnet die Metrik für „sequence discontinuity“ die Anzahl der aufeinanderfolgenden verlorenen Pakete und liefert somit

Energieforschungsprogramm – Ausschreibung 2023

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

weitere Einblicke in die Verlustereignisse. Abbildung 15 zeigt ein Histogramm der verlustbasierten „sequence discontinuity“ für beide Richtungen. Die überwiegende Mehrheit der Beobachtungen konzentriert sich auf sehr niedrige Werte. In 67 % der Verlustereignisse ging nur ein einziges Paket verloren. Die Wahrscheinlichkeit eines Verlustereignisses mit mehr als 10 aufeinanderfolgenden Paketverlusten liegt unter 10 %. Dennoch gibt es einige Verlustereignisse, die mehr als 100 aufeinanderfolgende Paketverluste umfassen. Beide Richtungen weisen ein sehr ähnliches Verhalten auf.

Das Messwerkzeug war auch für die Messung von Paketduplikaten konfiguriert; im Mai gab es jedoch kein einziges solches Ereignis.

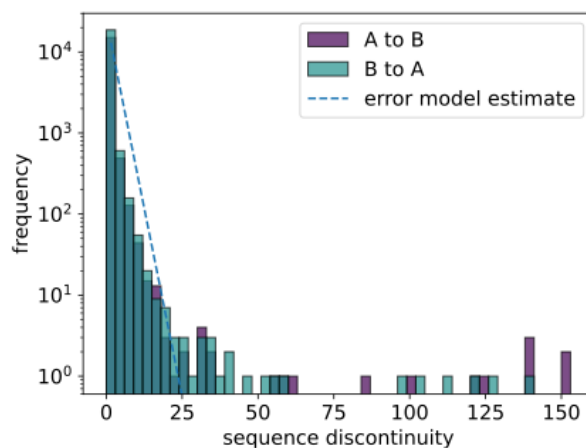


Abbildung 15 Histogramm der IPPM-Metrik „sequence discontinuity“ zwischen Salzburg (A) und Passau (B)

In Phase 2 der Messkampagne wurde untersucht, inwiefern parallele TCP-Datenströme negative Auswirkungen auf die IPPM-Metriken haben. Der durch die TCP-Uploads und -Downloads im Dezember 2025 erzielte Durchsatz ist in Tabelle 2 dargestellt. Die Minimum-, Mittelwert- und Maximum-Statistiken wurden über 1-Sekunden-Intervalle berechnet.

TCP BBR erreicht deutlich höhere Durchsätze als TCP Cubic. Mit Durchsatz ist hier der englische „goodput“ gemeint, der den effektiv auf Anwendungsebene erzielten Durchsatz bezeichnet und sich vom „throughput“ unterscheidet, der den Durchsatz auf Transportebene, also inklusive aller Wiederholungen (retransmission) und Duplikate, meint. Sowohl bei TCP BBR als auch Cubic ist selbst der niedrigste in einem 1-Sekunden-Intervall beobachtete Durchsatz mehr als ausreichend für die Anforderungen des Anwendungsfalls des Netzwiederaufbaus.

Energieforschungsprogramm – Ausschreibung 2023

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Tabelle 2 Erzielter TCP Durchsatz in Mbit/s

Direction	Protocol	Min	Mean	Max
Upload	TCP Cubic	16	35	61
	TCP BBR	34	94	147
Download	TCP Cubic	17	109	213
	TCP BBR	162	367	480

Interessanterweise ist bei beiden TCP-Varianten kaum eine Verschlechterung des IPPM-OWD zu beobachten. Von allen Messungen beträgt der höchste in der Statistik festgestellte Anstieg des OWD +1,3 ms im 99. Perzentil des OWD bei einem parallelen Download mit TCP Cubic. Die Verschlechterung des IPPM-Einwegverlusts ist hingegen signifikant. Die durchschnittliche Verlustrate, die ohne Hintergrundverkehr 0,1 % nicht überschreitet (siehe oben), steigt bei parallelen Up-/Downloads mit TCP Cubic auf 0,15 % bis 0,2 %. Bei TCP-BBR steigt die durchschnittliche Verlustrate bei einem parallelen Upload auf 0,29 %. Bei einem parallelen TCP BBR Download weist der IPPM-Messverkehr in derselben Richtung eine Verlustrate von 2,9 % auf. Abbildung 16 zeigt die resultierende CDF für diesen Fall. Während diese empirischen Ergebnisse als Obergrenze für den Einwegverlust dienen, wird angenommen, dass in der Realität bei einem Blackout die Kommunikationsverbindung zwischen einer erneuerbaren Erzeugungsanlage und einer zentralen Steuerung ausschließlich für die Netzwiederherstellung genutzt wird und dass kein konkurrierender Parallelverkehr vorliegt, der die verfügbare Kapazität vollständig auslastet.

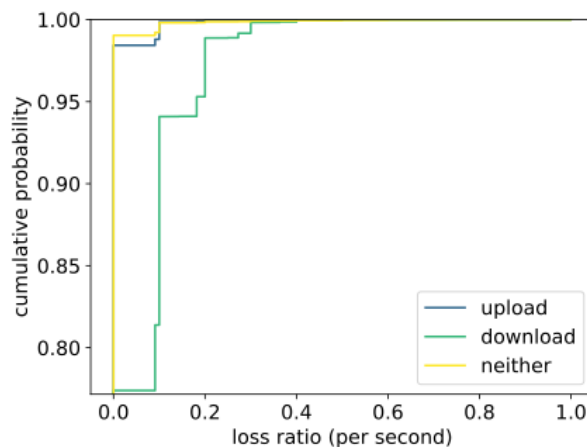


Abbildung 16 CDF des Einwegverlusts bei parallelen TCP BBR Download Verbindungen

Bei den Feldmessungen der dritten Phase führte die eingeschränkte Sicht auf den Himmel zu geringen Leistungseinbußen (im Vergleich zu Phase zwei), die jedoch in einem akzeptablen Bereich liegen (siehe Abschnitt 4.5): Während der OWD zunahm (Median: +10 ms; 99.

Energieforschungsprogramm – Ausschreibung 2023

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Perzentil: +20 ms), blieb die Einweg-Verlustrate auf dem gleichen Niveau mit sehr ähnlichen CDFs. Auch der minimale, mittlere und maximale Durchsatz, der von den TCP-basierten Up-/Downloads erreicht wurde, blieb unverändert. Die Variabilität des Durchsatzes war über 1-Sekunden-Intervalle betrachtet jedoch höher als in Phase 2. Insgesamt lautet das Ergebnis dieser ersten Bewertung, dass selbst anspruchsvolle Installationsbedingungen in relevanten alpinen Regionen den LEO-basierten Kommunikationsansatz nicht unmöglich machen.

4.2.1 Tagesabhängigkeiten

Abbildung 17 veranschaulicht die Abhängigkeit der OWD zwischen den Messstandorten Passau und Salzburg und zeigt dabei einen ausgeprägten Tageszeiteffekt. Die medianen Latenzen sind in den Nacht- und frühen Morgenstunden, etwa zwischen 00:00 und 05:00 UTC, am geringsten und liegen in beiden Richtungen typischerweise bei 23 bis 25 ms. Im Tagesverlauf steigt die Latenz kontinuierlich an und erreicht am späten Nachmittag bis frühen Abend, etwa zwischen 16:00 und 19:00 UTC, maximale Medianwerte von ungefähr 26 bis 27 ms in Richtung Salzburg beziehungsweise 25 bis 26 ms in Richtung Passau. Neben dieser Verschiebung der zentralen Lage nimmt auch die Variabilität der Latenz während der Tagesstunden deutlich zu. Die oberen 5% der Ausreißer überschreiten häufig 32 ms und nähern sich vereinzelt 35 ms an, insbesondere in Richtung Passau. Über den gesamten Tagesverlauf hinweg zeigt sich zudem eine persistente Richtungsasymmetrie: Die Latenz in Richtung Salzburg liegt im Mittel um etwa 1 bis 2 ms über jener in der Gegenrichtung.

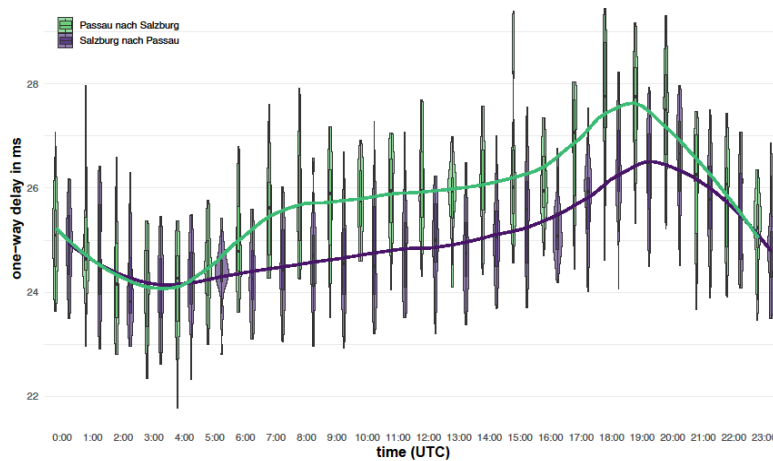


Abbildung 17 - Tagesabhängigkeit

4.3 Charakterisierung der Latenz

Die erfassten Daten der Latenzmessungen wurden genutzt, um ein statistisches Verzögerungsmodell für die LEO-Satellitenkommunikation zu entwickeln. Die gemessenen Latenzen wurden dazu analysiert und mit parametrischen Verteilungen modelliert, insbesondere durch Faltungen von Erlang-Verteilungen. Damit konnten unterschiedliche Routing-Szenarien wie reine Boden-Satellit-Verbindungen oder Routen mit zusätzlichen Inter-Satellite-Links realistisch abgebildet werden, siehe Abbildung 18. Für jedes Szenario wurden daraus passende Wahrscheinlichkeitsdichten abgeleitet, die sowohl typische als auch seltene Verzögerungen widerspiegeln und sich anschließend direkt in der Co-Simulation verwenden lassen, sodass realistische Netzwerkbedingungen im Simulator nachgebildet werden können.

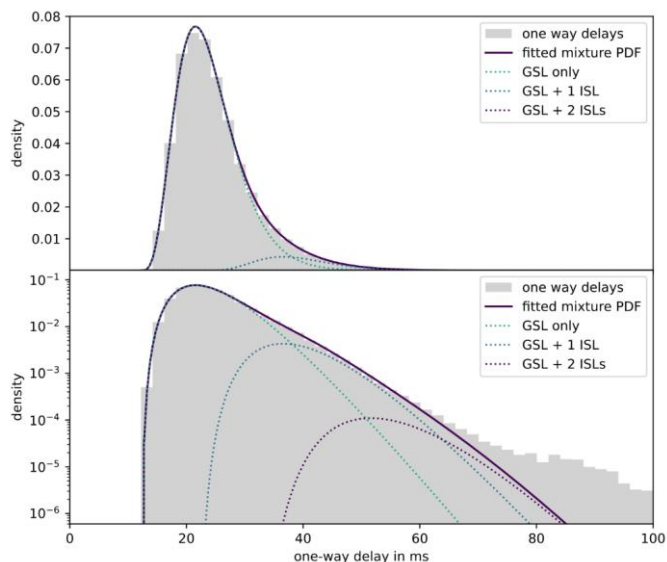


Abbildung 18: Histogramm der Latenzen und der angepassten Wahrscheinlichkeitsverteilungen

Abbildung 19 zeigt anschließend die Ergebnisse dieser Modellierung und bestätigt, dass das Verzögerungsverhalten der Starlink-Verbindung durch die entwickelten Verteilungen sehr gut repräsentiert werden kann. Die Modellparameter erfassen sowohl die Grundlatenz der Boden-Satelliten-Strecken als auch zusätzliche Verzögerungen durch Verarbeitungsvorgänge im Netzwerk. Die simulierten Verzögerungsverteilungen stimmen eng mit den gemessenen Daten überein, sodass das resultierende Modell die zeitlichen Schwankungen, die Struktur der Latenzspitzen und die statistische Streuung realistisch abbildet und somit eine belastbare Grundlage für die Untersuchung von Steuerungs- und Stabilitätsfragen im Black-Start-Szenario bildet.

Energieforschungsprogramm – Ausschreibung 2023

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

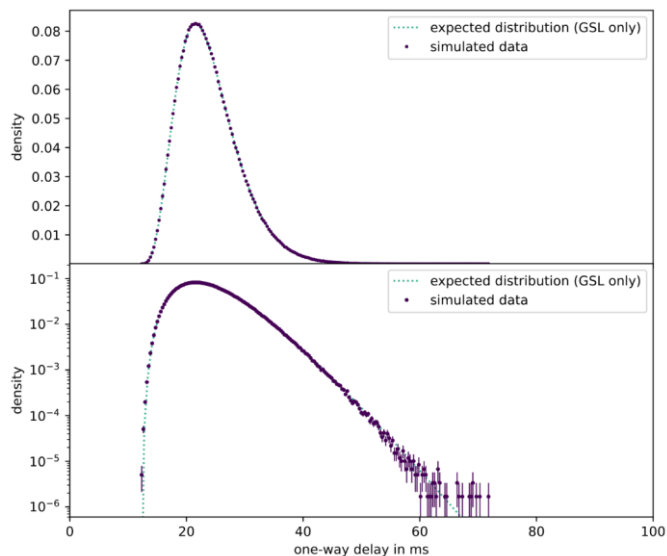


Abbildung 19: Verteilung simulierter Latenzen

4.4 Charakterisierung des Fehlermodells

Aus den Messdaten wurde ein realitätsnahes Fehler- und Paketverlustmodell für die LEO-Satellitenkommunikation abgeleitet, welches das beobachtete Verhalten gut nachbildet. Es wurde ein einfaches sogenanntes „Burst-Error-Modell“ auf Basis einer zweistufigen Markow-Kette entwickelt, das zwischen einem fehlerfreien Zustand und einem Fehlerzustand wechselt. Die Übergangswahrscheinlichkeiten wurden direkt aus den gemessenen Paketverlusten bestimmt und erlauben die Abbildung typischer Verlustmuster mit kurzen fehlerhaften Phasen und längeren stabilen Zeiträumen.

Abbildung 14 und Abbildung 15 zeigen, dass dieses Modell die in den Messkampagnen beobachteten Verlustfolgen zuverlässig reproduziert und sowohl die Häufigkeit als auch die Dauer von Fehlerereignissen realitätsnah widerspiegelt. Dadurch lässt sich das zeitlich konzentrierte Auftreten von Paketverlusten, wie es bei LEO-Systemen durch Routing-Umschaltungen oder kurzzeitige Signalstörungen auftreten kann, im Simulator präzise nachbilden, was für die Bewertung der Robustheit von Black-Start-Regelungsverfahren entscheidend ist.

Kommentiert [CB20]: ...derzeit noch ziemlich unscharf :)

4.5 Schwarzstart-Simulation

Das Systemverhalten mit geschlossenem Regelkreis und idealen Kommunikationsverbindungen (d. h. latenzfrei und mit unendlicher Bandbreite) dient als Basisszenario. Dies stellt

Energieforschungsprogramm – Ausschreibung 2023

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

(bewusst) eine vereinfachte Implementierung dar, die IKT-bedingte Auswirkungen und praktische Einschränkungen aufgrund von Verzögerungen und begrenzter Bandbreite außer Acht lässt.

Für den Black-Start-Algorithmus, der in diesem Basisszenario mit einer Abtast- und Ansteuerfrequenz von 1 kHz betrieben wird, wurden zwei Parametersätze ausgewählt:

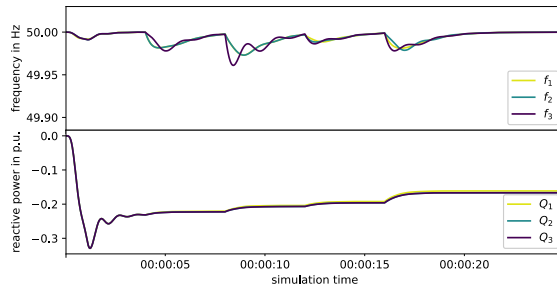
- *Parametersatz A* zeichnet sich durch relativ hohe Parameterwerte aus, was zu einem aggressiveren Regelverhalten und einer schnelleren Konvergenz zum stationären Zustand führt. Dadurch werden Frequenzabweichungen reduziert und die Blindleistungsverteilung beschleunigt.
- Im Gegensatz dazu verwendet *Parametersatz B* kleine Parameterwerte, was eine langsamere Reaktion zur Folge hat. Generell ist zu erwarten, dass dieser Parametersatz robuster gegenüber Verzögerungen ist.

Passive Lasten werden im Abstand von 5 Sekunden zugeschaltet. Dies übertrifft die üblichen Wiederherstellungsgeschwindigkeiten, entspricht aber den typischen Fähigkeiten der IBR-basierten Netzwiederherstellung. Abbildung 20 zeigt die resultierenden Frequenz- und Blindleistungsprofile an den drei Umspannwerksbussen. Parametersatz A implementiert ein aggressives Regelungsschema, bei dem der Frequenzregler die Nennfrequenz schnell wiederherstellt, bevor die nächste Last angeschlossen wird. Parametersatz B reagiert hingegen konservativer mit einer langsameren Ansprechzeit. Die Blindleistungsregler beider Parametersätze verhalten sich im Wesentlichen sehr ähnlich und gewährleisten eine faire Verteilung der Blindleistungsnachfrage auf die Generatoren. Trotz ihrer unterschiedlichen Reaktionen bieten beide Parametersätze praktikable Frequenzregler für das Basisszenario. Sie machen den Wiederherstellungsprozess robust gegenüber unerwarteten Kaltlastanschlüssen und ermöglichen schnelle Wiederherstellungsschemata. Ebenso bieten beide Parametersätze praktikable Blindleistungsregler für das Basisszenario. Sie verhindern, dass eine Einheit ihre lokale Spannung nicht mehr regeln kann, weil sie einen unverhältnismäßig großen Anteil der benötigten Blindleistung bereitstellt.

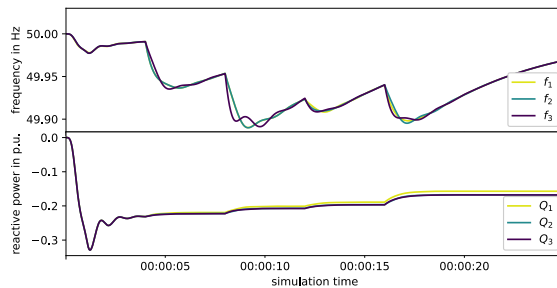
Um die Auswirkungen der LEO-Satellitenkommunikation zu charakterisieren, wurde im nächsten Schritt das Gesamtsystemmodell einschließlich einer realistischen Darstellung der IKT-Schicht simuliert. Im Gegensatz zum Basisszenario beinhaltet dieses Modell die Parametrisierungen des Verzögerungs- und Fehlermodells. Zudem wird ein realistisches Kommunikationsintervall von 20 Millisekunden (50 Hz) sowohl für Mess- als auch für Steuersignale verwendet.

Energieforschungsprogramm – Ausschreibung 2023

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG



a) Parametersatz A (aggressiv)



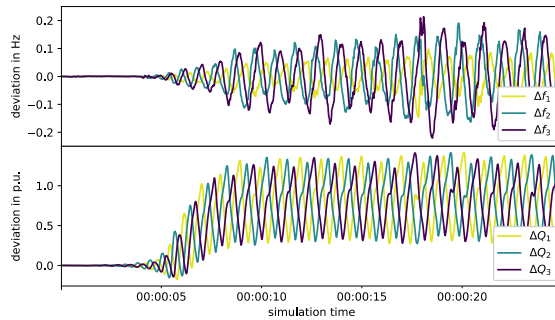
b) Parametersatz B (konservativ)

Abbildung 20: Zeitliche Entwicklung der Frequenz und der Blindleistung im Basisszenario.

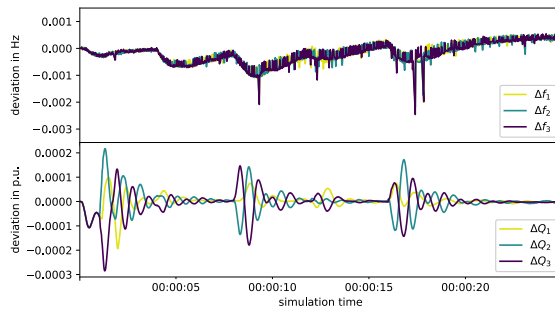
Abbildung 21a zeigt beispielhaft die Auswirkungen des Parametersatzes A. Die relativ hohe Proportionalverstärkung führt bei realistischen Verzögerungen und begrenzter Bandbreite zu Überschwingen und Oszillationen, was große Abweichungen von den Referenzwerten für Frequenz und Blindleistung zur Folge hat. Im Gegensatz dazu sind die Auswirkungen des Parametersatzes B vernachlässigbar. Abbildung 21b zeigt beispielhaft die Abweichungen von Frequenz und Blindleistung für eine spezifische LEO-Satellitenkonfiguration. Zu beachten ist die unterschiedliche Skalierung der Ordinatenachsen (die in Abbildung 21b dargestellten Abweichungen würden mit der Skalierung von Abbildung 21a ansonsten als flache Linien erscheinen).

Energieforschungsprogramm – Ausschreibung 2023

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG



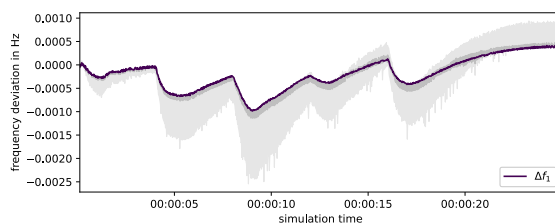
a) Parametersatz A (aggressiv)



b) Parametersatz B (konservativ)

Abbildung 21: Beispiel für den Effekt von Latenzen und Verlusten in der Kommunikation

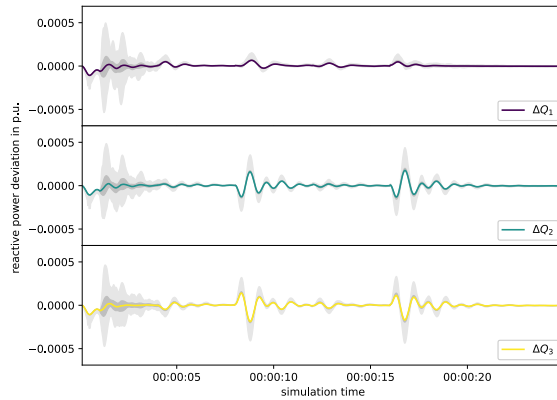
Die Robustheit des Parametersatzes B wird in Abbildung 22 verdeutlicht. Sie zeigt die mittlere Abweichung (durchgezogene Linie), die 1-Sigma-Abweichung (dunkelgrauer Bereich) und die maximale Abweichung (hellgrauer Bereich) der Steuersignale. Diese Abweichungen wurden anhand von Simulationen mit 50 verschiedenen Satellitenkonstellationen und jeweils 5 verschiedenen Anfangswerten für Zufallsgeneratoren für die Verteilung der Latenzen berechnet (insgesamt 250 Simulationen).



a) Abweichungen bei Frequenz

Energieforschungsprogramm – Ausschreibung 2023

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG



b) Abweichungen bei Blindleistung

Abbildung 22: Gemittelte Auswirkungen von Kommunikationslatenzzeiten auf den konservativen Regler

Abbildung 23 zeigt zudem den Einfluss zusätzlicher fester Kommunikationsverzögerungen auf den konservativen Regler, wobei beispielsweise Auswirkungen von Netzwerküberlastung oder atmosphärischen Störungen (extremen Wetterereignissen) berücksichtigt werden. Wie erwartet, nehmen sowohl die Frequenz- als auch die Blindleistungsabweichungen bei Vorliegen einer Verzögerung zu. Dieser Anstieg ist jedoch keine monotone Funktion der zusätzlichen Latenzzeiten, da die integraldominante Parametrisierung des Reglers die Verschlechterung bis zu einem gewissen Grad kompensieren kann. In beiden Fällen bleiben die Abweichungen vom Basisszenario auch bei großen zusätzlichen Verzögerungen (bis zu 240 Millisekunden) akzeptabel.

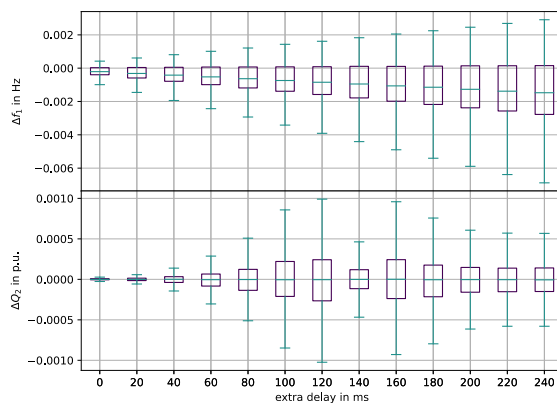


Abbildung 23: Einfluss von zusätzlichen Kommunikationslatenzzeiten auf den konservativen Regler

5 Ausblick und Empfehlungen

5.1 Empfehlungen aus der analytischen Untersuchung

Zusammenfassend zeigt der Vergleich rein terrestrischer, rein satellitengestützter und hybrider Konfigurationen über unterschiedliche Frequenzbereiche sowie unter verschiedenen Wetterbedingungen wie Regen und Nebel deutlich, dass die Leistungsfähigkeit maßgeblich von der Systemarchitektur und der Wetteranfälligkeit der eingesetzten Frequenzbänder abhängen. Insbesondere höhere Frequenzen erweisen sich unter adversen Umgebungsbedingungen als deutlich vulnerabler. So verzeichnet das Ka-Band unter kombinierten Wettereffekten Kapazitätseinbußen von bis zu 24,4%, während die Degradation im Ku-Band mit lediglich 4,7% wesentlich geringer ausfällt.

Als besonders vorteilhaft erweisen sich hybride Konfigurationen, die wetterrobuste terrestrische und satellitengestützte Frequenzbereiche kombinieren. Das hybride KU-LTE6-System reduziert die Verzögerung unter schweren Wetterbedingungen um 74% gegenüber rein terrestrischen LTE-Netzen und um mehr als 20% gegenüber einer KA-LTE24-Konfiguration. Daraus wird ersichtlich, dass hybride Systeme nicht nur die Konnektivität verbessern, sondern zugleich deutliche Vorteile hinsichtlich der Verzögerungsperformance bieten. Voraussetzung hierfür ist jedoch eine geeignete Kombination komplementärer Frequenzbänder, etwa 6 GHz im terrestrischen Bereich und Ku-Band im Satellitenbereich.

Demgegenüber bieten hochkapazitive Einzelverbindungen in höheren Frequenzbereichen unter ungünstigen Wetterbedingungen nur einen begrenzten praktischen Nutzen, da ihre Leistungsfähigkeit stark durch atmosphärische Einflüsse eingeschränkt wird. Insgesamt unterstreichen die Ergebnisse den strategischen Mehrwert wetterrobuster und frequenzdiverser Netzarchitekturen. Anstelle einer Abhängigkeit von einzelnen, störanfälligen Hochfrequenzverbindungen erscheint für resiliente Infrastrukturen – insbesondere im Kontext kritischer Anwendungen – ein Wettereffekte berücksichtigendes Systemdesign mit technologischer und frequenzseitiger Diversität als zielführender Ansatz.

5.2 Empfehlungen aus der simulationsbasierten Untersuchung

Mit der zunehmenden Verbreitung von volatilen, leistungselektronisch gekoppelten Erzeugungsanlagen (*inverter-based resources*, IBR) gewinnt die Analyse der Auswirkungen von Kommunikationsnetzen immer mehr an Bedeutung: Wiederherstellungsprozesse sollen beschleunigt werden, um die Leistungsfähigkeit von IBRs auszunutzen. Darüber hinaus ist die Dynamik von IBRs naturgemäß höher und der Prozess reagiert daher empfindlicher auf Kommunikationseffekte. Die Ergebnisse zeigen, dass die Kommunikation über LEO-Satelliten die Wiederherstellung von Stromnetzen unterstützen kann, da die in Messungen und Simulationen

Energieforschungsprogramm – Ausschreibung 2023

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

beobachteten Verzögerungen und Verluste bei Verwendung geeigneter Reglereinstellungen gering genug bleiben, um einen stabilen Betrieb zu gewährleisten.

Alternative Ansätze, die die terrestrische Kommunikation umgehen, wie beispielsweise rein dezentrale Steuerungskonzepte, werden zwar intensiv erforscht, liefern jedoch typischerweise suboptimale Ergebnisse, da der Mangel an globalen Systeminformationen konservative und langsamere, auf lokalen Messungen basierende Auslegungen erfordert. Dennoch erscheint eine vertiefte Untersuchung dezentraler Schwarzstart-Architekturen sinnvoll, insbesondere im Hinblick auf die Erhöhung der Systemresilienz. In solchen Konzepten arbeiten mehrere lokale Regler über Kommunikationsschnittstellen koordiniert zusammen, anstatt auf eine zentrale Instanz angewiesen zu sein.

Ziel ist hierbei eine robuste und fehlertolerante Netzwiederherstellung, wobei insbesondere geeignete Konsensmechanismen, Kommunikationsprotokolle sowie die Skalierbarkeit solcher Ansätze näher untersucht werden sollten. Verfahren, die Verzögerungen von vornherein explizit kompensieren (z. B. Smith-Prädiktoren oder Padé-Approximationen), weisen hingegen bei zeitlich veränderlichen Verzögerungen eine geringe Leistungsfähigkeit auf und reagieren sehr empfindlich auf Modellabweichungen. Gleichzeitig führt die Verwendung einer Worst-Case-Verzögerung für den Reglerentwurf entweder zu einer übermäßig konservativen Abstimmung (wodurch die Systemreaktion unnötig verlangsamt wird) oder sie erfasst nicht zwangsläufig das Worst-Case-Szenario aus Stabilitätssicht.

Obwohl sich diese Studie auf das österreichische Übertragungsnetz konzentriert, lassen sich die Ergebnisse qualitativ auf andere Regionen mit Übertragungssystemen ähnlicher Struktur übertragen. Der vorgeschlagene Ansatz ist vollständig auf größere Stromnetze skalierbar: Frequenz- und Blindleistungsregler werden in großen Übertragungsnetzen häufig eingesetzt und sind rechentechnisch effizient. Wir haben bewusst ein einfaches IEEE-9-Bus-Modell gewählt, um die wichtigsten Dynamiken besser erklären und interpretieren zu können. Aus IKT-Perspektive ist die Erweiterung des vorgeschlagenen Ansatzes auf größere Netze machbar (z.B. ein paneuropäisches Netzwerk), da LEO-Satellitenverbindungen die dafür notwendige Bandbreite problemlos zur Verfügung stellen können und eine unabhängige, direkte Geräte-zu-Gerät-Kommunikation über große Gebiete ermöglichen können.

Die hier vorgestellte Simulationsmethodik lässt sich auf verschiedene Weise erweitern. Zunächst haben wir die Analyse mithilfe linearer Modelle durchgeführt. In der Praxis können IBRs während der Lastaufnahme ihre Nennleistung erreichen, und es können weitere nichtlineare Phänomene (z.B. Anstiegsgeschwindigkeiten) auftreten. Zweitens lag unser Fokus hier auf Schwarzstart-Szenarien, die primär auf IBRs basieren. Kurzfristig wird die Netzwiederherstellung jedoch voraussichtlich sowohl konventionelle Kraftwerke als auch IBRs benötigen. In diesem Fall müssen die Reglerparameter möglicherweise angepasst werden, um den Wiederherstellungsprozess zu verlangsamen und der typischen Dynamik konventioneller Kraftwerke Rechnung zu tragen. Für eine detaillierte, quantitative Bewertung spezifischer

Energieforschungsprogramm – Ausschreibung 2023

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Reglerauslegungen, anderer Systemkonfigurationen und Systemgrößen kann die hier verwendete Methode mit relativ geringem Aufwand angewendet werden.

Darüber hinaus haben wir uns in dieser Arbeit auf eine spezifische Phase des Schwarzstartprozesses konzentriert. In der praktischen Anwendung umfasst die Netzwiederherstellung jedoch eine Vielzahl weiterer Schritte (von der initialen Inbetriebnahme über die Synchronisation bis hin zur schrittweisen Last- und Einspeiseintegration), in denen die Eignung satellitengestützter Kommunikation jeweils systematisch untersucht und bewertet werden sollte.

Die detaillierte Simulation der Kommunikation mittels LEO-Satellitenverbindungen ist außerdem noch sehr aufwändig. Der im Projekt gewählte Ansatz mittels der Simulationssoftware Hypatia demonstriert zwar, dass derartige Analysen prinzipiell möglich sind, allerdings war eine große Anzahl an spezifischen Erweiterungen notwendig (Parametrisierung basierend auf Messwerten, Adaptierung des Routing-Mechanismus u. v. m.). Für eine benutzerfreundliche und flexible Abbildung und Simulation von LEO-basierter Kommunikation für weiterführende Studien wäre daher eine Weiterentwicklung der verfügbaren Werkzeuge dringend notwendig. Die im Projekt entwickelten (und öffentlich publizierten) Erweiterungen von Hypatia sind dafür allenfalls ein guter Startpunkt.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Entwicklung generischer Designrichtlinien, die aufzeigen, wie Regler gezielt ausgelegt und optimiert werden können, um charakteristische Eigenschaften satellitengestützter Kommunikationsnetze (insbesondere Latenz, Jitter und Paketverluste) explizit zu berücksichtigen und deren Auswirkungen auf die Systemdynamik zu adressieren.

LEO-Satellitensysteme werden unter anderem für resiliente Kommunikations- und Überwachungsszenarien im Energiesektor als relevant betrachtet, da sie aufgrund ihrer geringen Orbithöhe niedrigere Latenzzeiten als geostationäre Systeme ermöglichen und damit zeitkritische Anwendungen grundsätzlich besser unterstützen können. Ein LEO-basierter Ansatz ist dabei nicht zwangsläufig mit einer großskaligen Mega-Konstellation gleichzusetzen. Während für globale und kontinuierliche Breitbandabdeckung sehr große Satellitenzahlen erforderlich sind, können für anwendungsspezifische Dienste auch deutlich kleinere Konstellationen ausreichen, zum Beispiel 168 Satelliten, wie in [2] berechnet. Für eine erste grobe Kostenabschätzung wird daher im Folgenden eine kleinere LEO-basierte Satellitenmission als Referenz herangezogen.

Im Rahmen dieser Abschätzung zeigt sich, dass eine solche Mission trotz erheblicher Aufwendungen für Material, Personal und technische Umsetzung nur eingeschränkt mit klassischen Großsatellitenmissionen vergleichbar ist, da sie auf einem deutlich niedrigeren Kostenniveau liegt. Dies ist insbesondere auf standardisierte Plattformkonzepte, reduzierte Systemmassen, kürzere Entwicklungszyklen sowie die Nutzung kommerziell verfügbarer Komponenten zurückzuführen. Neben den über die Projektlaufzeit anfallenden Material- und Personalkosten sind jedoch auch einmalige Anlaufkosten zu berücksichtigen, insbesondere für Missionsdefinition, Systemintegration, Qualifikation, regulatorische Zulassung und Startvorbereitung. Im Kostenvergleich liegen kleine LEO-Satelliten typischerweise im unteren bis mittleren

Kommentiert [AV21]: Bitte [2] mit zotero einfügen

Energieforschungsprogramm – Ausschreibung 2023

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Millionenbereich pro Einheit, während MEO-Systeme bereits deutlich höhere Investitionen erfordern und GEO-Satelliten häufig Kosten in Höhe von mehreren hundert Millionen bis hin zu rund einer Milliarde US-Dollar pro Satellit erreichen [22]. Kleine LEO-Satellitenmissionen können, abhängig von Nutzlast, Missionsprofil und Integrationsaufwand, grundsätzlich in einem Kostenrahmen unterhalb des niedrigen einstelligen Millionenbereichs pro Satelliten realisierbar sein. Zudem sind LEO-Systeme in hohem Maße skalierbar, da die Abdeckung und Dienstgüte durch den schrittweisen Ausbau der Konstellation flexibel erweitert werden können, indem bei Bedarf zusätzliche Satelliten für größere Flächenabdeckung (z.B. 16 Erdbeobachtung-Satelliten für Deutschland [2]) oder ergänzende Dienste in den Orbit gebracht werden. Im Vergleich zu terrestrischen Lösungen können satellitengestützte Systeme zwar höhere anfängliche Investitionen erfordern, bei großflächiger oder infrastrukturell schwer erschließbarer Abdeckung jedoch erhebliche operative Vorteile bieten.

Kommentiert [AV22]: Bitte ref [2]

6 Literaturverzeichnis

- [1] M. Braun et al., “The Future of Power System Restoration: Using Distributed Energy Resources as a Force to Get Back Online,” IEEE Power and Energy Magazine, vol. 16, no. 6, pp. 30–41, 2018, doi: 10.1109/MPE.2018.2864227.
- [2] A. Volkova et al., “Design and simulation of LEO satellite communication networks for reliable monitoring and control in power systems,” Proc. of the DACH+ Conf. on Energy Informatics. ACM Energy Informatics Review, vol. 5, no. 3, Sep. 2025.
- [3] B. Hu et al., “LEO Satellite vs. Cellular Networks: Exploring the Potential for Synergistic Integration,” in Companion of the 19th International Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies, in CoNEXT 2023. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2023, pp. 45–51. doi: 10.1145/3624354.3630588.
- [4] A. Tayyebi, D. Groß, and A. Anta, “GridFormingConverters: Implementation of Grid-Forming Control Techniques in IEEE 9-Bus System.” 2019.
- [5] S. Kassing, D. Bhattacharjee, A. B. Águas, J. E. Saethre, and A. Singla, “Exploring the ‘Internet from space’ with Hypatia,” in Proc. of the ACM Internet Measurement Conf., in IMC ’20. New York, NY, USA: ACM, 2020, pp. 214–229.
- [6] Z. Xu, Y. Gao, G. Chen, R. Fernandez, V. Basavarajappa, and R. Tafazolli, “Enhancement of Satellite-To-Phone Link Budget: An Approach Using Distributed Beamforming,” IEEE Veh. Technol. Mag., vol. 18, no. 4, pp. 85–93, Dec. 2023, doi: 10.1109/MVT.2023.3320403.
- [7] W. Qin, A. M. Graff, Z. L. Clements, Z. M. Komodromos, and T. E. Humphreys, “Timing Properties of the Starlink Ku-Band Downlink,” IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 62, pp. 727–744, 2026, doi: 10.1109/TAES.2025.3627180.
- [8] T. Sharma, A. Chehri, and P. Fortier, “Review of optical and wireless backhaul networks and emerging trends of next generation 5G and 6G technologies,” Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, vol. 32, no. 3, p. e4155, 2021, doi: 10.1002/ett.4155.
- [9] A. Volkova, J. Schmidhuber, H. de Meer, and J. Rak, “Design of Weather-Resilient Satellite-Terrestrial ICT Networks for Power Grid Communications,” IEEE Transactions on Network and Service Management, vol. 23, pp. 967–984, 2026, doi: 10.1109/TNSM.2025.3608855.
- [10] L. Izhikevich, M. Tran, K. Izhikevich, G. Akiwate, and Z. Durumeric, “Democratizing LEO Satellite Network Measurement,” Proceedings of the ACM on Measurement and Analysis of Computing Systems, vol. 8, no. 1, Feb. 2024, doi: 10.1145/3639039.

Energieforschungsprogramm – Ausschreibung 2023

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

- [11] A. Volkova, J. Rak, and H. De Meer, "Toward Hybrid Satellite-Terrestrial Networks for Power Grid Control under Weather Disturbances," in *European Wireless 2025*, Oct. 2025.
- [12] G. Almes, S. Kalidindi, M. Zekauskas, and A. Morton (Ed.), "A One-Way Delay Metric for IP Performance Metrics (IPPM)," no. 7679. in *Internet Request for Comments*. RFC Editor, Fremont, CA, USA, Jan. 2016. doi: 10.17487/RFC7679.
- [13] C. Demichelis and P. Chimento, "IP Packet Delay Variation Metric for IP Performance Metrics (IPPM)," no. 3393. in *Internet Request for Comments*. RFC Editor, Fremont, CA, USA, Nov. 2002. doi: 10.17487/RFC3393.
- [14] G. Almes, S. Kalidindi, M. Zekauskas, and A. Morton (Ed.), "A One-Way Loss Metric for IP Performance Metrics (IPPM)," no. 7680. in *Internet Request for Comments*. RFC Editor, Fremont, CA, USA, Jan. 2016. doi: 10.17487/RFC7680.
- [15] A. Morton, L. Ciavattone, G. Ramachandran, S. Shalunov, and J. Perser, "Packet Reordering Metrics," no. 4737. in *Internet Request for Comments*. RFC Editor, Fremont, CA, USA, Nov. 2006. doi: 10.17487/RFC4737.
- [16] H. Uijterwaal, "A One-Way Packet Duplication Metric," no. 5560. in *Internet Request for Comments*. RFC Editor, Fremont, CA, USA, May 2009. doi: 10.17487/RFC5560.
- [17] C. Brandauer and T. Fichtel, "MINER - A measurement infrastructure for network research," in *2009 5th International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks & Communities and Workshops*, Apr. 2009, pp. 1–9. doi: 10.1109/TRIDENTCOM.2009.4976235.
- [18] V. Raisanen, G. Grotefeld, and A. Morton, "Network performance measurement with periodic streams," no. 3432. in *Internet Request for Comments*. RFC Editor, Fremont, CA, USA, Nov. 2002. doi: 10.17487/RFC3432.
- [19] S. Ha, I. Rhee, and L. Xu, "CUBIC: a new TCP-friendly high-speed TCP variant," *ACM SIGOPS operating systems review*, vol. 42, no. 5, pp. 64–74, 2008.
- [20] N. Cardwell, Y. Cheng, C. S. Gunn, S. H. Yeganeh, and V. Jacobson, "BBR: congestion-based congestion control," *Commun. ACM*, vol. 60, no. 2, pp. 58–66, Jan. 2017, doi: 10.1145/3009824.
- [21] L. Kleinrock, "Internet congestion control using the power metric: Keep the pipe just full, but no fuller," *Ad hoc networks*, vol. 80, pp. 142–157, 2018.
- [22] The European Space Agency, "Report on the Space Economy 2024," Dec. 2024.

Energieforschungsprogramm – Ausschreibung 2023

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

7 Kontaktdaten

Projektkoordinator

Christof Brandauer

Salzburg Research Forschungsgesellschaft m.b.H.

Jakob-Haringer-Str. 5/3

info@salzburgresearch.at

<https://www.salzburgresearch.at/>

Projektpartner

AIT Austrian Institute of Technology GmbH

Universität Passau, Lehrstuhl für Informatik mit Schwerpunkt Rechnernetze und Rechnerkommunikation