

# LANGZEITUNTERSUCHUNGEN VON SONNENERUPTIONEFFEKTEN IN DER UNTEREN IONOSPHERE MIT LF- FELDSTÄRKEREGISTRIERUNGEN

Ch. JACOBI<sup>1</sup>, und D. KÜRSCHNER<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institut für Meteorologie, Universität Leipzig, Deutschland*

<sup>2</sup>*Institut für Geophysik und Geologie, Universität Leipzig, Deutschland*

## 1 ZUSAMMENFASSUNG

Plötzliche Phasenanomalien (engl. sudden phase anomalies, SPA) von Langwellen, die in den Tageslichtstunden von der ionosphärischen D- Region reflektiert werden, treten auf, wenn schnelle Änderungen in der Reflexionshöhe stattfinden. Sie führen zu einer abrupten Änderung der linearen Superposition von Raum- und Bodenwelle am Beobachtungspunkt und in der Folge im Betrag der empfangenen Interferenzfeldstärke. Solche plötzlichen schnellen Reflexionshöhenänderungen sind gewöhnlich mit einer kurzen (Minuten bis Stunden) Zunahme der Elektronendichte in der unteren Ionosphäre verbunden und nach Sonneneruptionseffekten zu beobachten, die u.a. mit einer erheblichen Erhöhung der emittierten kurzwelligigen Röntgenstrahlung einhergehen. Das mittlere Strahlungsniveau und die Anzahl von Bursts variiert mit dem 11-jährigen Sonnenfleckenzyklus, so dass statistische Untersuchungen von Anzahl und Intensität der SPA- Effekte spezielle Hinweise auf solar-terrestrische, die obere Atmosphäre betreffende Verbindungen geben können. An der Außenstelle Observatorium Collm der Universität Leipzig werden SPAs seit mehreren Jahrzehnten registriert. Sie stellen eine Datenbasis für die Jahre 1983-2002 zur Untersuchung solar-terrestrischer Beziehungen dar.

## 2 EINLEITUNG

In den letzten Jahren hat das Interesse an den Einflüssen solarer Variabilität auf die Atmosphäre der Erde wieder zugenommen. Unter anderem liegt dies am Potenzial atmosphärischer Zirkulationsmodelle, mit denen die solare Effekte auf die Stratosphäre und Mesosphäre nachgewiesen werden können (z.B. Fröhlich et al., 2003) und an neuen internationalen Programmen wie CAWSES (Climate and Weather in the Sun-Earth System, Geller, 2003) welche die umfassende Untersuchung von Kopplungsprozessen von der Sonne zur Erde zum Thema haben. Die Untersuchung solar-terrestrischer Effekte (z.B. McRae et al., 2004) verlangt jedoch die Analyse langer Zeitreihen von Parametern, die den Einfluss der Sonne auf die Erde reflektieren können.

In diesem Zusammenhang ist es von Interesse, das langfristige Verhalten von Anzahl und Intensität plötzlicher ionosphärischer Störungen (sudden ionospheric disturbances, SIDs), die als Folge von Ausbrüchen solarer Strahlung im Zusammenhang mit Sonneneruptionseffekten (solar flares effects, SFEs) auftreten, zu untersuchen. Umgekehrt sind SIDs ein Maß für solar induzierte ionosphärische Variabilität, da die Registrierungen die Reaktion der Ionosphäre auf die abrupte Zunahme von Röntgen- und Lyman- $\alpha$ -Strahlung widerspiegeln.

Am Observatorium Collm der Universität Leipzig werden ionosphärische Störungen regelmäßig mit Hilfe von Langwellen(long-wave, LF)-Feldstärkeregistrierungen auf 4 Frequenzen beobachtet. Plötzliche synchron beobachtbare Phasenanomalien (sudden phase anomalies, SPA) in diesen Registrierungen werden als SIDs interpretiert. Die Daten sind verwendbar, um den Störungszustand der unteren Ionosphäre zu charakterisieren. Die Feldstärkeregistrierungen können aber auch zur Analyse anderer Effekte, die mit einer Änderung der Reflexionshöhe einhergehen, wie z.B. bei einer Sonnenfinsternis, herangezogen werden (Jacobi and Kürschner, 2000). Im Folgenden wird ein einfacher Index vorgestellt, der den mittleren monatlichen Störungszustand der unteren Ionosphäre beschreibt.

### 3 DATENSATZ UND DATENVERARBEITUNG

#### 3.1 REGISTRIERUNG EINZELNER SIDs AM OBSERVATORIUM COLLM

Am Observatorium Collm der Universität Leipzig werden LF-Feldstärkeregistrierungen auf den Frequenzen 60, 75, 162 und 252 KHz durchgeführt. Eine Karte mit den verwendeten Sendern und den Reflexionspunkten in der unteren Ionosphäre (D-Schichtniveau, die Reflexionshöhe sinkt am Tage bis auf Werte etwas unterhalb 80 km) ist in Abbildung 1 dargestellt. Zusätzlich gezeigt ist der Ausbreitungsweg der Raumwellen des Langwellensenders 177 kHz (Sender Zehlendorf bei Berlin), mit dem eine *direkte Bestimmung der absoluten nächtlichen Reflexionshöhe* erfolgt (Kürschner et al., 1987). Wegen der im Vergleich zu den anderen Messstrecken sehr viel geringeren Sender-Empfängerdistanz erfolgt der Einfall dieser Radiowelle auf 177 kHz sehr viel steiler und die Reflexion findet oberhalb der D-Schicht am Unterrand der nächtlichen E-Schicht statt. Da die Raumwelle also in den Tageslichtstunden die D-Schicht durchqueren muss, auf der anderen Seite aber gleichzeitig mit SIDs deren Absorption erhöht wird, nimmt die Feldstärke der empfangenen Raumwelle von 177 kHz (nicht aber auf den anderen Frequenzen, die im Höhenbereich der D-Schicht reflektiert werden) kurzzeitig stark ab. Bei hinreichend starken Effekten und bevorzugt im Winterhalbjahr unter den Bedingungen einer relativ geringen Raumwellenabsorption in den Tageslichtstunden kann auch diese Erscheinung zusätzlich zur Identifikation von SFEs genutzt werden.

Die Feldstärkeregistrierungen auf den vier Langwellenfrequenzen bestehen in der Messung der Gesamtfeldstärke, die aus der linearen Überlagerung von Raumwelle und Bodenwelle resultiert. Jede Verringerung der Reflexionshöhe der Raumwelle verursacht eine Änderung ihres Laufweges und damit eine Variation der Phasenverschiebung zwischen Raumwelle und zeitlich unveränderlicher Bodenwelle am Empfangsort. Wenn die Variabilität der Raumwelle klein im Vergleich zur Gesamtfeldstärke ist, erfolgt durch die Phasenverschiebung eine abwechselnd konstruktive und destruktive Überlagerung von Raum- und Bodenwelle, welches zu einer Modulation der registrierten Gesamtfeldstärke führt. Ist zum Beispiel die Überlagerung anfänglich konstruktiv, so führt die Verlängerung des Ausbreitungsweges der Raumwelle um eine halbe Wellenlänge im weiteren Verlauf zu einer destruktiven Überlagerung und damit zu einer Abnahme der Feldstärke. Durch einfaches Auszählen der Feldstärkeminima und -maxima und unter Zugrundelegung der Frequenz und Streckengeometrie ist es also möglich, den Betrag der Änderung der Reflexionshöhe zu verfolgen. Diese Methode wird auch in Verbindung mit regulären täglichen Variationen der Reflexionshöhe durch die variable Zenitdistanz der Sonne zur Erfassung langfristiger Trends

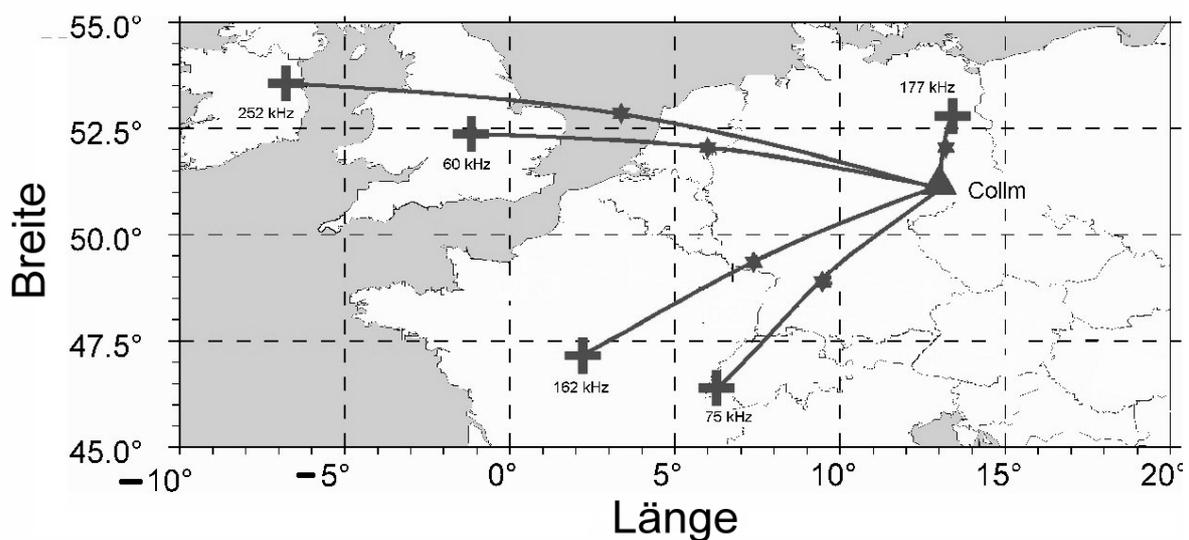


Abbildung 1. Karte mit der Darstellung der verwendeten LF-Sender, Ausbreitungswege der Raumwelle und Reflexionspunkte in der Ionosphäre.

in der Höhenposition eines Niveaus konstanter Elektronendichte in der unteren Ionosphäre angewendet (Bremer und Berger, 2002).

Plötzliche Anstiege der solaren Röntgen- und Lyman- $\alpha$ -Strahlung in Folge solarer Ausbrüche führen zu einer Zunahme der Ionisation ( $O_2$ ,  $N_2$ ;  $NO$ ) in der unteren Ionosphäre, und darauf folgend zu einer raschen Abnahme der Höhenlage von Schichten konstanter Elektronendichte. Da die Reflexionshöhe von LF-Radiowellen neben der Frequenz direkt von (a) dem ionosphärischen Einfallswinkel, (b) der Höhenlage einer Schicht konstanter Elektronendichte und (c) der Form des Elektronendichteprofiles abhängig ist, führt ein solarer Strahlungsausbruch zu einer schnellen Abnahme von LF-Reflexionshöhen und damit zu einer raschen Änderung der Interferenzfeldstärke. Weil diese Änderung der Feldstärke ihre Ursache in einer Änderung der Phasenverschiebung zwischen Raum- und Bodenwelle hat, wird dieser Effekt plötzliche Phasenanomalie (SPA) genannt. Da die aktuelle Phasenlage von Raum- und Bodenwelle zu Beginn einer SPA beliebige Werte haben kann, ist anfänglich sowohl eine Abnahme als auch eine Zunahme der Interferenzfeldstärke möglich. Beispiele der Feldstärkevariationen während SPAs sind in Abbildung 2 zusammen mit den Röntgenstrahlungsmessungen des GOES-10 Space-Environment-Monitor der NOAA dargestellt. Es handelt sich um Registrierungen vom 28. Oktober 2003. Es sind nur die Registrierungen auf 60 und 162 kHz dargestellt, weil in diesem Fall die Störung so stark war, dass die Dynamik der Empfangskanäle für 75 und 252 kHz nicht ausreichte (Übersteuerung). Das Maximum der Strahlungsemission wurde gegen 11.10 UTC (Position 3 in Abbildung 2) beobachtet. Zu diesem Zeitpunkt erfolgte in der aktiven solaren Region (Nr. 10486 nach National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), USA) die drittstärkste Eruption seit Beginn der Aufzeichnungen im Jahre 1976 (Klassifikation X17/4B mit einer von den GOES-Satelliten erfassten Strahlungsintensität von  $1.7 \text{ mWm}^{-2}$  im Wellenlängenbereich von  $1\text{-}8\text{\AA}$ , NOAA).

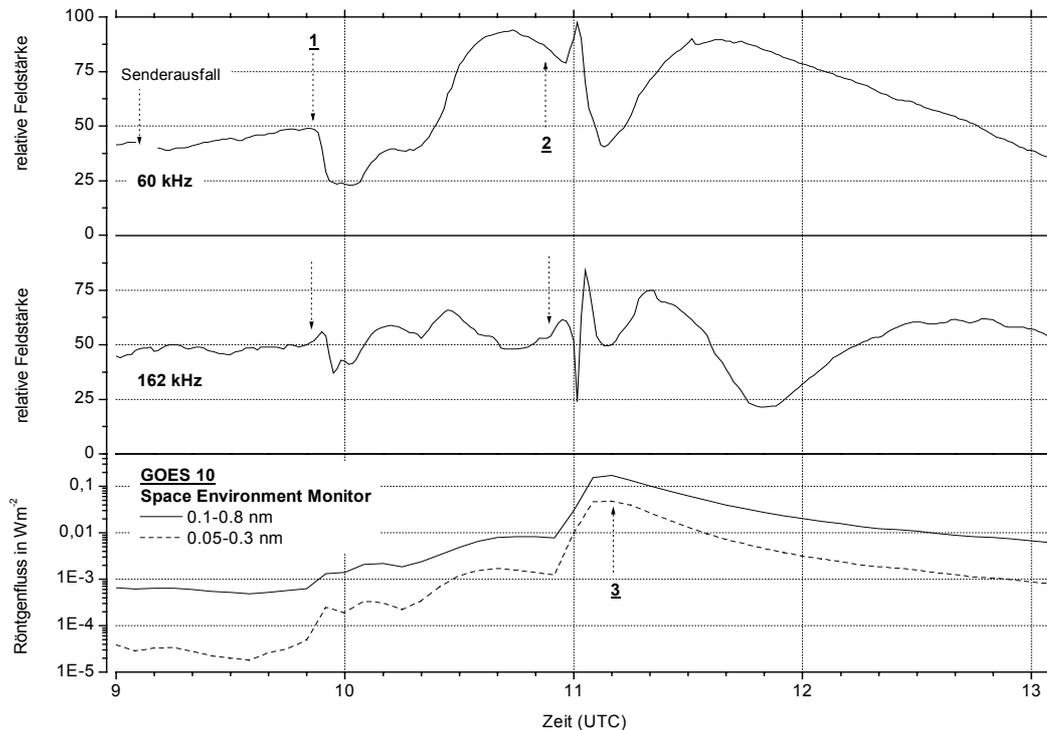


Abbildung 2. Beispiele (1,2) für SPA-Registrierungen vom 28.10.2003 zusammen mit Röntgenstrahlungsdaten, gemessen von dem Satelliten GOES 10. Die 10.56 UTC beginnende Eruption erzeugt gegen 11.10 UTC (3) den stärksten seit Aufzeichnungsbeginn 1976 registrierten Strahlungsausbruch (X17/4b) im Wellenlängenbereich zwischen 0.1 und 0.8 nm.

Für jede einzelne am Observatorium Collm registrierte SPA wird die Zeit des ersten Einsatzes und die Anzahl der Registrierungen (max. 4), in denen der Effekt synchron eindeutig zuordenbar ist, erfasst. Schwache Störungen (im Bereich  $\sim 10^{-6} \text{ Wm}^{-2}$ ) sind ggf. nur auf einer oder 2 Frequenzen zu sehen, während starke Effekte in der Regel auf allen 4 Frequenzen gleichermaßen deutlich zu erkennen sind. Nach Chilton et al. (1963) wird die Intensität von SPAs durch die Phasenverschiebung charakterisiert (wobei  $360^\circ$  der Verlängerung des Ausbreitungsweges um eine volle Wellenlänge entspricht). Wir klassifizieren SPAs in 3 Kategorien (1, 2, and 3), wobei 1 die schwächsten Effekte bezeichnet, 2 eine Phasenverschiebung von mehr als  $200^\circ$  und 3 eine solche von mehr als  $300^\circ$  bezeichnet. Der überwiegende Anteil der SPAs fällt in die Kategorie 1. Typischerweise werden während des solaren Maximums 2-3 SPAs *pro Tag* registriert, während im solaren Minimum im Extremfall nur 0-3 Ereignisse *pro Monat* zu beobachten sind. Die Daten werden in Monatsberichten veröffentlicht, die im Internet unter <http://www.uni-leipzig.de/~jacobi/collm/reports> verfügbar sind.

### 3.2 BILDUNG EINES SPA-INDEX

Die einzelnen SPA-Registrierungen eines Monats werden zu einem "SPA-Index" zusammengefasst, der die mittlere tägliche Häufigkeit von SPAs auf irgendeiner der 4 verwendeten Frequenzen darstellt:

$$\text{SPA1} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i \frac{24\text{h}}{t}, \quad (1)$$

wobei  $N$  die Anzahl der Tage des Monats,  $n_i$  die Anzahl der SPAs während der einzelnen Tage und  $t$  die Zeit (in Stunden) zwischen Sonnenauf- und -untergang in 82 km Höhe bezeichnet. Die letztere Korrektur ist notwendig, da naturgemäß SPAs nur während der Tagstunden auftreten, und damit bei Vergleichen von SPAs in unterschiedlichen Monaten die Tageslänge eine Rolle spielt. Verschiedene Modifikationen des Index wurden getestet. Die erste berücksichtigt die Anzahl der Messstrecken  $n_f$ , auf denen die SPA registriert wurde:

$$\text{SPA2} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{n_f}{n_{f,m}} n_i \frac{24}{t}, \quad (2)$$

wobei  $n_{f,m}$  die Anzahl der maximal möglichen Messstrecken ist. Diese kann von 4 abweichen, wenn ein Messgeräte- oder Senderausfall vorliegt. Eine andere Variante berücksichtigt die Intensität  $I_i$  (1-3), indem die entsprechende SPA mit dieser gewichtet in den Index eingeht:

$$\text{SPA3} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i I_i \frac{24}{t}. \quad (3)$$

Indexvariante	Anzahl $n_f$ der Frequenzen (1-4), auf denen SPA registriert wurden	Intensität $I_i$	Korrelation mit SPA1
SPA1	-	-	1
SPA2	gewichtet	-	0,982
SPA3	-	gewichtet	0,995
SPA4	gewichtet	-	0,987

Tabelle 1. Varianten des SPA-Index.

Die 4. Variante ist eine Kombination aus (2) und (3):

$$\text{SPA4} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{n_f}{n_{f,m}} n_i I_i \frac{24}{t} \quad (4)$$

Die 4 Varianten des Index sind in Tabelle 1 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Unterschiede zwischen den Indizes nicht groß sind. Nimmt man SPA1 als Referenz an, so ist die Korrelation mit den anderen Varianten immer größer als 0.98. Der mittlere SPA2-Index ist ein wenig kleiner als SPA1, da  $n_f/n_{f,m} \leq 1$ . Zieht man die Intensität in Betracht (SPA3 und SPA4), vergrößert dies den mittleren Index wegen  $I_i \geq 1$ . Da starke SPA mit  $I_i > 1$  aber selten sind, ist dieser Effekt gering und im Mittel wird  $\text{SPA4} < \text{SPA1}$ .

Die Wahl der Variante des SPA-Index beeinflusst die Ergebnisse von Untersuchungen zum Störungszustand der Ionosphäre nicht qualitativ. In Abbildung 3 ist das relative Verhältnis  $(\text{SPA1}-\text{SPA4})/\text{SPA4}$  gegenüber SPA4 dargestellt. Der mittlere Wert ist 0,42, die Abweichung von 0 liegt hauptsächlich daran, dass SPA4 die Ausfälle der Messungen auf einzelnen Messstrecken berücksichtigt. Für kleine SPA4, also für im Mittel geringe ionosphärische Störungen wird SPA1 sehr viel größer als SPA4, da vor allem schwache Störungen (an der Untergrenze der C- Klasse bei ca.  $1 \mu\text{Wm}^{-2}$ ) oft nicht auf allen Messstrecken gemessen werden. Für einen stärkeren mittleren Störungszustand ist jedoch keine systematische Abhängigkeit der Differenz von SPA4 mehr zu erkennen. In Abbildung 3 ist ein exponentieller Abfall an die Datenpunkte angepasst (die Wahl der Funktion ist willkürlich, wir sind hier vor allem an einem empirischen Überblick über das Verhalten des Index interessiert). Man erkennt, dass sich die Kurve für  $\text{SPA4} > 0.5$  rasch einem Wert von 0.25 nähert. Wir können also schlussfolgern, dass für einen moderaten oder starken Störungszustand die Wahl der Indexvariante bei Langzeitanalysen nicht von Bedeutung ist. Für wenig gestörte Verhältnisse ist jedoch SPA4 zu bevorzugen, da hier eine deutlichere Unterscheidung

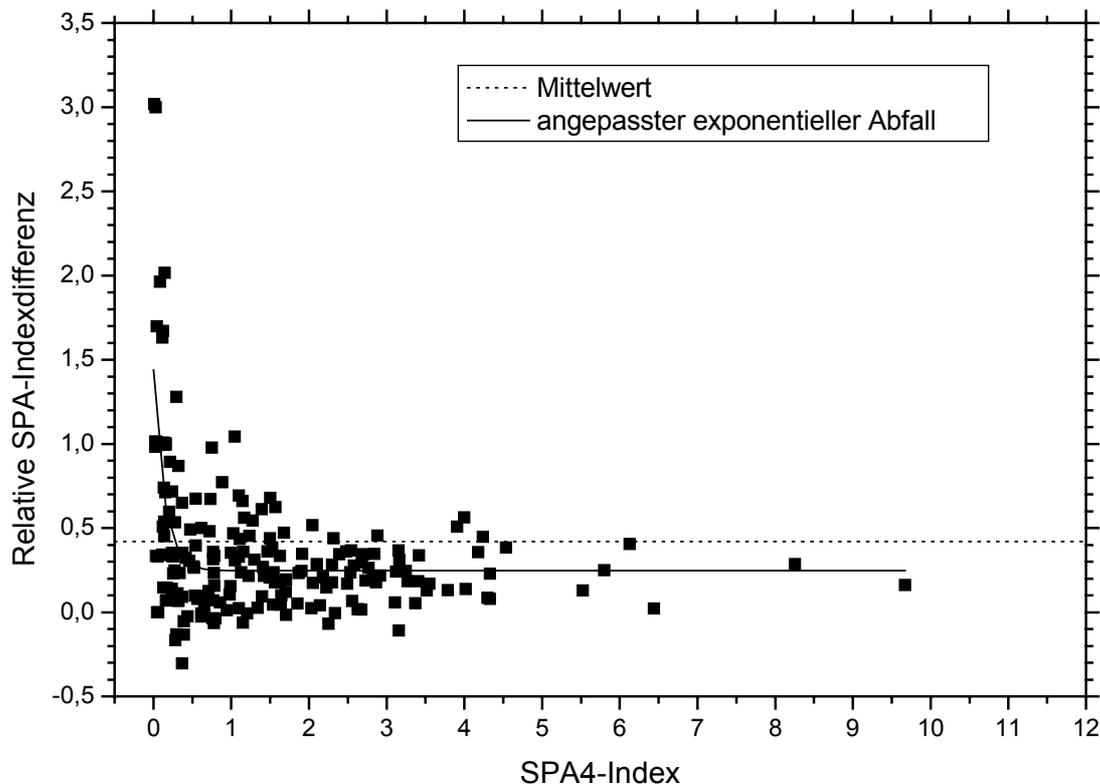


Abbildung 3. Relatives Verhältnis  $(\text{SPA1}-\text{SPA4})/\text{SPA4}$ , dargestellt gegenüber dem SPA4 -Index. Der Datensatz umfasst den Zeitraum 1983-2002.

zwischen schwach und sehr schwach gestörten Verhältnissen möglich ist. Im Folgenden beschränken wir uns daher auf die Darstellung von SPA4.

Es ist zu beachten, dass, obwohl die Korrelation der verschiedenen Varianten (wie letztlich auch zu erwarten) sehr straff ist, die relative Unterschiede im Einzelfall groß werden können. Betrachtet man also den ionosphärischen Störungszustand während eines kurzen Zeitraums (z.B. weniger Monate), so kann die Wahl der Indexvariante durchaus von Bedeutung sein. Die Ergebnisse von Langzeitstudien, z.B. zur Variation von SPA während des 11-jährigen solaren Zyklus, werden davon aber qualitativ nicht berührt.

### 3.3 HOMOGENITÄT DER ZEITREIHE

Ein Punkt, welcher bei der Analyse jeglicher Parameter aus einem langen Beobachtungszeitraum eine wichtige Rolle spielt, ist die Homogenität der Zeitreihe. Dies ist um so mehr der Fall, wenn die Auswertung manuell und damit nicht vollkommen frei von subjektiven Momenten erfolgt, wie es hier der Fall ist. Da rasche Feldstärkeschwankungen auch aus einer Reihe anderer Gründe auftreten können (z.B. atmosphärische Wellenphänomene), können subjektive Einflüsse im Prinzip das Ergebnis beeinflussen, vor allem wenn der Bearbeiter wechselt. Dies war in der vorliegenden Zeitreihe im März 1999 der Fall. Um Hinweise auf mögliche Inhomogenitäten zu erhalten, werden daher in Abbildung 4 die SPA4-Indizes vor und nach März 1999 verglichen. Als Referenz wird der F10.7-Radiofluss auf 2800 MHz gewählt, da die prinzipiell für eine direkte Korrelation besser geeigneten Messungen der solaren Röntgenstrahlung mit den GOES-Satelliten im Wellenlängenbereich zwischen 0.1 und 0.8 nm erst seit 1986 in einer geeigneten Form zur Verfügung stehen.

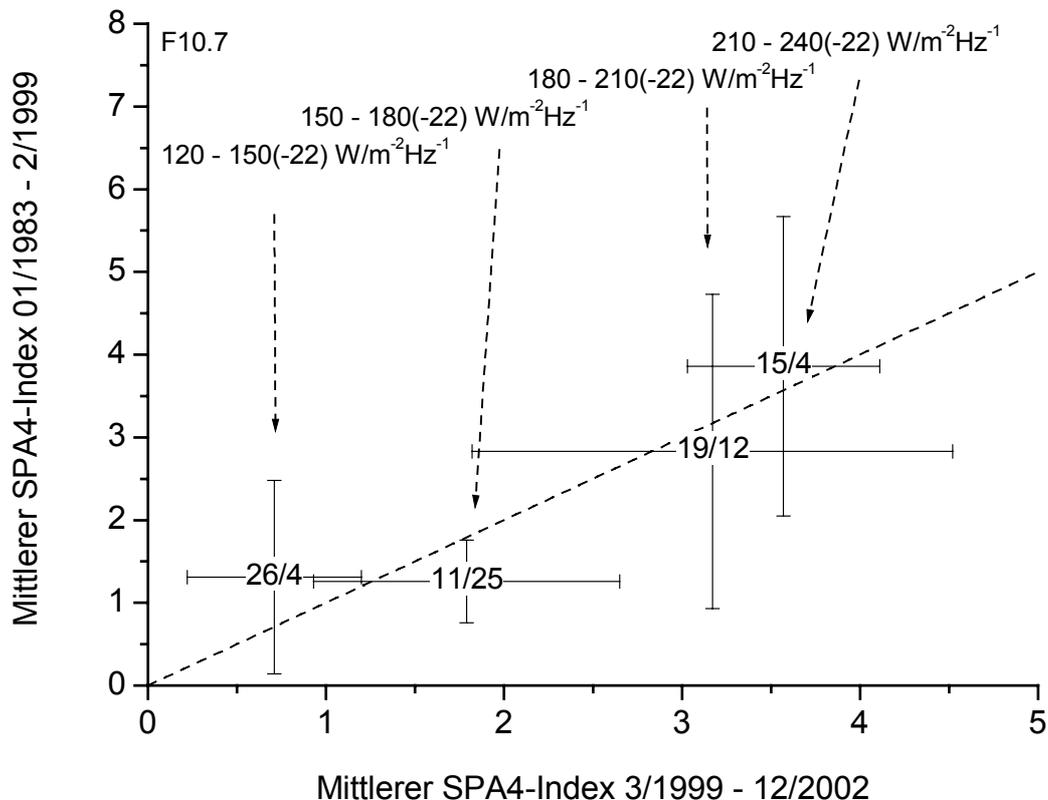


Abbildung 4. Vergleich der mittleren SPA-Indizes vor und nach März 1999 für verschiedene Bereiche des F10.7-Radioflusses.

In Abbildung 4 werden die mittleren Werte von SPA4 des Zeitraums Januar 1983 bis Februar 1999 den mittleren Indizes des Zeitraums März 1999 bis Dezember 2002 gegenübergestellt. Es wurden jeweils diejenigen Monate in die Mittelung mit einbezogen, in denen der F10.7-Radiofluss in das in der Abbildung angegebenen Wertintervall fiel. Die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung (vertikal für Zeiten vor, horizontal für Zeiten nach März 1999), die Zahlen im jeweiligen Kreuz geben die Anzahl der verwendeten Monate an. Ein Vergleich sehr kleiner Indizes war nicht möglich, da der Zeitraum seit 1999 in das solare Maximum fällt. Man erkennt in Abbildung 4, dass im allgemeinen keine großen Unterschiede in den Zeiträumen zu sehen sind. Eine Ausnahme bildet der Bereich mit F10.7 zwischen 150 und  $180 \cdot 10^{-22} \text{Wm}^{-2} \text{Hz}^{-1}$ , wo die mittleren Unterschiede erkennbar werden. Auch hier ist der Unterschied aber nicht statistisch signifikant. Wir können schlussfolgern, dass zumindest keine starken Hinweise auf eine Inhomogenität der Zeitreihe zu erkennen sind.

#### 4 VERBINDUNG ZWISCHEN SPA UND SOLAREM RADIOFLUSS

Ionosphärische Störungen in Folge solarer Ausbrüche erfolgen naturgemäß bevorzugt während des Maximums des jeweiligen Sonnenfleckenzyklus. Um dies zu beleuchten, werden in Abbildung 5 die Zeitreihen des SPA4-Index und der F10.7-Radiostrahlung gemeinsam gezeigt. Wie erwartet, folgt die SPA-Kurve derjenigen des solaren Flusses; dies ist auch für sekundäre Variationen wie dem kleinen Maximum 1984 der Fall. Auf der anderen Seite erkennt man aber auch Unterschiede, insbesondere werden während des Sonnenfleckenmaximums die starken Störungen gegenüber den F10.7-Werten hervorgehoben.

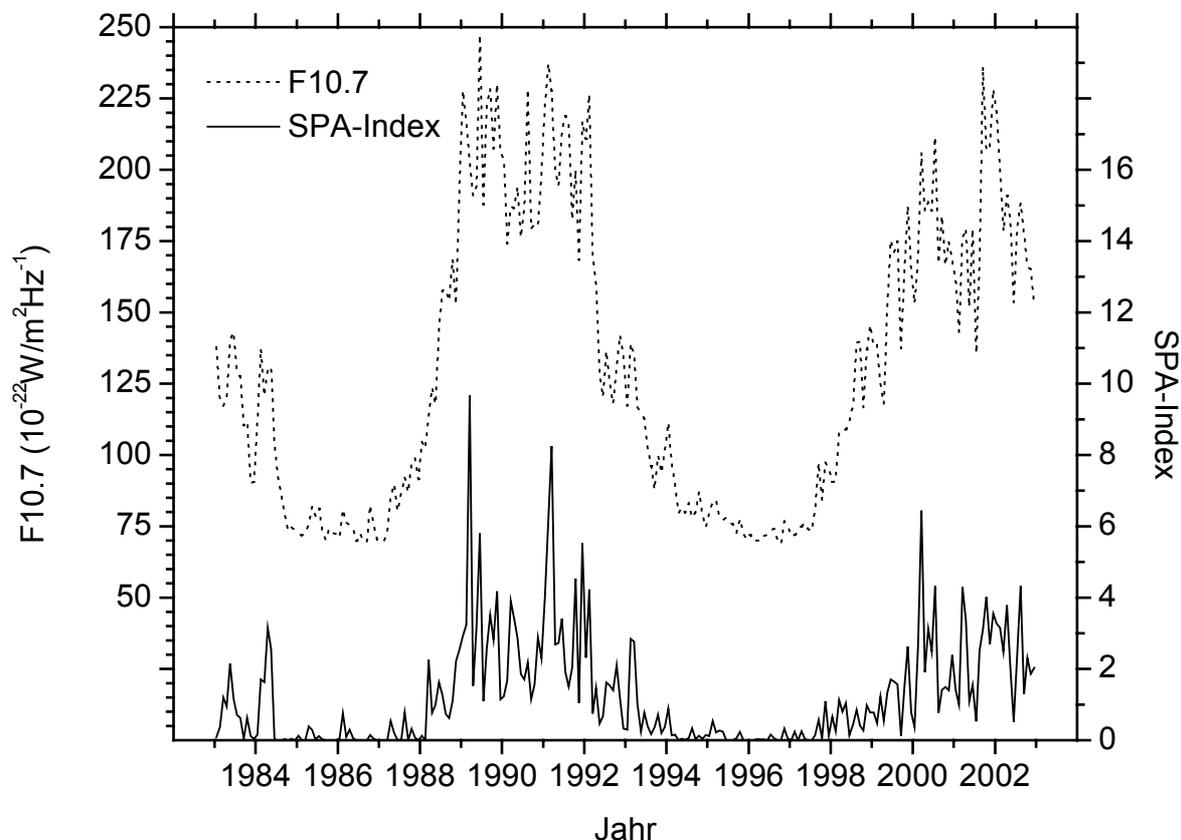


Abbildung 5. Zeitreihen des SPA4-Index und des solaren Radioflusses F10.7.

Diese Betonung der Zeiträume mit starker ionosphärischer Störung wird auch in Abbildung 6 deutlich, die das Korrelogramm zwischen dem logarithmisch aufgetragenen SPA4-Index und F10.7 zeigt. Man erkennt den logarithmischen Zusammenhang für hohe solare Aktivität (große Werte von F10.7 bzw. SPA4). Eine lineare Regression für  $F10.7 > 110 \cdot 10^{-22} \text{ Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$  ergibt den folgenden Zusammenhang:

$$\ln(\text{SPA4}) = -2.211 + 0,015 \cdot F10.7,$$

wenn F10.7 in  $10^{-22} \text{ Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$  angegeben wird. Der Korrelationskoeffizient beträgt 0.72. Der logarithmische Zusammenhang spiegelt die stärkere Betonung der Monate gestörter Ionosphäre durch SPA4 wider. Für einen schwachen ionosphärischen Störungszustand, also kleine SPA4-Werte, ergibt sich ein eher linearer Zusammenhang, doch ist hier die Streuung vergleichsweise groß, so dass auf die Ableitung eines quantitativen Zusammenhangs verzichtet wird. Bei der Interpretation wird vorausgesetzt, dass der solare Radiofluss F10.7 und die solare Röntgenstrahlung, die für die beobachteten Effekte in der D-Region verantwortlich ist, hochgradig korreliert sind.

## 5 SCHLUSSFOLGERUNG

Tägliche Registrierungen plötzlicher Phasenanstiegen erlauben die Erstellung eines Index, welche den mittleren Störungszustand der unteren Ionosphäre in Folge solarer Eruptionen erlaubt. Zwischen diesem Index und der F10.7-Radiostrahlung wurde ein logarithmischer Zusammenhang gefunden. Der Datensatz ist für den Zeitraum seit 1983 verfügbar und ist damit jetzt schon geeignet, für Langzeitstudien solar-terrestrischer Zusammenhänge verwendet zu werden. Die Registrierung von SPA am Observatorium Collm begann jedoch schon vor 1983. Es ist vorgesehen, die früheren Registrierungen ebenfalls zu digitalisieren und damit eine Erweiterung der Zeitreihe zu erreichen.

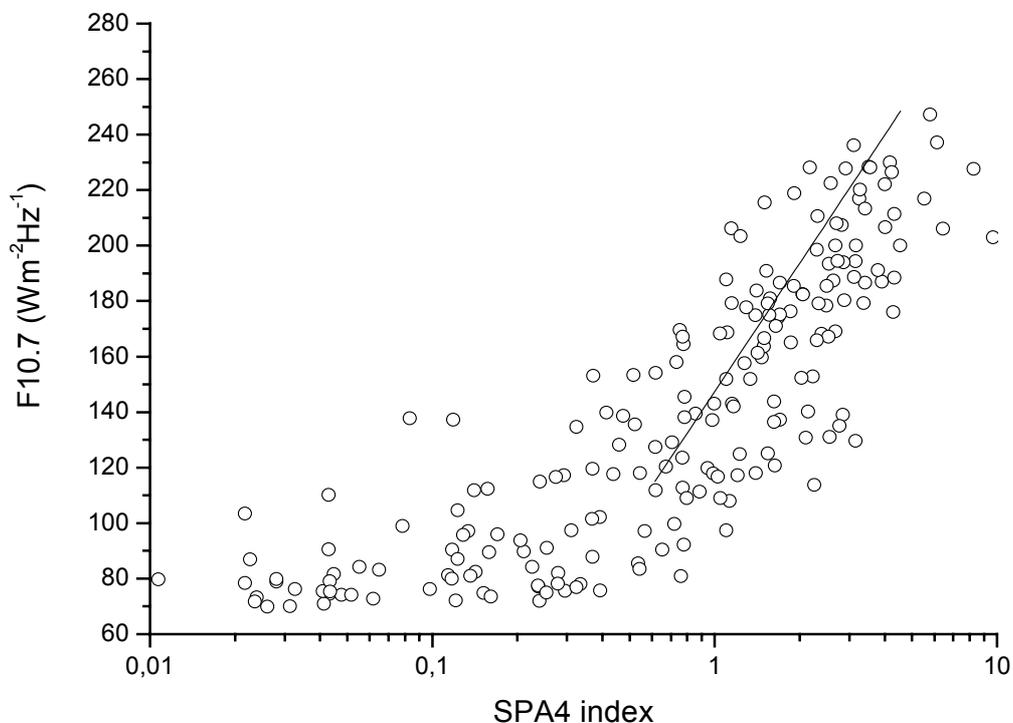


Abbildung 6. Darstellung des solaren Radioflusses F10.7 gegenüber dem SPA4-Index.

## DANKSAGUNG

Wir danken Herrn Dr. Rudolf Schminder, der bis zu seiner Pensionierung über viele Jahre die Leitung der Messungen und die Auswertung der Feldstärkeregistrierungen durchgeführt hat. GOES-Daten wurden vom NGDC, NOAA, auf <http://goes.ngdc.noaa.gov/> zur Verfügung gestellt.

## LITERATUR

- Bremer, J., und Berger, U. (2002). Mesospheric temperature trends derived from ground-based LF phase-height observations at mid-latitudes: comparison with model simulations, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 64, 805-816.
- Chilton, C.J., Norton, R.B., und Steele, F.K. (1963). Very-Low-Frequency phase observations of solar flare ionization in D Region of ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 68, 5421-5435.
- Fröhlich, K., und Jacobi, Ch. (2003). Der solare Zyklus in der mittleren Atmosphäre: Änderungen in der mittleren Zirkulation und den Ausbreitungsbedingungen der planetaren Wellen, *Terra Nostra*, 2003/6, 6. Deutsche Klimatagung, 155-160.
- Geller, M., (2003). SCOSTEP and CAWSES, *Geophys. Res. Abstracts*, 5, 13313.
- Jacobi, Ch., und Kürschner, D. (2000). Ergebnisse ionosphärischer Messungen am Observatorium Collm während der totalen Sonnenfinsternis vom 11.8.1999, Ber. LIM und IfT, 17, Leipzig, 88-94.
- Kürschner, D., Schminder, R., Singer, W., und Bremer, W. (1987). Ein neues Verfahren zur Realisierung absoluter Reflexionshöhenmessungen an Raumwellen amplitudenmodulierter Rundfunksender bei Schrägeinfall im Langwellenbereich als Hilfsmittel zur Ableitung von Windprofilen in der oberen Mesopausenregion, *Z. Meteorol.*, 37, 322-332.
- McRae, W.M., und Thomson, N.R. (2004). Solar flare induced ionospheric D-region enhancements from VLF phase and amplitude observations, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 66, 77-87.