
Modellierung CME-getriebener ionosphärischer Störungen für einen Echtzeit-Weltraumwetterservice

Erik SCHMÖLTER und Jens BERDERMANN

Zusammenfassung

Die Vorhersage von ionosphärischen Störungen, welche z.B. durch Sonnenstürme verursacht werden, ist eine wichtige Aufgabe von Weltraumwetterdiensten. Hier wird ein Modell vorgestellt, das eine Langzeitvorhersage (mehr als 12 h) während Sonnenstürmen ermöglicht und im Rahmen eines operationellen Dienstes zur Anwendung kommen soll. Der Modellansatz beruht auf der Auswertung historischer Sonnensturmereignisse (über die letzten zwei Sonnenzyklen), die für die Rekonstruktion zukünftiger Ereignisse verwendet werden. Es werden Ergebnisse der aktuellen Modellimplementierung gezeigt und diskutiert. Weiterhin werden mögliche Erweiterung des Modelles vorgestellt. Zudem wird über die Möglichkeiten diskutiert, die Modellergebnisse für verschiedene Nutzer (insbesondere Nutzer mobiler Anwendungen) zur Verfügung zu stellen.

1 Einleitung

Neben der solaren Strahlung werden auch kontinuierlich geladene Teilchen von der Sonne in das interplanetare Medium abgegeben. Dieser Fluss, der sogenannte Sonnenwind, wird durch verschiedene Prozesse gesteuert, die Teil des Weltraumwetters sind. So ist unter anderem der Sonnenwind durch unterschiedlich schnelle Teilchenströme geprägt. Durch diese unterschiedlichen Geschwindigkeiten können schnelle Sonnenwinde die langsamen Sonnenwinde einholen und während der Kollision kommt es zu Schocks, welche den Sonnenwind zusätzlich beschleunigen. Ein solches Ereignis, co-rotating interaction region (CIR), kann sich dann im interplanetaren Medium bis zur Erde ausbreiten. Hinzu können auf der Sonnenoberfläche durch magnetische Rekonnexion große Mengen von Plasma und Strahlung in kurzer Zeit freigesetzt werden. Ein solches Ereignis, coronal mass ejection (CME), bewegt sich mit hoher Geschwindigkeit und Teilchendichte durch das interplanetare Medium.

Der Sonnenwind und das damit verbundene interplanetare Magnetfeld (IMF) interagieren kontinuierlich mit dem Erdmagnetfeld und während des Auftretens von CME oder CIR kann das Erdmagnetfeld erheblich geschwächt werden. Dies führt dann (insbesondere im Fall von CMEs) zu Störungen im ionisierten Teil der oberen Atmosphäre, der sogenannten Ionosphäre (MILAN et al. 2017). Diese Störungen können wiederum erheblich die Leistung von satellitenbasierten Kommunikations- und Navigationsdiensten einschränken und, bei starken Sonnenstürmen, sogar eine Gefahr für Leben (z.B. Astronauten) und Technologie (z.B. Stromnetze und Pipelines) sein (BAKER et al. 2004). Aus diesem Grunde ist eine Vorhersage solcher Störungen von signifikantem Interesse, um unsere moderne Infrastruktur zu schützen und ihre ungestörte Funktionsweise sicherzustellen.

Das Institut für Solar-Terrestrische Physik (SO) des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) beschäftigt sich mit der Untersuchung solar-terrestrischen Prozesse sowie mit der Modellierung und Vorhersage von Weltraumwetterprozessen und ihrer Auswirkungen

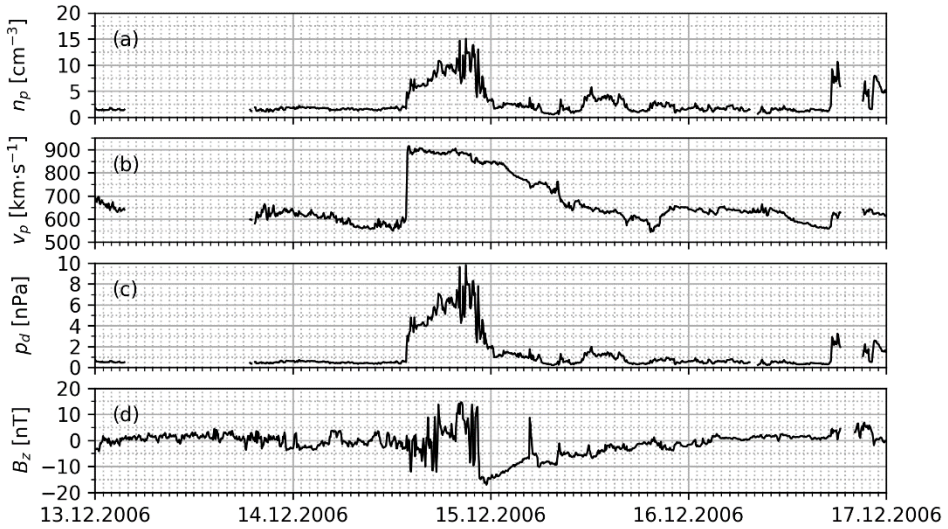


Abb. 1: Protonendichte n_p (a), Protonengeschwindigkeit v_p (b), dynamischer Druck p_d (c) und Nord-Süd-IMF-Komponente B_z (d) während eines Sonnensturms (Schock 13:45 UTC am 14. Dezember 2006).

im erdnahen Weltraum sowie auf der Erde. Von besonderem Interesse ist hierbei unter anderem der ionosphärische Gesamtelektronengehalt (engl. total electron content, TEC), welcher von vielen Nutzer verwendet wird, um den Zustand der Ionosphäre zu bewerten. Hierzu werden bereits durch das Ionosphere Monitoring and Prediction Center (KRIEGEL & BERDERMANN 2020) aktuelle Werte und Kurzzeitvorhersagen auf Grundlage von GNSS-Messungen und Modellen bereitgestellt (Web-Schnittstelle: <https://impc.dlr.de/>). Die hier vorgestellte Langzeitvorhersage (mehr als 12 h) stellt eine Erweiterung dieser Dienste dar und soll im IMPC operativ umgesetzt werden.

2 Datengrundlage und Methodik

2.1 Sonnensturmdetektion mit Sonnenwind- und IMF-Daten

Der Sonnenwind und das IMF werden durch verschiedene Satellitenmissionen am Lagrange-Punkt 1 (L1) gemessen. Die Satellitenmissionen der National Aeronautics and Space Administration (NASA), Advanced Composition Explorer (ACE) und Deep Space Climate Observatory (DSCOVR), führen Messungen bereits seit 1997 und 2015 durch. Daher konnten bereits über einen großen Zeitraum Daten von etwa zwei solaren Zyklen gesammelt werden. Die Fortführung der Missionen stellt sicher, dass Echtzeit- und Trainingsdaten für Modelle den gleichen Instrumenten zugeordnet werden können. Besonders wichtige Messgrößen des Sonnenwindes sind die Protonendichte n_p und die Protonengeschwindigkeit v_p , von denen wiederum der Protonendruck p_d abgeleitet werden kann. Von den IMF-Komponenten ist besonders die Nord-Süd-gerichtete Komponente B_z von Interesse, da diese ein Maß dafür ist, wie effektiv Energie und Teilchen in die Magnetosphäre eindringen können.

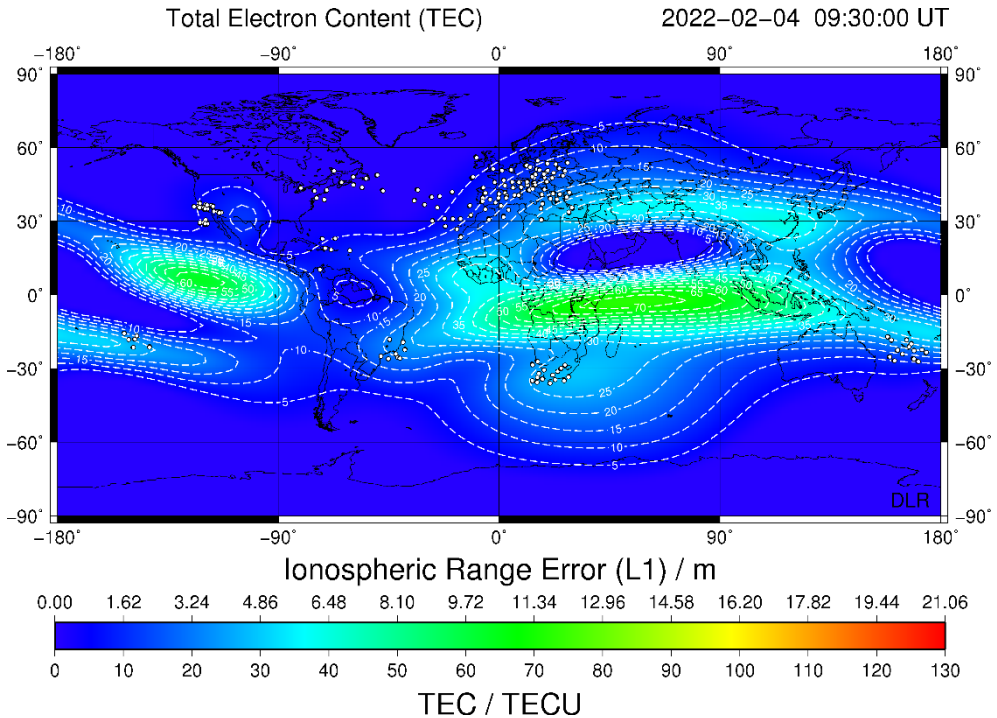


Abb. 2: Globaler TEC und ionosphärischer Ausbreitungsfehler.

In Abbildung 1 werden die genannten Parameter für einen Sonnensturm dargestellt. Es ist deutlich zu sehen, wie die Schockfront um etwa 13:50UTC den Satelliten auf seiner L1-Position erreicht. n_p und v_p nehmen rapide zu und starke Oszillationen werden für B_z beobachtet. Während n_p nach wenigen Stunden zum ursprünglichen Niveau zurückkehrt, zeigt v_p eine wesentliche längere Phase bis das ursprüngliche Niveau wieder erreicht wird. B_z zeigt besonders einige Stunden nach dem Schock einen deutlich südwärts gerichteten Trend (negative Werte) und somit wird auch eine effektive Kopplung mit der Magnetosphäre für diesen Sonnensturm erwartet. Es ergibt sich also eine charakteristische Signatur für das Ereignis, welches durch gewisse Kenngrößen definiert ist. Diese Kenngrößen wiederum ermöglichen eine Zuordnung von auftretenden Sonnenstürmen zu historischen Ereignissen.

2.2 Beschreibung der Ionosphäre mit globalen TEC-Karten

Der vertikale TEC ist die integrierte Elektronendichte N_e entlang eines vertikalen Pfades s durch die Ionosphäre, beschrieben durch

$$\text{TEC} = \int N_e(s) ds. \quad (1)$$

TEC ermöglicht unter anderem die Bestimmung des ionosphärischen Ausbreitungsfehlers I für ausgewählte Frequenzen f mittels der Gleichung

$$I = \frac{40.3}{f^2} \cdot \text{TEC}. \quad (2)$$

Ionosphärischen Korrekturen werden insbesondere für Single-Frequency-Point-Positioning (also z.B. entsprechende GNSS-Empfänger) benötigt, da in diesem Fall der ionosphärische Ausbreitungsfehler zu Positionsungenauigkeiten bei ionosphärischen Stürmen bis zu 100 m betragen kann. Eine Vorhersage der Ionosphäre (also TEC) und entsprechende Korrekturen sind daher von erheblichem Interesse.

Wie bereits in der Einleitung beschrieben, werden verschiedene TEC-Produkte durch das DLR bereitgestellt und stehen für mehrere Jahre zur Verfügung. Neben den Sonnenwind- und IMF-Daten werden diese globalen DLR-TEC-Karten für die Implementierung des Modelles verwendet. Abbildung 2 zeigt eine TEC-Karte, wie sie Nutzern aktuell über das IMPC bereitgestellt wird.

2.3 Modellansatz

Eine ausführliche Beschreibung des Modellkonzeptes wird durch SCHMÖLTER & BERDERMANN (2021) gegeben. Die wesentlichen Merkmale des Modellansatzes können wie folgt zusammengefasst werden:

1. Eine Vorhersage wird nur während des Auftretens eines signifikanten Sonnensturmes durchgeführt. Aus diesem Grund werden Sonnenwinddaten kontinuierlich auf entsprechende Signaturen geprüft.
2. Die aufgezeichnete Signatur wird in Echtzeit mit etwa 600 historischen Ereignissen verglichen, um das Ereignis zu bestimmen, welches am besten zu den aktuellen Bedingungen passt (vergleichbar zu einem Takens-Filter mit statischen Referenzzeitpunkten).
3. Anhand des bestimmten historischen Ereignisses wird die TEC-Rekonstruktion durchgeführt. Hierzu werden relative TEC-Karten (ΔTEC) von dem historischen Zeitpunkt und aktuelle TEC-Karten für ungestörte Bedingungen (gemittelter TEC über 27 d) kombiniert.
4. Mit jedem weiteren Zeitschritt nach dem Beginn der Vorhersage werden auftretende Unterschiede mithilfe der mittleren quadratischen Abweichung (engl. root mean square error, RMSE) erkannt und korrigiert.

Zwischen diesen Schritten werden weitere Filter und Korrekturen angewendet, die zu Bereinigung von Artefakten dienen, welche z.B. durch die Kombination von TEC-Karten entstehen. Die wesentlichen Elemente des Modelles sind die Zuordnung eines passenden historischen Ereignisses und die TEC-Rekonstruktion. Im folgenden Kapitel werden Ergebnisse der beiden Prozessschritte vorgestellt und diskutiert.

3 Ergebnisse

3.1 Zuordnung historischer Sonnenstürme zu aktuellen Ereignissen

SCHMÖLTER & BERDERMANN (2021) führen verschiedene Algorithmen ein, die für eine prototypische Modellimplementierung eine Zuordnung von aktuellen Sonnenstürmen zu historischen Ereignissen ermöglichen. So kann bereits die Anwendung der euklidischen Distanz für alle verfügbaren Parameter eine Zuordnung realisieren, die gute Korrelationen für vorhergesagte und beobachtete Bedingungen der geomagnetischen und ionosphärischen Aktivität zeigt. Neben der Korrelation muss jedoch auch die Stabilität des Algorithmus berücksichtigt

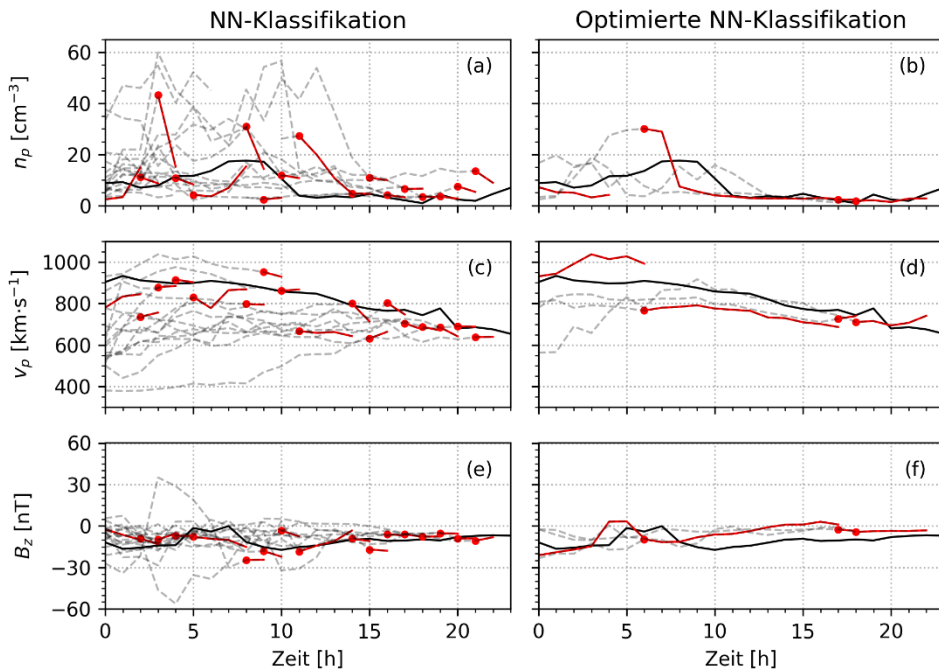


Abb. 3: Zuordnung mittels Nächste-Nachbarn-Klassifikation (NN) für den Sonnensturm am 14. Dezember 2006. Die schwarze Linie zeigt den Verlauf des Ereignisses, die roten Linien zeigen die zugeordneten historischen Ereignisse und die grau gestrichelten Linien deuten die rücklaufenden Verläufe der Zuordnung an.

werden, da z.B. häufige Wechsel der Zuordnung nicht gewollt sind (stetig ändernde Vorhersage).

Abbildung 3 zeigt für den Sonnensturm am 14. Dezember 2006 (siehe auch Abbildung 2), wie die Optimierung eines Zuordnungsverfahrens realisiert werden kann, ohne die Performance (Korrelation) für den gesamten Vorhersagezeitraum signifikant zu verschlechtern. Dies wird unter anderem durch die Anwendung von fortlaufenden Maxima und Berücksichtigung des gesamten zur Verfügung stehenden Beobachtungszeitraums erreicht. Somit werden nur Anstiege in der Stärke der Sonnenstürme berücksichtigt (keine Berücksichtigung kurzzeitiger Schwankungen).

Das implementierte Verfahren liefert gute Ergebnisse für die Vorhersage der geomagnetischen Aktivität und des globalen TEC (SCHMÖLTER & BERDERMANN 2021). In Zukunft könnte der Algorithmus z.B. durch die Berücksichtigung von Jahreszeiten erweitert werden. Dies erfordert jedoch eine noch größere Menge an Referenzereignissen, da die Menge möglicher Zuordnungskandidaten durch eine solche Kategorisierung eingeschränkt wird.

3.2 TEC-Vorhersage für ein ausgewähltes Ereignis

Mithilfe der archivierten ΔTEC -Karten und der Vorhersage für ungestörte Bedingungen $q\text{TEC}$ (oder mittels differentiellen TEC) wird die TEC-Rekonstruktion $f\text{TEC}$ berechnet über

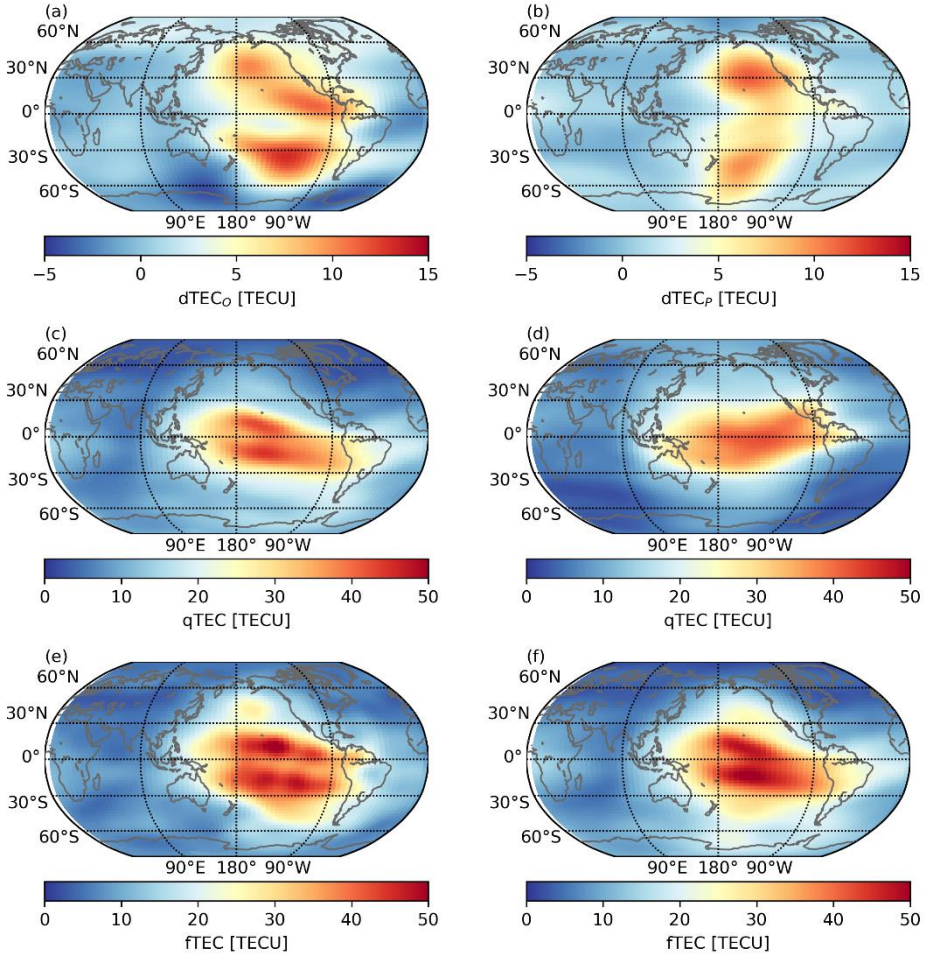


Abb. 4: Beobachtete (a, c, e) und vorhergesagte (b, d, f) dTEC-, qTEC- und fTEC-Karten. Dargestellt für den Sonnensturm am 14. Dezember 2006 etwa 12 h nach dem Auftreten des Sturms am L1-Punkt dargestellt (13:00UTC).

$$fTEC = qTEC \cdot (\Delta TEC + 100\%). \quad (3)$$

Die Berechnung wird ab dem Schock des Sonnensturms für jede Stunde in einem Zeitraum von 24 h durchgeführt und bereitgestellt. Mit fortschreitender Zeit sind somit auch fortlaufend Korrekturen anhand der beobachteten Abweichungen möglich. Damit ergibt sich die tatsächliche Vorhersage zum Zeitschritt t über einen Abgleich zu allen bisherigen Zeitschritten

$$fTEC'_t = fTEC_t + fTEC_n - TEC_n, \quad t > n. \quad (4)$$

Abbildung 4 zeigt exemplarisch das Ergebnis einer solchen Rekonstruktion für den Sonnensturm am 14. Dezember 2006. Während gerade in der räumlichen Verteilung noch Unter-

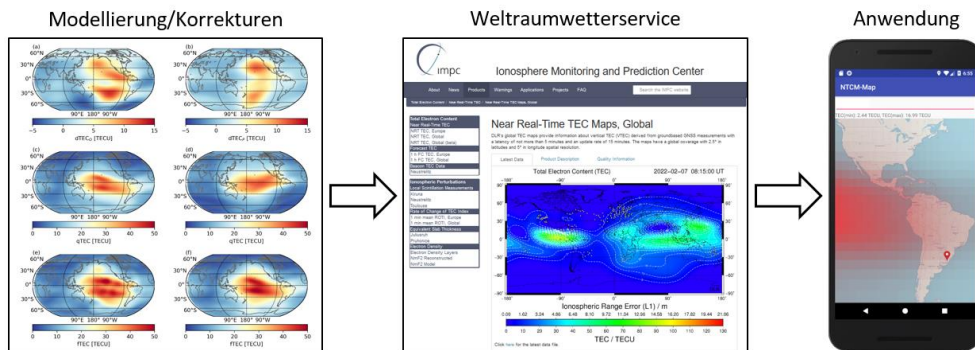


Abb. 5: Nutzung von ionosphärischen Korrekturen aus der Modellierung für mobile Anwendungen in Echtzeit.

schiede auftreten, so ist die Vorhersage insgesamt gut (RMSE von 5.53 TECU), da eine deutlich bessere Vorhersage als ohne Berücksichtigung der Sonnenwindbedingungen gelingt. Wie in SCHMÖLTER & BERDERMANN (2021) gezeigt, wird die Leistung des Modelles im Laufe des Sturms schon nach den ersten Stunden besser und die RMSEs können auf 3 bis zu 2 TECU reduziert werden.

4 Diskussion

4.1 Geplante Erweiterungen des Modells

Aufgrund der bisherigen Ergebnisse und Zielsetzung werden die weiteren Arbeiten am Modell sich auf die folgenden Aufgaben konzentrieren:

1. Berücksichtigung des geomagnetischen Äquators und der dort auftretenden Maxima der Ionosphäre. Dies muss berücksichtigt werden, wenn q TEC und Δ TEC von unterschiedlichen Lokalzeiten abgeleitet sind.
2. Berücksichtigung geomagnetischer Indizes im Verlauf von Sonnenstürmen für die Zuordnung historischer Ereignisse. Dies könnte ähnlich wie die Korrekturen anhand von beobachteten TEC durchgeführt werden.
3. Implementierung geeigneter Filtermethoden zum Entfernen von Artefakten, die während der TEC-Rekonstruktion entstehen.

Weiterhin ist es Ziel, das Modell in einer Implementierung bereitzustellen, die im Rahmen eines operationellen Dienstes angewendet werden kann.

4.2 Bereitstellung der Modellergebnisse für mobile Anwendungen

Obwohl es umfangreiche Anstrengungen gibt, die GNSS-Positionierung von Smartphones (und die damit verbundenen mobilen Anwendungen) zu verbessern, sind noch wesentliche Herausforderungen zu lösen. Dies umfasst unter anderem die Verbesserung von GNSS-Beobachtungen via Smartphones, der verwendeten Hardware, der Handhabung von Störeffekten (z.B. Orientierung des Gerätes) und die angewendeten Algorithmen (ZANGENEHNEJAD & GAO 2021).

Die Bereitstellung von Korrekturen, wie sie z.B. durch das vorgestellte Modell ermittelt werden (oder ggf. eine teilweise Modellierung auf dem Gerät) könnte die Genauigkeit der GNSS-Positionierung von Smartphones deutlich verbessern. Hierfür müssen jedoch die berechneten Ergebnisse in geeigneter Form zusammengestellt werden und über eine geeignete Schnittstelle in der mobilen Anwendung realisiert werden.

Die Bereitstellung von Korrekturen bis hin zu vollständigen TEC-Karten wurde am DLR bereits prototypisch getestet (siehe Abbildung 5), eine operative Umsetzung und Integration der Korrekturen in den Algorithmen der Positionsbestimmung auf den mobilen Geräten erfordert jedoch sowohl wissenschaftliche als auch technische Kompetenzen. Dies könnte z.B. im Rahmen eines anwendungsorientierten Projektes realisiert werden.

5 Fazit

Das vorgestellte Modell ist eine performante Lösung zur Bestimmung von TEC-Variationen, welche durch Sonnenstürme (CME und CIR) verursacht werden. Es ermöglicht erstmalig eine Vorhersage über 24 h von TEC unter dem Einfluss ionosphärischer Stürme. Die Vorhersage liefert spezifische Korrekturen und Warnungen, welche für verschiedene GNSS-Nutzer von Interesse sind. Die kontinuierliche Verbesserung und Erweiterung des Modelles ermöglicht es die Anforderungen an Weltraumwetterinformationen von weiteren Nutzergruppen im Bereich der Navigation und Kommunikation zu erfüllen.

Literatur

- Baker, D. N., Daly, E., Daglis, I., Kappenman, J. G. & Panasyuk, M. (2004): Effects of Space Weather on Technology Infrastructure. *Space Weather*, 2, doi: 10.1029/2003SW000044.
- Kriegel M. & Berdermann J. (2020): Ionosphere Monitoring and Prediction Center, 2020 European Navigation Conference, 1-10, doi: 10.23919/ENC48637.2020.9317443
- Milan, S. E., Clausen, L. B. N., Coxon, J. C. et al. (2017): Overview of Solar Wind–Magnetosphere–Ionosphere–Atmosphere Coupling and the Generation of Magnetospheric Currents. *Space Sci Rev* 206, 547–573, doi: 10.1007/s11214-017-0333-0.
- Schmölter, E. & Berdermann, J. (2021) Predicting the Effects of Solar Storms on the Ionosphere Based on a Comparison of Real-Time Solar Wind Data with the Best-Fitting Historical Storm Event. *Atmosphere*, 12, 1684. doi: 10.3390/atmos12121684.
- Zangenehjad, F. & Gao, Y. (2021): GNSS smartphones positioning: advances, challenges, opportunities, and future perspectives. *Satell Navig* 2, 24. doi: 10.1186/s43020-021-00054-y.

Autoren:

Erik Schmölter

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Solar-Terrestrische Physik, Weltraumwettereinfluss, Kalkhorstweg 53, 17235 Neustrelitz

Erik.Schmoelter@dlr.de

Jens Berdermann

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Solar-Terrestrische Physik, Weltraumwettereinfluss, Kalkhorstweg 53, 17235 Neustrelitz

Jens.Berdermann@dlr.de