



Abbildung 1 | Sonnenflecken in Jahren starker Sonnenaktivität

Quelle: NASA Goddard Space Flight Center.  
<https://www.flickr.com/photos/gsfcr/15430820129/>

# GNSS-Vermessung unter erschwerten Bedingungen

AUTOR Lambert Wanninger | Dresden

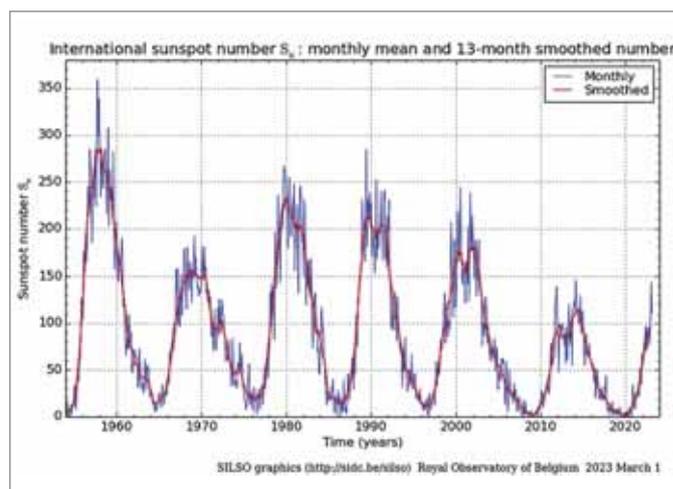
**S**tarke ionosphärische Störungen können zu Problemen und Qualitätsverlusten bei GNSS-Messungen führen. Längere Initialisierungszeiten und eine schlechtere Positionierungsgenauigkeit sind die Folgen. Schuld daran ist die derzeit starke Sonnenaktivität.

So etwa alle elf Jahre wechselt das Magnetfeld der Sonne seine Polarisation. Ein solcher Wechsel geschieht nicht abrupt, sondern dauert wenige Jahre und geht einher mit einem zeitweisen Verschwinden des solaren Magnetfeldes, dem Auftreten von Sonnenflecken (*Abbildung 1*), die schon seit Jahrhunderten von Menschen beobachtet werden, und dem Hinausschleudern von großen Mengen Materie ins All. Ein ganz kleiner Teil davon trifft die Erde und hat Einfluss auf deren Atmosphäre. So treten dann in der Ionosphäre, einer Schicht der Erdatmosphäre, verstärkt geladene Teilchen auf. Dieses Naturphänomen war für die Menschen bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts eigentlich ohne Bedeutung. Erst seitdem verstärkt Funkverkehr betrieben wird, hat die Sonnenaktivität Einfluss auf unser Leben.

Satellitengestützte Positionsbestimmung mit GNSS ist auf Funkkommunikation zwischen Satelliten und Empfängern auf der Erde angewiesen. Alle GNSS-Signale durchqueren die Ionosphäre. Die Hauptwirkung von deren Ionisierung ist eine Verzögerung der Signalgeschwindigkeit. Dies ist seit Beginn des Satellitenzeitalters bekannt. Und da die Signalgeschwindigkeit in der Ionosphäre von der exakten Frequenz der Mikrowellensignale abhängt, lag auch das Gegenmittel auf der Hand: Durch simultane Messungen von Signalen unterschiedlicher Frequenzen kann der entlang des Signalweges integrierte Anteil ionisierter Teilchen bestimmt werden und eine Korrektur der Signalgeschwindigkeit vorgenommen werden (Zweifrequenzkorrektur).

Ist damit das Problem gelöst? Leider nein. GNSS ist heutzutage komplexer, als dass eine Zweifrequenzkorrektur ausreichen würde. Wir haben uns daran gewöhnt, dass wir mit GNSS zentimetergenaue Positionen innerhalb einiger Sekunden bestimmen können. Dabei sind wir aber darauf angewiesen, dass sowohl Zwei- oder Mehrfrequenzmessungen vorliegen wie auch simultane Messungen von stationären Referenzstationen, die es ermöglichen, den ionosphärischen Einfluss auf unsere eigenen Messungen möglichst gut zu modellieren und damit zu korrigieren. Erst durch diese Kombination von Mehrfrequenzmessungen und möglichst guter ionosphärischer Korrektur sind kurze Konvergenzzeiten von unter einer Minute erreichbar.

Die Verteilung der geladenen Teilchen in der Ionosphäre ist sehr variabel. Da gibt es starke zeitliche Variationen von sehr kurzperiodisch (Sekunden) über die dominante Tagesperiode bis zum Elftageszyklus und auch länger. Und es gibt auch räumliche Inhomogenitäten: von lokal (Metergrößenordnung) über regional (100 km) bis global (Breitenabhängigkeit). In den Jahren eines Sonnenaktivitätsmaximums werden sehr viel stärkere Ionisierungen beobachtet als in Jahren eines Minimums. Augenblicklich befinden wir uns im ersten Jahr eines Sonnenaktivitätsmaximums, welches noch weitere zwei Jahre andauern wird (*Abbildung 2*). Danach wird es nach einer Übergangsperiode die nächste Minimumsphase geben, welche auch ungefähr zwei bis drei Jahre andauern wird. Wie stark ein Sonnenaktivitätsmaximum ausfallen wird, lässt sich bis heute nicht zuverlässig vorhersagen und so muss man abwarten, wie sich die augenblickliche Maximumsphase weiterentwickeln wird.



**Abbildung 2** | Die Entwicklung der Sonnenflecken seit Beginn des Satellitenzeitalters

Quelle: SILSO, Royal Observatory of Belgium, Brüssel:  
<https://www.sidc.be/silso/monthlyssnplot>



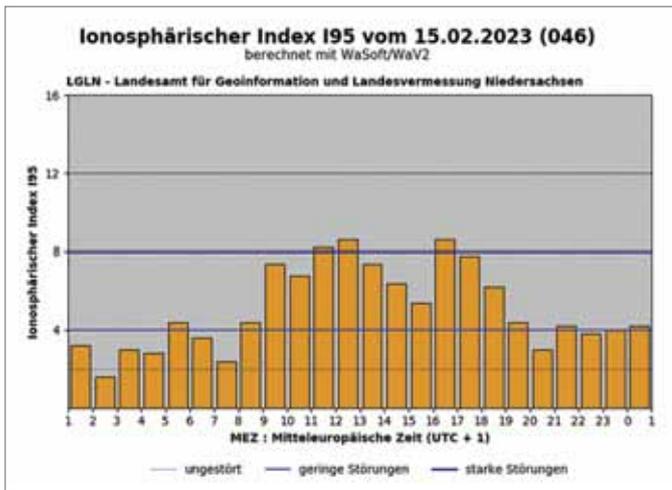
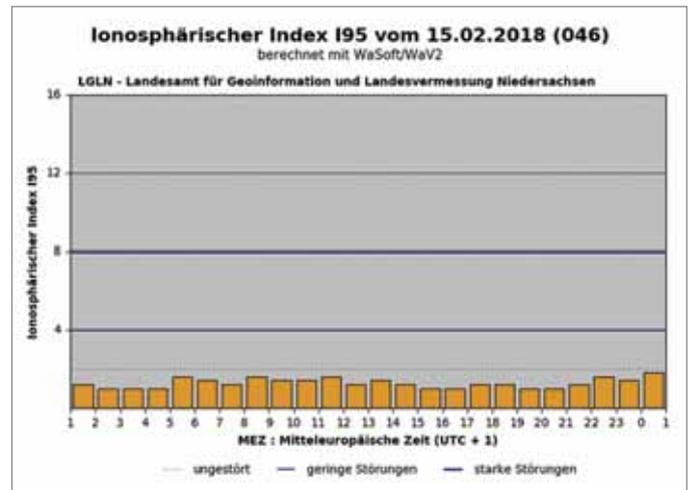


Abbildung 3 | I95-Index-Werte vom 15. Februar 2023 und genau fünf Jahre zuvor



Quelle: Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen: <https://i95.sapos.de>

Wir leben – auch ionosphärisch betrachtet – in gemäßigten Breiten. In Zentraleuropa erreicht die Ionisierung nicht so extreme Werte wie in der Äquatorregion und es treten auch nicht so starke kleinräumige Inhomogenitäten wie in der Äquator- und den Polarregionen auf. Das in Zentraleuropa dominante ionosphärische Problem für zentimetergenaue GNSS-Positionsbestimmung wird durch wandernde ionosphärische Störungen mittlerer Größe verursacht (Medium Scale Travelling Ionospheric Disturbances [MSTID]) ist das Stichwort, wenn Sie mehr Informationen dazu ergoogeln wollen).

Diese haben räumliche Wellenlängen in der Größenordnung von wenigen Hundert Kilometern und bewegen sich mit Geschwindigkeiten von einigen Hundert Stundenkilometern über Europa hinweg. Sie verursachen ionosphärisch bedingte Streckenmessfehler von bis zu einigen Dezimetern.

Diese MSTID treten in starker Abhängigkeit von der Sonnenaktivität auf, also augenblicklich besonders stark: insbesondere in Wintermonaten tagsüber (also zur besten Arbeitszeit) und in schwächerer Form in den Sommermonaten nachts. Sie lassen sich in den Beobachtungsdaten von GNSS-Referenzstationsnetzen gut detektieren und sind die Hauptursache für große I95-Index-Werte (siehe: <https://i95.sapos.de/>), siehe Abbildung 3.

Diese Indexwerte beschreiben gut, ob bei zentimetergenauer Positionsbestimmung mit ionosphärischen Problemen gerechnet werden muss oder nicht. Sie erlauben aber immer nur einen Blick in die Vergangenheit. Eine seriöse, zuverlässige Vorhersage ist nicht möglich.

MSTID sind auch der Hauptgrund für ionosphärische Modellfehler im Referenzstationsnetz. Hierbei kommt es sehr auf die Wellenlängen der MSTID im Verhältnis zum Punktabstand der Referenzstationen an. Je weiter die Referenzstationen auseinanderliegen, umso größer werden die verbleibenden ionosphärischen Fehler sein. Auch ein Referenzstationsabstand von nur 50 km kann da schon zu groß sein.

Auch ist die Frage, wie gut die sogenannte Vernetzungssoftware, also die Programme, die die Referenzstationsbeobachtungen vorverarbeiten, mit großen ionosphärischen Restfehlern umgehen kann. Haben die Algorithmen damit Probleme, so werden die Korrekptionsdatenströme unvollständig sein.

Entscheidend ist auch, wie gut die Software im GNSS-Empfänger mit ionosphärischen Restfehlern umgehen kann. Liegen solche Restfehler vor, dann wird die Qualität der Lösung schlechter werden: Die Initialisierungszeiten werden länger und die Streuung der Koordinatenergebnisse nimmt zu. Je nach gewählten Auswertelgorithmen werden diese Qualitätsverluste kleiner oder größer ausfallen.

Werden solche Qualitätsverschlechterungen beobachtet, dann ist ein Blick auf den I95-Index sehr hilfreich, um schnell herauszufinden, ob dies an der Ionosphäre liegen könnte oder doch nach anderen Ursachen gesucht werden muss.

Der erste Winter in diesem Sonnenfleckenmaximum liegt hinter uns und es gab viele Meldungen über erschwerte zentimetergenaue GNSS-Positionsbestimmung.

Der nächste und vielleicht auch übernächste Winter werden nicht besser werden. Aber danach wird die Sonnenaktivität spürbar zurückgehen und alles wird wieder einfacher, bis wir alle 2033 von diesem natürlichen Phänomen wieder überrascht werden. 🌐

