Sonnenflecken und das Erdklima (1)

Erforschung der variablen Sonnenaktivität

von Ulrich von Kusserow

Die Sonne ist der Motor des Erdklimas, die als dominierend relevante Quelle 99,9% der Energie in unser Klimasystem liefert. Die mehr oder weniger periodisch variierende Anzahl bzw. der Gesamtflächeninhalt der auf ihrer Oberfläche jeweils zu beobachtenden, durch hier austretende solare magnetische Flussröhren erzeugten dunklen Sonnenflecken werden als ein Maß für die Stärke der jeweils aktuellen Sonnenaktivität verwendet. Anfang des 19. Jahrhunderts war es der bekannte Astronom Friedrich Wilhelm (William) Herschel, der die über einen Zeitraum von etwa zehn Jahren schwankenden Weizenpreise in England mit der Anzahl der zu beobachtenden Flecken auf der Sonne korrelierte, der damit erstmals einen engeren Einfluss der Sonnenaktivität auf die Veränderungen des Erdklimas postulierte. Aktuell diskutieren Wissenschaftler in diesem Zusammenhang erneut darüber, ob nicht auch die periodisch variierenden Planetenkonstellationen in unserem Sonnensystem für die sich auf unterschiedlichen Zeitskalen verändernden Sonnenflecken-Relativzahlen verantwortlich sein könnten. ***(Bild 1)***

Anm.: In den Bildunterschriften sind Internetlinks zu Videodateien angeführt.

Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) definiert das Klima auf dem Planeten Erde als das über einen Zeitraum von 30 Jahren anzutreffende durchschnittliche Wetter. Dieses lässt sich durch eine Vielzahl räumlich und zeitlich variabler relevanter Messgrößen wie die der Temperatur, der Dichte, des Druckes und der Feuchtigkeit der Luft, der Geschwindigkeit und Richtung des Windes, der Sonnenscheindauer, der Art und Stärke der Wolkenbedeckung und Niederschläge sowie des Rückstrahlvermögens des Klimasystems charakterisieren, vermessen und statistisch auswerten. Dieses energetisch zu 99,9 % von der Sonne angetriebene Klimasystem besteht mit der Lithosphäre, Hydrosphäre, Kryosphäre, Erdatmosphäre sowie der Biosphäre aus insgesamt fünf Erdsphären, in denen sich aufgrund unterschiedlicher Verteilung der Land- und Wassermassen sowie bezüglich geographischer Breite stark variierender Strahlungs- und Wärmebilanzen eine Vielzahl charakteristischer Klimazonen ausgebildet haben. Eine Fülle natürlicher, externer und interner Prozesse des Klimasystems sowie durch die Entwicklung des Lebens in der Biosphäre der Erde bedingter Klimafaktoren nehmen durch physikalische, chemische und biologische, positive und negative Rückkopplungsprozesse in komplexer Weise Einfluss auf die Entwicklung des Erdklimas, das von daher schon immer zeitlich mehr oder weniger starken Veränderungen unterworfen war.

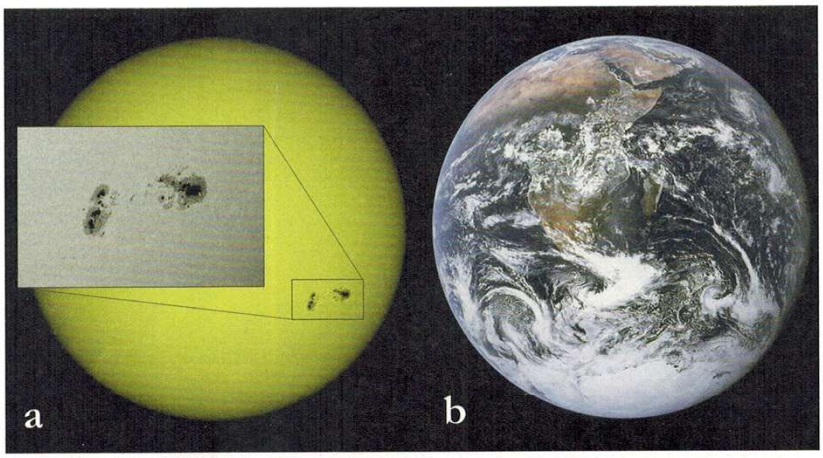
Der Begriff des Klimas wurde erstmals um 500 v. Chr. in Form des altgriechischen Wortes *κλίμα* verwendet, das, übersetzt ins Deutsche, die Bedeutung „Krümmung" oder „Neigung" hat, mit dem die Griechen damals den jahreszeitlich variierenden Einfluss der Sonne auf ihren Lebensalltag in Abhängigkeit von der Neigung der Erdachse zur Sonne kennzeichnen wollten. Die Leistung der in das Erdsystem einwirkenden Sonnenstrahlung wird auf etwa 170.000 TW (Billionen Watt) geschätzt. Demgegenüber beträgt die Leistung des geothermischen Energiestroms aus der im Erdinneren gespeicherten und durch radioaktiven Zerfall freigesetzten Wärme vergleichsweise unbedeutende 47 TW, die der menschlichen Wärmeprodukt geschätzt 18 und die der Gezeitenenergie sogar nur 4 TW. Der Sonnenwind, die kosmische Strahlung und die Meteoriten stellen weitere natürliche Energiequellen mit einer, demgegenüber allerdings vernachlässigbaren Leistung, dar [1].

Während bis etwa 1970 natürliche Einflussfaktoren die Entwicklung des Erdklimas dominierend bestimmt haben sollen, gehen viele Wissenschaftler und große Teile der Bevölkerung heute davon aus, dass danach zunehmend anthropogene, also menschliche Einflüsse in den fortschreitend wachsenden modernen Industriegesellschaften dafür hauptsächlich verantwortlich sein müssten. Stellvertretend für negative Einflüsse auf das Erdklima, die zu beobachtenden Temperaturerhöhungen, das Schmelzen der Polareiskappen und Gletscher, der Anstieg des Meeresspiegels sowie das Auftreten starker Wetter Extrema wird vor allem der zunehmende Ausstoß von Kohlenstoff-Dioxid (CO_2) beklagt, eines den Treibhauseffekt erwiesenermaßen verstärkenden Gases, das im Zusammenhang mit der Photosynthese aber auch für die Lebensentwicklung in der Biosphäre der Erde von zentraler Bedeutung ist. Wasserdampf als verdampftes, also gasförmiges Wasser (H_2O) ist ein deutlich wirksameres Treibhausgas, das im Vergleich zum CO_2 mit aktuell etwas mehr als 0,04 % in deutlich höherer Konzentration von gemittelt 1 % der Zusammensetzung der Atmosphäre nicht nur für deren Erwärmung, sondern im Zusammenhang mit Wolkenbildungsprozessen auch *für d*eren Kühlung sorgt. Wasserdampf ist *für* den atmosphärischen Wärmetransport in Konvektionszellen vom Äquator zu den Polgebieten mitverantwortlich, und in flüssiger Form

bestimmt es die effektive Energiespeicherung sowie den Wärmetransport in den ozeanischen Strömungen.

In dieser dreiteiligen Artikelserie wird ein Überblick über die Vielfalt natürlicher, Klimasystem immanenter und anthropogener Klimaeinflussfaktoren sowie über deren komplexe, auf ganz unterschiedlichen Längen- und Zeitskalen ablaufenden Interaktionsprozesse gegeben. Schwerpunktmäßig soll dabei vor allem die Rolle der magnetischen Sonne im Mittelpunkt stehen, die das Weltraumwetter bestimmt, die elektromagnetische Strahlung sowie im Sonnenwind hochenergetische Teilchen ins Erdsystem emittiert und dort entscheidenden Einfluss auf die Energietransport- und Speicherprozesse in der Erdatmosphäre und den Weltmeeren nimmt.

Die im Optischen und Infraroten tief in die troposphärische Atmosphärenschicht, bis zur Oberfläche der Lithosphäre und in die oberen Ozeanschichten vordringende solare Strahlungsenergie kann dort absorbiert, reemittiert sowie an Hindernissen reflektiert werden. Verstärkt in Äquatornähe treibt sie Heizungs- und Strömungsprozesse an, die, nach dem „Bottom-Up" Prinzip, von unten nach oben wirkend, starken klimarelevanten Einfluss auf die darüberliegenden Atmosphärenschichten nehmen. Demgegenüber kann besonders hochfrequente elektromagnetische Strahlung sowie solare und kosmische Partikelstrahlung meist nur bis in die darüberliegenden Atmosphärenschichten vordringen. Diese Strahlung heizt hier u. a. die Thermosphäre auf, bewirkt die Aufladung der Ionosphäre, ermöglicht dort chemische Prozesse und bestimmt die Eigenschaften der uns vor harter UV-Strahlung schützenden stratosphärischen Ozonschicht. Verstärkt in polnahen Gebieten, wo geladene Teilchen entlang erdmagnetischer Felder tiefer in die Atmosphäre eindringen, können diese Prozesse nach dem „Top-Down" Prinzip von oben nach unten umgekehrt ebenfalls signifikanten Einfluss auf das troposphärische Klimageschehen nehmen.



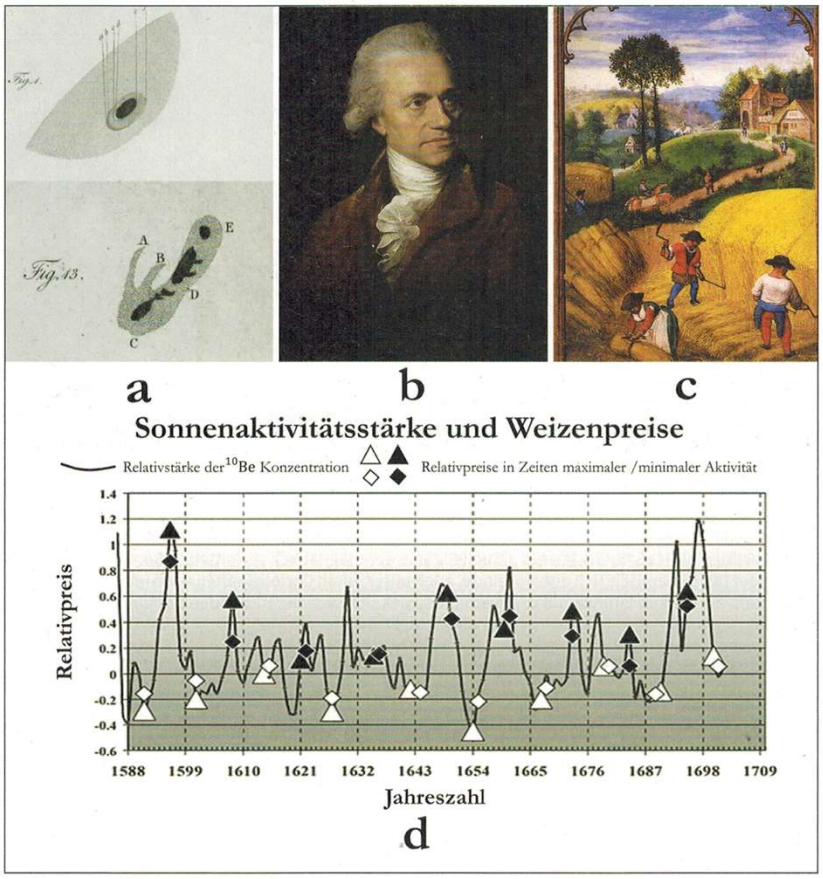
1 Vom Solar Dynamics Observatory aus erstellte Weißlichtaufnahme (vergrößert dargestellter) solarer Fleckengruppen, die sich in der Photosphäre auf der Oberfläche der rotierenden Sonne entwickeln. Die Summe, gebildet aus der Anzahl der Einzelflecken sowie der der Fleckengruppen bzw. die Summe der von den Flecken bedeckten Flächen relativ zu der, für den Beobachter sichtbaren Sonnenoberfläche, werden als Maß für die jeweils aktuelle Stärke der magnetisch vermittelten Sonnenaktivität verwendet (**a**). Dynamisch sich entwickelnde, auch unter durch Corioliskräften verformte Wolkenstrukturen, die starken Einfluss auf die Ausprägung des sich stets verändernden Erdklimas nehmen, bedecken die rotierende „Blaue Glaskugel" Erde (**b**). *SDO/NASA, NASA/Apollo 17 Besatzung*
• Big Sunspot Group https://sdo.gsfc.nasa.gov/gallery/main/item/654
• Rotating Blue Marble https://www.youtube.com/watch?v=laiVuCmEjlg

Über den Sonneneinfluss auf die Weizenpreise

Der deutsche Forschungsreisende *Alexander von Humboldt* (1769–1859) war nicht nur an der Erforschung der Botanik und des Erdmagnetfeldes, sondern auch an der des Wettergeschehens und der Klimazonen der Erde interessiert. Er erkannte die Komplexität des Klimasystems, glaubte dabei nicht an den Einfluss des Mondes und Planeten darauf, sah aber die Sonnenstrahlung als zentralen Verursacher von Klimaveränderungen an und betrachtete das Klima der Erde als ein komplexes System. Es war der berühmte, als „Vater der stellaren Astronomie" bezeichnete deutsch-britische Astronom *William Herschel* (1738–1822, **Bild 2b**), der die Sonne für einen variablen Stern hielt, dessen Leuchtkraft aufgrund der variierenden Anzahl und Fläche der auf seiner Oberfläche zu beobachtenden dunklen Sonnenflecken deutlich schwanken müsste, und dessen Ausstrahlung dadurch merklichen Einfluss auf das Erdklima nehmen könnte.

Berichte über die Existenz solcher Sonnenflecken findet man erstmals in China etwa 800 v. Chr. und in der westlichen Literatur erstmals 300 v. Chr. durch den griechischen Gelehrten *Theophrastus*. Die erste Zeichnung eines Flecks erstellte der englische Mönch *John of Worcester* im Jahre 1128. Die erste Beobachtung mit einem Teleskop erfolgte 1610 durch den englischen Astronomen *Thomas Harriot* (1560–1610). Der Danziger Astronom und Teleskopbauer *Johannes Hevelius* (1611–1687), dem ein außergewöhnlich scharfes Sehvermögen nachgesagt wurde, beobachtete den Umlauf der Sonnenflecken, um die Periode der Sonnenrotation zu ermitteln. In der Umgebung größerer Sonnenflecken entdeckte er dabei vor allem in Nähe des Sonnenrandes eine Vielzahl punktförmiger heller Regionen, die er als „Fackeln" bezeichnete. Es war der schottische Astronom und Meteorologe *Alexander Wilson* (1714–1786), der den nach ihm benannten Effekt entdeckte, wonach vor allem auch das als Umbra bezeichnete besonders dunkle Zentrum eines Sonnenflecks zum Sonnenrand hin immer schmaler zu werden scheint, wodurch der Eindruck entsteht, dort tiefer in die Sonnenatmosphäre hineinblicken zu können (siehe **Bild 3b**).

In einer Periode besonders geringer Fleckenhäufigkeit, dem sogenannten Daltonminimum, beobachtete *Herschel* mit seinen leistungsfähigen Teleskopen von 1779 bis 1818 (siehe **Bild 9a**) besonders regelmäßig Sonnenflecken (**Bild 2a**). Er erkannte Variationen in deren Gesamtzahl auf der Sonnenoberfläche, ihrer jeweiligen Form und Größe. Er verglich diese Beobachtungsergebnisse mit der Entwicklung von Weizenpreisen und stellte eine ihn sehr beeindruckende Korrelation zwischen diesen Preisen und der Anzahl der zu beobachtenden Sonnenflecken fest. Wenn diese



2 Zur Entdeckung einer möglichen Korrelation zwischen der Stärke der Sonnenaktivität und Weizenpreiens. Zeichnungen von Sonnenflecken (**a**) durch *William Herschel* (**b**) aus dem Jahre 1801. Dieser deutsch-britische Astronom vermutete damals eine negative Korrelation zwischen der Anzahl dieser auf der Sonnenoberfläche zu beobachtenden dunklen Flecken und den Preisen des in England geernteten Weizens (**c**) aufgrund eines erstmals vermuteten Einflusses der zeitlich veränderlichen Sonnenaktivität auf das Erdklima. Die Graphik **d**, in der die Relativpreise des Weizens zu einem Normalwert zusammen mit der im Rhythmus der Sonnenaktivität schwankenden Relativstärke der Konzentration der in der Erdatmosphäre gemessenen Be-10-Ionen für den Zeitraum von 1588 bis 1709 eingetragen sind, würde die Möglichkeit einer solchen bestehenden Korrelation bestätigen. Danach fallen offensichtlich im Maximum (Minimum) der Sonnenaktivität sowohl die Be-10-Konzentrationen als auch die Weizenpreise niedriger (höher) aus.
Herschel's sketches of sunspots in a 1801 Philosophical Transactions of the Royal Society paper (Phil. Trans. 1801, vol. 91, pp. 265-318); Gemälde von Lemuel Francis Abbott, *National Portrait Gallery (London); Gemälde von* Simon Bening, *um 1550, Wikimedia Commons;* L. A. Pustilnik/G. Y. Din

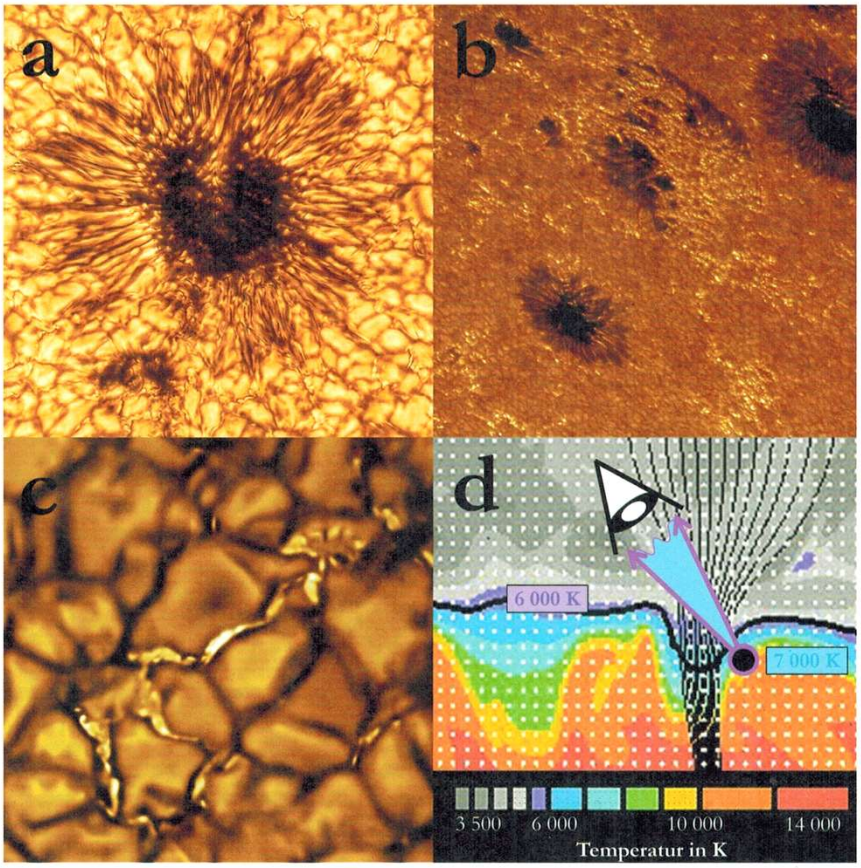
Anzahl groß (klein) war, dann waren die Preise niedrig (hoch). 1801 schloss er daraus, dass die Weizenernte (**Bild 2c**) bei hoher (niedriger) Sonnenfleckenaktivität aufgrund eines positiven (negativen) Klimaeinflusses durch Erwärmung (Abkühlung) gut (schlecht) ausfallen müsste, die also in negativer Korrelation zum Weizenpreis stehen müsste. 1847 verwendete *John Frederick William Herschel* (1792–1871, *William Herschels* Sohn) in diesem, von ihm postulierten Zusammenhang zwischen Prozessen auf der Sonne und dem Erdklima, erstmals den Begriff der „solaren Meteorologie". Auch wenn **Bild 2d** die Gültigkeit dieser von *Herschel* angenommenen Korrelation nahezulegen scheint, so wird ein solcher Zusammenhang aufgrund der notwendigen Berücksichtigung einer Vielzahl weiterer relevanter Einflussfaktoren bis heute von Wissenschaftlern sehr kontrovers diskutiert. ([2], [3])

In seinem 1795 veröffentlichten Artikel „On the Nature of the Sun and Fixed Stars" ging *Herschel* davon aus, dass die Sonne ein kühler Superplanet in Form eines großen Felsballs sein müsste, auf dem auch Bewohner leben könnten, und der von flammenden Wolken umgeben sei. Dunkle Sonnenflecken entständen durch Löcher in diesen Wolken. Und je mehr es davon gäbe, umso stärker müssten die Wolken leuchten, wodurch sich die Leuchtkraft der Sonne insgesamt verstärken würde, es auf der Erde dadurch wärmer wäre, die Ernten besser ausfallen könnten, und die Weizenpreise deshalb sinken sollten. Eigentlich im Widerspruch dazu, ging er davon aus, dass Sonnenflecken und Fackeln Gebirge bzw. Täler darstellen würden. ([4], [5], [6])

Sonnenflecken, Fackelgebiete und die Leuchtkraft der Sonne

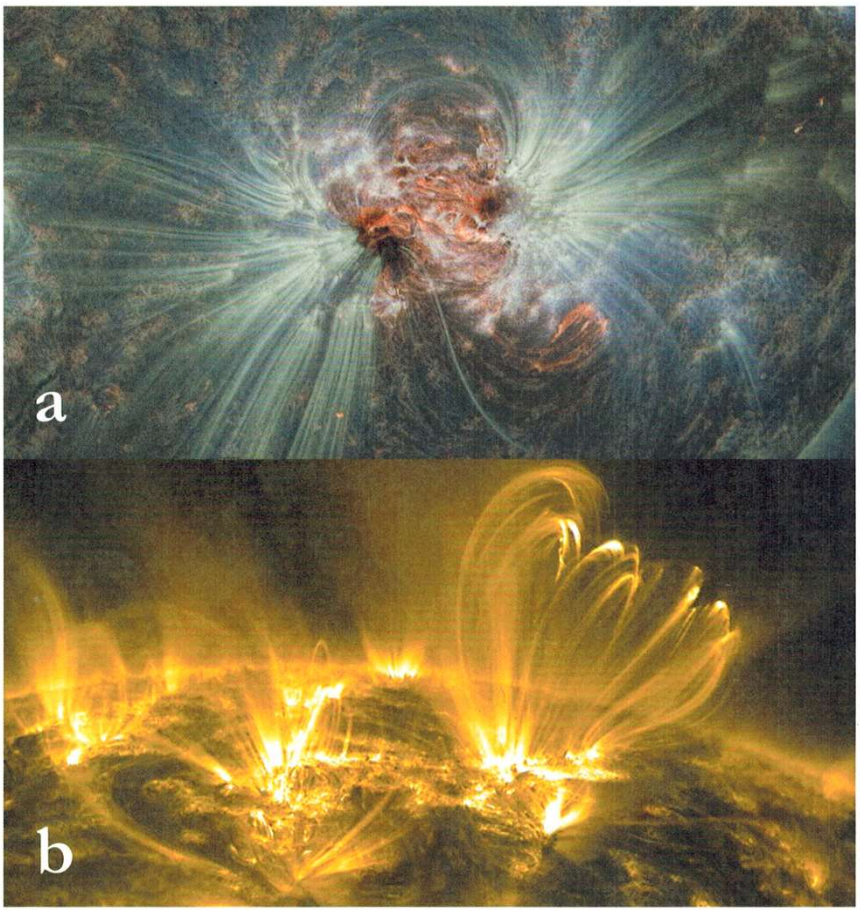
Basierend auf dem Idealbild einer harmonischen Welt, betrachteten Naturforscher in früheren Jahrhunderten die Sonne als eine homogene Gaskugel ohne spezielle Strukturen in ihrem Inneren und auf ihrer Oberfläche. Auch wenn sie dieses Idealbild anfangs teilweise dadurch retten wollten, dass sie die zu beobachtenden Sonnenflecken und Fackeln als Planeten oder Wolken über der Sonnenoberfläche interpretierten, so mussten sie doch schon in Zeiten von *William Herschel* sehr bald zugeben, dass diese Annahmen kaum mit der Wirklichkeit übereinstimmen konnten. Sonnenphysiker gehen heute gesichert davon aus, dass die Sonne eine rotierende Plasmakugel aus elektrisch sehr gut leitfähiger Materie mit komplexer chemischer Zusammensetzung ist. In deren Inneren und in der sie umgebenden Atmosphäre sind Materieströmungen und Magnetfelder sehr entscheidend für Ausprägung einer Vielzahl charakteristischer Strukturen sowie für deren dynamische Entwicklungen verantwortlich.

Bild 3 (2. Umschlagseite) zeigt hochaufgelöste Aufnahmen dunkler Sonnenflecken sowie hellerer Fackelgebiete in deren granular strukturierten Umgebungen und erklärt, warum der Beobachter, vor allem in der Nähe des Sonnenrandes, filigran strukturierte Aufhellungen in den magnetisch geprägten Aktivitätsgebieten sieht. **Bild 3a** veranschaulicht die typische Struktur eines Sonnenflecks mit seiner zentralen dunklen, großflächigen und von hellen Punkten durchsetzten Umbra sowie einer diesen umgebenden lamellenartigen Penumbra. Dieses charakteristische Erscheinungsbild erinnert ein wenig an den Blick von oben auf einen allzu lang benutzten Rasierpinsel, dessen Haarbündel im Zentralbereich zwar noch dicht stehen, im Randbereich aber sehr geneigt und ausgedünnt zur Seite weisen. Es sind die



3 Sonnenflecken und Fackelgebiete. **a** Die „First Light"-Aufnahme eines Sonnenflecks durch das 4 m Daniel K. Inouye Solar Telescope (DKIST) zeigt die Feinstrukturen dieses Flecks und der ihn umgebenden Granulationsmuster. **b** Aufnahme von Sonnenflecken und Fackelgebieten am Sonnenrand, die mit dem 1 m Swedish Solar Telescope (SST) erstellt wurde. **c** „First Light"-Aufnahme des DKIST, die die typische Verteilung von Fackeln in den Randgebieten der Granulen veranschaulicht. **d** Anhand einer graphischen Darstellung des Ergebnisses einer numerischen Simulation lässt sich erklären, dass der schräge, tiefere Einblick in eine dünne, relativ zur Umgebung kühle (4000 K) magnetische Flussröhre im Bereich von Fackelgebieten heißere (7000 K), hell erscheinende Bereiche erkennen lässt.
NSO/NSF/AURA; Institute for Solar Physics, Stockholm; NSO/NSF/AURA; M. Schüssler/U. v. Kusserow

- SciFri Archive: Solar Spotting https://www.youtube.com/watch?v=tWJeB7YOGSU
- DKIST first light high-resolution video of solar granules https://www.youtube.com/watch?v=tZpTJzVtKHw
- Watch a massive sunspot grow in spacecraft time-lapse https://www.youtube.com/watch?v=F5OgeKBIzEk



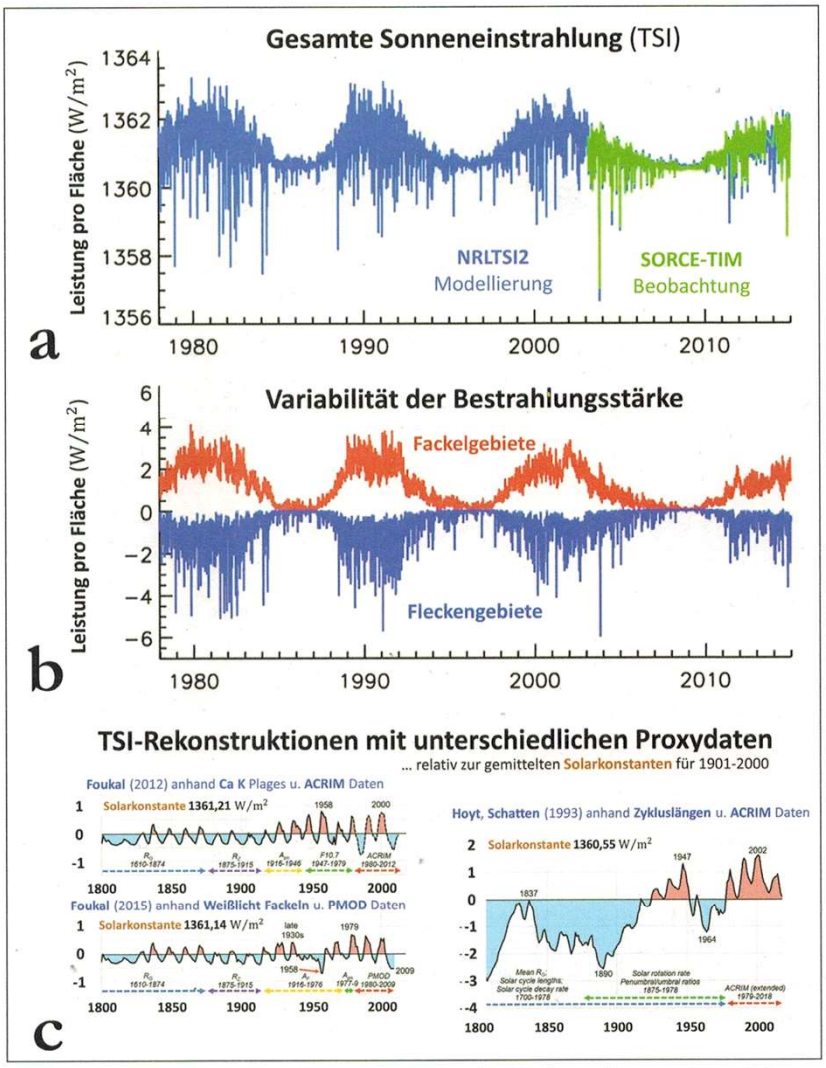
5 Bogenförmige Magnetfeldstrukturen über Sonnenfleckengruppen. **a** Freisetzung gespeicherter magnetischer Energien in intensiven Flare-Prozessen sowie Materietransport und Teilchenbeschleunigung entlang magnetischer Feldstrukturen oberhalb einer größeren Fleckengruppe. **b** Im ultravioletten Licht erstellte Profilansicht zeigt bogen- und schleifenförmige, mit aufgeheizter Plasmamaterie gefüllte Magnetfeldstrukturen in der Chromosphäre und Sonnenkorona oberhalb von Aktivitätsgebieten. *NASA/SDO (AIA 304 A, 171 A, 211 A und HMI), SDO/NASA*

- X3.1 flare, October 24, 2014 http://www.zam.fme.vutbr.cz/~druck/SDO/Pmnafe/2014_10_24/0-info.htm
- The Lovely Loops https://sdo.gsfc.nasa.gov/gallery/main/item/125

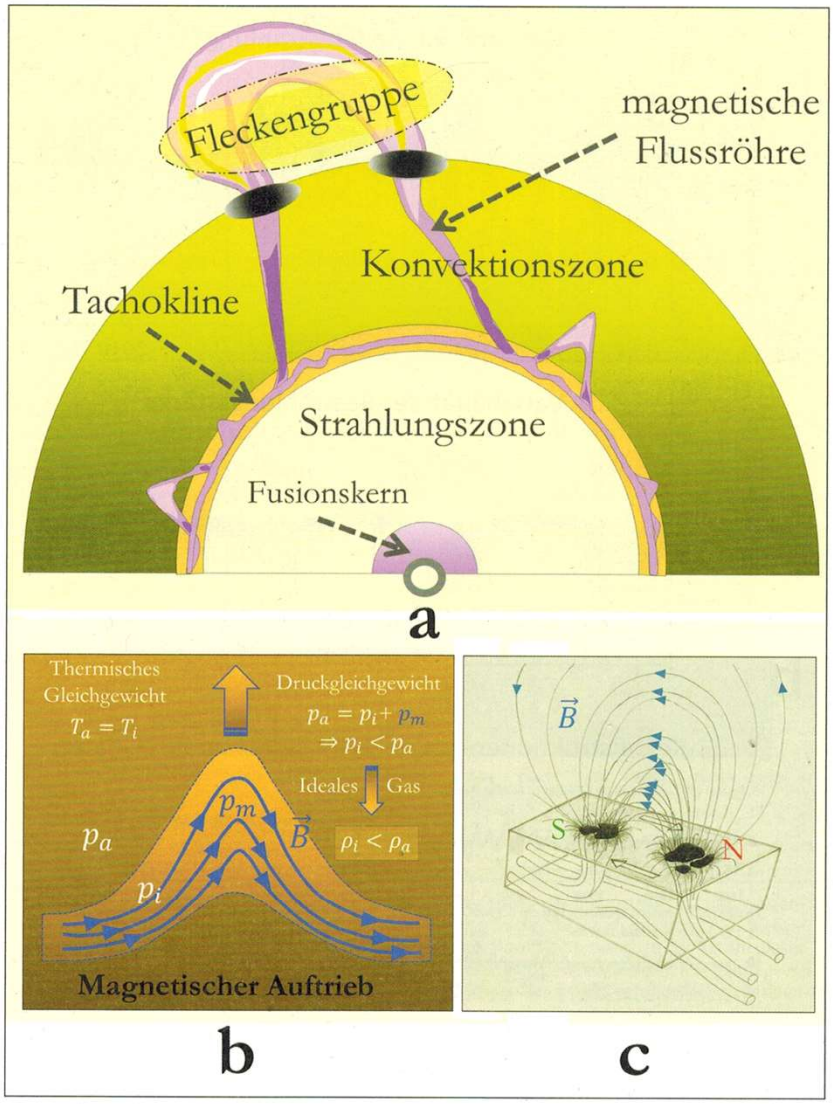
in einem Sonnenfleckbereich aus der Sonne mehr oder weniger eng gebündelt austretenden Magnetfeldlinien, die eine solche Analogbetrachtung ermöglichen (siehe dazu **Bild 5a** (2. Umschlagseite) und **Bild 6c**). **Bild 3b** zeigt Sonnenfleckengruppen am Sonnenrand, deren Formen dort durch den Wilson-Effekt verändert sind, wodurch der Beobachter den Eindruck gewinnt, dass er im Bereich der Fleckenumbra etwas tiefer in die Sonnenoberfläche hineinblickt.

Die granulare Struktur in der Umgebung dieser Flecken ist von Fackeln durchsetzt, deren längliche Feinstrukturen in **Bild 3c** deutlich zu erkennen sind. Sie durchsetzen die dunklen, sogenannten intergranularen Gassen der im Innern heller erscheinenden Konvektionszellen, in denen relativ heiße solare Plasmamaterie aufsteigt, und in deren Randbereichen diese abgekühlt wieder ins Sonneninnere absinkt. Während im Bereich der Sonnenfleckenumbra starke Magnetfelder großflächig gebündelt austreten, handelt es sich in Fackelgebieten im Vergleich dazu um sehr schmale magnetische Flussröhren. Magnetfelder behindern grundsätzlich den Zustrom von Wärmeenergie von außen, weshalb es im Bereich in Sonnenflecken um mehr als 1500 Grad kühler ist als in der umgebenden, etwa 5500°C heißen Photosphäre. Sonnenflecken erscheinen deshalb dunkler als ihre Umgebung. Man blickt hier tatsächlich tiefer in sie hinein, weil aufgrund der hier erfolgten Abkühlung Photonen auch aus tieferen Schichten bis ins Auge des Beobachters gelangen können. Bei schrägem Einblick in die besonders schmalen Magnetfeldstrukturen einer Fackel ermöglicht die Abkühlung in ihnen einen Durchblick in merklich heißere umgebende Gebiete (**Bild 3d**), wodurch die Fackeln als deutliche Aufhellungen im Vergleich zu den dunklen Sonnenflecken als auch zu deren granular strukturierter Umgebung erscheinen. [7]

Bild 4 veranschaulicht, wie sich die über alle Frequenzbereiche des elektromagnetischen Spektrums summierte Gesamteinstrahlung der Sonne in die Erdatmosphäre auffallend periodisch aufgrund der Verdunklung durch Sonnenflecken und der Aufhellungen im Bereich der Fackelgebiete ändert. In Bild **4a** ist die für den Zeitraum zwischen 1987 und 2015 ermittelte sogenannte Solarkonstante dargestellt, die im Rhythmus der Schwankungen des etwa 11-jährigen solaren Aktivitätszyklus variiert, und die für die Leistung pro Quadratmeter einen Mittelwert von etwa 1361 W/m² bei einer typischen Schwankungsbreite von etwa ± 1 W/m²aufweist. In Zeiten hoher Sonnenaktivität mit einer Vielzahl von Flecken und Fackeln ist die gesamte Sonneneinstrahlung auf die Erde, wie es *William Herschel* vermutet hatte, nachweislich etwas höher als in Zeiten niedriger Sonnenaktivität.



4 Zeitliche Veränderungen der Gesamtsonneneinstrahlung (Total Solar Irradiance, TSI). **a** Ermittlung der zwischen 1978 und 2015 periodisch, etwa im 11-Jahreszyklus um die Mittelwert S_0 = 1361 W/m2 schwankenden Solarkonstanten. Die Datengewinnung erfolgte durch Berechnungen mit Hilfe des empirischen Naval Research Laboratory Total Solar Irradiance (NRLTSI) Modells unter Berücksichtigung der Helligkeitsschwankungen durch helle Fackelgebiete und dunkle Sonnenflecken, seit 2023 zusätzlich und dabei weitgehend übereinstimmend durch direkte Messung der TSI mit Hilfe des Total Solar Irradiance Monitors (TIM) im Rahmen des Solar Radiation and Climate Experiments (SORCE-TIM) von Bord eines NASA-Satelliten. Die Abbildung **b** veranschaulicht die in der Summation dominierenden Bestrahlungszunahmen durch helle Fackelgebiete gegenüber den Bestrahlungsabnahmen aufgrund des Auftretens dunkler Fleckengebiete, wodurch die Solarkonstante in Zeiten starker (schwacher) Sonnenaktivität maximale (minimale) Werte annimmt, die im Zeitraum zwischen 1978 und 2015 um durchschnittlich etwa ± 1 W/m2 schwanken. Die beiden linken Graphiken von **c** zeigen, dass solche Schwankungsbreiten auch typisch für Zeiträume von 1800 und 1978 gewesen sein könnten, die anhand unterschiedlicher Proxydaten (Ca K Plages und Satellitendaten des Active Cavity Radiometer Irradiance Monitors (ACRIM) bzw. Weißlicht-Fackeln und Daten des Physikalisch-Meteorologische Observatoriums Davos (PMOD)) ermittelt wurden. Werden demgegenüber (rechte Teilabbildung) die ACRIM-Daten mit den Erkenntnissen über die variierende Stärke der Leuchtkraft der Sonne in Abhängigkeit von der zeitlichen Länge des solaren Aktivitätszyklus kombiniert, dann könnten die Schwankungen der TSI für den Zeitraum von 1800 bis 2000 zwischen +2 W/m2 und –3 W/m2 deutlich größer ausgefallen sein. G. Kopp et al.; R. Connolly et al.



6 Anschauliche Modellvorstellungen zur Entstehung von Sonnenfleckengruppen. **a** In der als Tachokline bezeichneten Grenzschicht zwischen der Strahlungs- und Konvektionszone der durch Fusionsprozesse im Zentralbereich geheizten Sonne gelagerte magnetische Flussröhren steigen nach einsetzenden Instabilitäten seeschlangengleich durch die Konvektionszone auf. Dort, wo sie die Sonnenoberfläche in der Photosphäre durchstoßen, können dunkle Sonnenfleckenpaare entstehen. **b** Der Aufstieg einer magnetischen Flussröhre erfolgt aufgrund des in ihrem Inneren existierenden magnetischen Drucks p_m bei unterstelltem Druckgleichgewicht $p_a = p_i + p_m$ zwischen dem Außen- und Innenbereich dieser Flussröhre durch sogenannten magnetischen Auftrieb. Der Gasdruck p_i im Inneren ist danach wegen $pi < pa$ kleiner als der Gasdruck p_a im angenommen feldfreien Außenbereich, so dass im thermischen Temperatur-Gleichgewicht *(Ta = Ti)* für ideale Gase auch $p_i < p_a$ für die jeweiligen Materiedichten gelten muss, wodurch ein magnetisch vermittelte Auftrieb der Flussröhre ermöglicht wird. Abbildung **c** veranschaulicht die Aufweitung einer magnetischen Flussröhre beim Aufstieg durch die nach außen dünner werdende Konvektionszone sowie in die Sonnenatmosphäre über den Fleckengebieten unter der Einwirkung des zunehmend dominierenden Einflusses des magnetischen Drucks. Da Magnetfelder den Wärmezustrom von außen grundsätzlich effektiv behindern, bleiben die Durchstoßregionen dieser Felder durch die Sonnenoberfläche deutlich kühler. Sie lassen sich dadurch als relativ dunkle Sonnenfleckenpaare mit magnetischer Nord- (N) bzw. Südpolarität (S) in der wärmeren und so heller erscheinenden Fleckenumgebung beobachten.
• Formation and Evolution of Magnetic Sunspot Groups https://www.youtube.com/watch?v=3A79qeHHmUI

In **Bild 4b** ist zu erkennen, dass Sonnenflecken, wie es zu erwarten war, die Leuchtkraft der Sonne zwar schwächen, dass die damit einhergehende Zunahme der Fackelgebiete aber zu Aufhellungen führen, die diese Reduzierung mehr als kompensieren. Rekonstruktionen der Totalen Sonnen-Intensität (TSI) über vergangene Zeiträume (**Bild 4c**), die mithilfe unterschiedlicher Methoden erfolgten, lassen zwar erkennen, dass die Schwankungen in den vergangenen Jahrzehnten vermutlich kaum größer als ± 2 W/m² ausfielen. Aufgrund fehlender verlässlicher Daten für die Entwicklung in noch früheren Zeiten kann jedoch nicht mit Sicherheit davon ausgegangen werden, dass die Schwankungen der TSI im Verlaufe der Sonnenfleckenzyklen schon immer so klein waren, dass deren Einfluss auf das Erdklima wirklich nur recht gering ist. ([8], [9], [10])

Die Strukturen chromosphärischer, koronaler sowie in der dazwischen liegenden Transitregion existierender Magnetfelder können oberhalb von Sonnenflecken (**Bild 5a**) und größeren Aktivitätsgebieten (**Bild 5b**) im ultravioletten Licht abgebildet werden. Auch wenn Magnetfelder für uns Menschen nicht direkt sichtbar sind, so lässt sich deren topologischer Verlauf anhand der Ausstrahlung hochionisierter Atome, die sich unter Einfluss der magnetischen Lorentzkraft auf Spiralbahnen um die Magnetfeldlinien bewegen, doch relativ gut nachzeichnen.

Als Folge der als „magnetische Rekonnexion" bezeichneten Neuverbindungsprozesse solarer Magnetfeldstrukturen können im Umfeld der Flecken oder im Bereich magnetisch gestützter, als Protuberanzen bezeichneter solarer Gaswolken große Mengen an gespeicherter magnetischer Energie und von Plasmamaterie mehr oder weniger explosionsartig freigesetzt werden. In sogenannten Flare-Prozessen erfolgt blitzartig die Aussendung hochenergetischer UV-, Röntgen- oder teilweise sogar Gammastrahlung sowie dabei stark beschleunigter solarer Partikel. Bei instabil werdenden hochenergetischen Protuberanzen können gewaltige koronale Masseauswürfe weit hinaus in den Interplanetaren Raum auch in das durch eine Magnetosphäre geschützte Erdsystem erfolgen. ([7], [11])

Zusammen mit langsamen und schnellen, zeitlich variierend unterschiedlich starken Sonnenwindkomponenten, die aus unterschiedlichen Gebieten in der Sonnenatmosphäre abströmen, können all diese Prozesse deutlichen Einfluss auf das Erdklima nehmen. In Zeiten hoher Sonnenaktivität sorgen zudem stärkere heliosphärische Magnetfelder im gesamten Sonnensystem dafür, dass der Zustrom hochenenergetischer kosmischer Strahlung aus dem fernen Universum, der ebenfalls klimarelevanten Einfluss auf

das Erdsystem nehmen kann, um bis zu 20 % reduziert wird. Neben der Gesamtsonneneinstrahlung TSI müssen auch die variierenden Einflüsse des Sonnenwindes und des Weltraumwetters auf das Erdklima, die Variationen sowohl der hochenergetischen elektromagnetischen als auch die der solaren und kosmischen Teilchenstrahlung gründlicher erforscht und angemessen berücksichtig werden.

Zyklus-Name	Zyklus-Periodenlänge
Schwabe-Zyklus	ca. 11 Jahre
Hale-Zyklus	ca. 22 Jahre
Gleißberg-Zyklus	70–100 Jahre
Suess-de-Vries-Zyklus	210–235 Jahre
Bray-Hallstatt-Zyklus	vermutlich ca. 2400 Jahre

Tabelle 1 Namen und Periodenlängen der solare Aktivitätszyklen

Zur Entstehung solarer Magnetfelder in Dynamoprozessen

Fusionsprozesse im Zentralbereich der Sonne stellen die Energiequelle für die Speisung der Leuchtkraft der rotierenden Sonne, für die Bewegung turbulent verwirbelter Plasmamaterie und die Erzeugung der solaren Magnetfelder dar (siehe im Folgenden **Bild 6a**). Während der Energietransport in der angrenzenden, starr rotierenden Strahlungszone, auf relativ langen Zeitskalen von vermutlich mehr als 150.000 Jahren durch Absorption und Reemission von Photonen erfolgt, so gelingt dies durch die Konvektionszone in den äußeren 30 % des Sonneninneren demgegenüber vermutlich innerhalb nur etwa eines Monats. Das heiße Plasma wird hier aufgrund großer Temperatur- und Dichtegradienten effektiv in Konvektionsrollen unterschiedlicher Abmessungen transportiert. Warme Materie steigt auf und sinkt in den Rändern der Konvektionszellen abgekühlt wieder zurück.

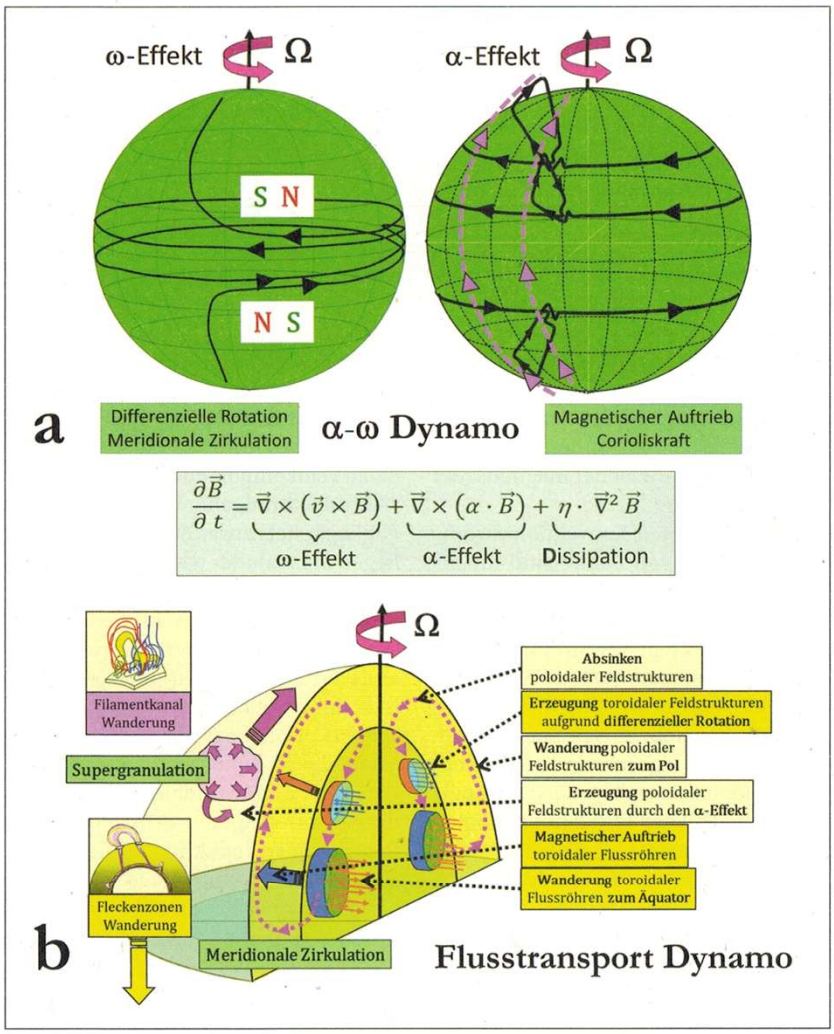
Nach den seit mehr als 70 Jahren weitgehend akzeptierten Dynamotheorien für die Entstehung der solaren Magnetfelder werden die durch magnetische Induktionsprozesse erzeugten magnetischen Flussröhren in der Tachokline, der Grenzzone zwischen der Strahlungs- und Konvektionszone, über Zeiträume von mehreren Jahren relativ stabil gelagert und äquatorwärts transportiert. Aus der Konvektionszone sporadisch eindringende „überschießende" Plasmaballen können die nach dem amerikanischen Plasma- und Sonnenphysiker *Eugene N. Parker* (1927–2022) benannte Instabilität auslösen, die den seeschlangenähnlichen Aufstieg magnetischer Flussröhren durch die Konvektionszone ermöglicht. Im Text zu **Bild 6b** wird eine einfache Erklärung für diesen magnetisch vermittelten Auftrieb vorgestellt. Dort, wo die aufsteigenden und sich aufweitenden magnetischen Flussröhren die Sonnenoberfläche durchstoßen, entstehen in der Regel Paare von Sonnenflecken mit jeweils unterschiedlicher magnetischer Polarität (**Bild 6c**). [12]

Die turbulenten Konvektionsströme in der rotierenden Sonne sind für die Ausbildung der sogenannten Differentiellen Rotation sowie der Meridionalen Zirkulation als typische Strömungsmuster der Plasmamaterie in der Konvektionszone verantwortlich. Differentielle Rotation bezeichnet den Sachverhalt, dass die Winkelgeschwindigkeit einer rotierenden Plasmakugel ortsabhängig ist, wie im Fall der Sonne mit der heliographischen Breite und dem Abstand von der Sonnenoberfläche deutlich variiert, dabei vom Pol zum Äquator stark zunimmt. Meridionale Zirkulation benennt eine ebenfalls nachgewiesene Kreislaufströmung der Materie, die nahe der Sonnenoberfläche parallel zum Längenkreis vom Äquator zum Pol orientiert ist, dort bis nahe an die Tachokline absinkt, parallel zu dieser äquatorwärts strömt, dort wieder aufsteigt und so den Materiekreislauf schließt.

In **Bild 7** werden die Funktionsprinzipien heute verwendeter Dynamomodelle anschaulich vereinfacht vorgestellt, mit Hilfe derer die theoretischen Sonnenphysiker die periodisch erfolgende Regeneration und Umpolung solarer Magnetfelder plausibel erklären möchten. Wie der Text zu **Bild 7a** für das sogenannte α-ω-Dynamomodell beschreibt, sorgt die Differentielle Rotation im Rahmen des ω-Induktionseffekts (linke Bildseite) für die azimutale Aufwicklung ursprünglich polwärts gerichteter „poloidaler" Magnetfeldkomponenten. Instabilitäten und magnetischer Auftrieb können dann für den Aufstieg dieser, als „toroidal" bezeichneten Feldkomponenten, für deren Durchbruch durch die Sonnenoberfläche und die Entstehung von Fleckenpaaren mit unterschiedlicher Polaritätsverteilung in den beiden Hemisphären sorgen. Aus der Abbildung ist zu ersehen, dass aufgrund der schrägen Aufwicklung dieser toroidalen Feldkomponente der in Rotationsrichtung vorangehende Fleck breitenabhängig stets etwas näher zum Äquator liegen muss als der nachfolgende Fleck. ([7], Kap. 3)

Aufgrund der Konvektionsströmungen, des magnetischen Auftriebs oder anderer Instabilitäten unter dem Einfluss der in rotierenden Systemen wirksamen Corioliskraft können die in unterschiedlichen heliographischen Breiten entstandenen toroidalen Feldkomponenten aufsteigen, verformt und im Rahmen des α-Induktionseffekts wieder in einzelne lokale poloidale Feldkomponenten zurückverwandelt werden, die überlagert globale poloidale Feldkomponenten regenerieren (rechte Bildseite). Ausgehend von einem kleinen magnetischen Saatfeld lässt sich mit Hilfe der unter Bild 7a notierten, relativ einfachen Induktionsgleichung die zeitliche und räumliche Entwicklung solarer Magnetfelder rechnerisch ermitteln und erklären, wie Bewegungsenergie in der Sonne effektiv in magnetische Energie umgewandelt werden kann.

Anhand der in Bild **7b** dargestellten Wirkungsweise des Flusstransport-Dynamomodells (**Bild 7b**), bei dem die Meridionale Zirkulation ergänzend eine zentrale Rolle spielt, lassen sich die aufeinander folgenden Entwicklungsschritte, der Transport, die wechselseitige Umwandlung poloidaler und toroidaler Magnetfeldkomponenten ineinander sowie darüber hinaus auch die Umpolung solarer Magnetfelder im Verlaufe des magnetischen Aktivitätszyklusses veranschaulichen. Die Meridionale Zirkulation sorgt dafür, dass die Aktivitätsgebiete mit Sonnenflecken im Laufe des Fleckenzyklus zunehmend näher am Äquator entstehen, weil die in der Tachokline gespeicherten ma-



7 Erzeugung und Entwicklung solarer Magnetfelder durch Dynamoprozesse. **a** Nach dem α-ω-Dynamomodell lässt sich die zeitliche ($\partial .../\partial t$) und räumliche ($\vec{\nabla} .../= \partial .../\partial x, \partial .../\partial y, \partial .../\partial z$) Entwicklung magnetischer Vektorfelder $\vec{B}$, die sich weitgehend wie eingefroren mit der elektrisch sehr gut leitfähigen Plasmamaterie mitbewegen oder mit der magnetischen Diffusivität $\mu = 1/(\mu_0 \cdot \sigma)$ mit μ_0 als magnetischer Feldkonstante und σ als elektrischer Leitfähigkeit dissipieren, mit Hilfe der Induktionsgleichung $\partial B .../\partial t = \vec{\nabla} \times$ für unterschiedliche Geschwindigkeitsfelder $\vec{v}$ und einwirkende Kräfte ermitteln. Aufgrund Differentieller Rotation mit ortsabhängiger Winkelgeschwindigkeit ermöglicht der als ω-Effekt benannte Mechanismus, dass poloidale, in meridionaler Ebene in Polrichtung verlaufende Felder in toroidale, in azimutaler Richtung aufgewickelte und verdichtete Magnetfeldkomponenten umgewandelt werden (links im Bild). Wenn diese durch magnetischen Auftrieb aufsteigen und durch die Sonnenoberfläche stoßen, erzeugen sie hier die Sonnenflecken (Bild 6). Mit Hilfe des sogenannten α-Effekts beispielsweise durch helikale Verformungen aufsteigender Feldkomponenten unter Einfluss der Corioliskraft kann umgekehrt die Regeneration poloidaler aus toroidalen Feldstrukturen erfolgen (rechts im Bild). Dies ermöglicht insgesamt einen in sich geschlossenen zyklisch verlaufenden Dynamoprozess zur Erzeugung magnetischer Feldenergien aus kinetischer Bewegungsenergie. **b** Die Entstehung der Sonnenflecken durch magnetischen Auftrieb, der zyklische Prozess der wechselseitigen Umwandlung poloidaler und toroidaler Magnetfelder ineinander, der etwa 11-jährige Aktivitätszyklus der Sonne sowie die im jeweils nachfolgenden Zyklus erfolgende vollständige Umwandlung aller magnetischen Polaritäten lassen sich auch im Rahmen des Flusstransport-Dynamomodells, bei dem die nachgewiesene Existenz einer Meridionalen Zirkulation in der Konvektionszone sowie die Ausbreitung supergranulare Konvektionszellen eine zentrale Rolle spielen, plausibel erklären.
• Functional Principle of the Alpha-Omega Dynamo https://www.youtube.com/watch?v=jIKONnZb5Fo

gnetischen Flussröhren, die im Laufe der Zeit aufgrund zunehmender magnetischer Flussdichte schließlich aufsteigen, äquatorwärts wandern. Demgegenüber wandern die sogenannten Filamentkanäle der Protuberanzen in der Sonnenatmosphäre sowie die sich ausdehnenden supergranularen Strukturen in der Photosphäre mit dominierender magnetischer Polarität der im Umfeld nachfolgenden, näher zum Pol gelegene Flecken einer Fleckengruppe aufgrund der Meridionalen Zirkulation im Laufe der Zeit polwärts. Dadurch wandelt sich die anfangs vorherrschende magnetische Polarität in den Polgebieten im Laufe von etwa 11 Jahren in die entgegengesetzte Polarität um.

Zur Vielfalt solarer Fleckenzyklen

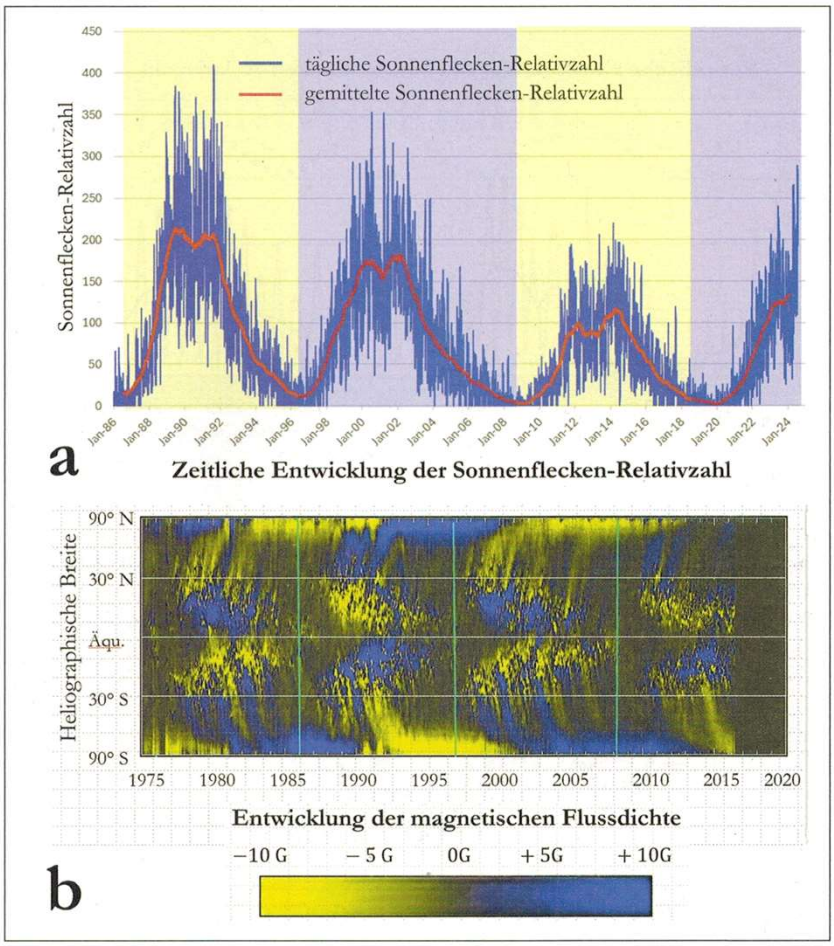
Wie **Bild 8a** für den Zeitraum zwischen 1986 und 2024 veranschaulicht, variiert die Sonnenflecken-Relativzahl weitgehend periodisch mit einer im Mittel rund 11-jährigen Zykluslänge zwischen aufeinander folgenden Maxima dieser Maßzahl für die Stärke der Sonnenaktivität. Sie ergibt sich als Summe der Anzahl aller auf der Sonnenscheibe gerade sichtbaren Flecken plus der mit 10 multiplizierten Anzahl der Fleckengruppen, wobei Einzelflecken vereinbarungsgemäß stets auch als Gruppe gezählt werden. Die mit unterschiedlichen Teleskopen gewonnenen, hinsichtlich ihres unterschiedlichen Auflösungsvermögens gewichteten Daten werden aktuell am *Royal Observatory of Belgium* in Brüssel gesammelt, ausgewertet und veröffentlicht. Es war der deutsche Astronom *Samuel Heinrich Schwabe* (1789–1875), der 1843 die im Mittel elfjährige, zwischen 9 und 14 Jahren variierende Sonnenfleckenperiodizität entdeckte, auch wenn er selbst anfangs eher von einer 10-jährigen Periodenlänge ausging,

Anhand von **Bild 8b** lässt sich die zeitliche Entwicklung der in unterschiedlichen heliographischen Breiten auf der Sonnenoberfläche jeweils dominierenden magnetischen Polaritäten zwischen 1975 und 2016 ablesen. Während Fleckengebiete mit starker magnetischer Polarität im Laufe des 11-jährigen solaren Aktivitätszyklusses äquatorwärts wandern, bewegen sich die Gebiete mit entgegengesetzter Polarität, in denen verstärkt auch Protuberanzen auftreten, im Vergleich dazu schneller polwärts, was schließlich zur Umwandlung der magnetischen Polarität in den Polgebieten führt (siehe Bild 7b). Deutlich ist in der Abbildung 8b zu erkennen, dass sich alle solaren Polaritäten nach jeweils etwa 11 Jahren umgepolt haben. Weil der amerikanische Astronom *George Ellery Hale* (1868–1938) im Jahre 1908 entdeckt hatte, dass die Sonnenflecken Orte starker Magnetfelder sind, wurde der 22-jährige magnetische Fleckenzyklus später nach ihm benannt.

In **Bild 9a** lässt sich die Entwicklung der Sonnenflecken-Relativzahl als ein wichtiges Maß für die Stärke der Sonnenfleckenaktivität und des Magnetflusses durch die Sonnenoberfläche über einen längeren Zeitraum von 1600 bis 2003 ablesen. Dabei fällt zum einen auf, dass die Anzahl der Sonnenflecken zwischen 1645 und 1715 in dem nach seinem Entdecker benannten Maunder-Minimum so klein ausfiel, dass man die Periode der typischerweise 11-jährigen Schwankungen der Sonnenfleckenrelativzahl für diesen Zeitraum kaum identifizieren kann. Dieses extreme Minimum der Sonnenaktivität fällt in den kältesten Zeitabschnitt der sogenannten „Kleinen Eiszeit" von etwa 1500 bis 1850, in dem verstärkt kalte und langandauernde Winter sowie niederschlagsreiche und kühle Sommer nicht nur auf der Nordhalbkugel auftraten. Insbesondere auch in diesem Zusammenhang wird aktuell weiterhin erforscht, inwieweit grundsätzlich ein engerer Zusammenhang zwischen der Stärke der Sonnenaktivität und der Ausprägung des Erdklimas besteht.

Das nicht so starke Minimum von 1790 bis 1830 wird nach seinem Entdecker als Dalton-Minimum bezeichnet. Mittelt man die Sonnenflecken-Relativzahlen über einen längeren Zeitraum von 30 Jahren, so erkennt man in Bild 9a eine überlagerte Periodizität von 85 ± 15 Jahren, die, 1862 bereits erstmals identifiziert, heute nach dem deutschen Astronomen *Wolfgang Gleißberg* (1903–1996) benannt, als Gleissberg-Zyklus bezeichnet wird. Die Eigenschaften des Sonnenfleckenzyklus sind darüber hinaus offensichtlich noch deutlich komplexer als früher angenommen. In der **Tabelle 1** sind die Namen und Periodenlängen aller möglichen Aktivitätszyklen der Sonne aufgelistet, deren Bedeutung aktuell auch hinsichtlich ihrer vermuteten Einflusses auf das Erdklima intensiv diskutiert wird. [13]

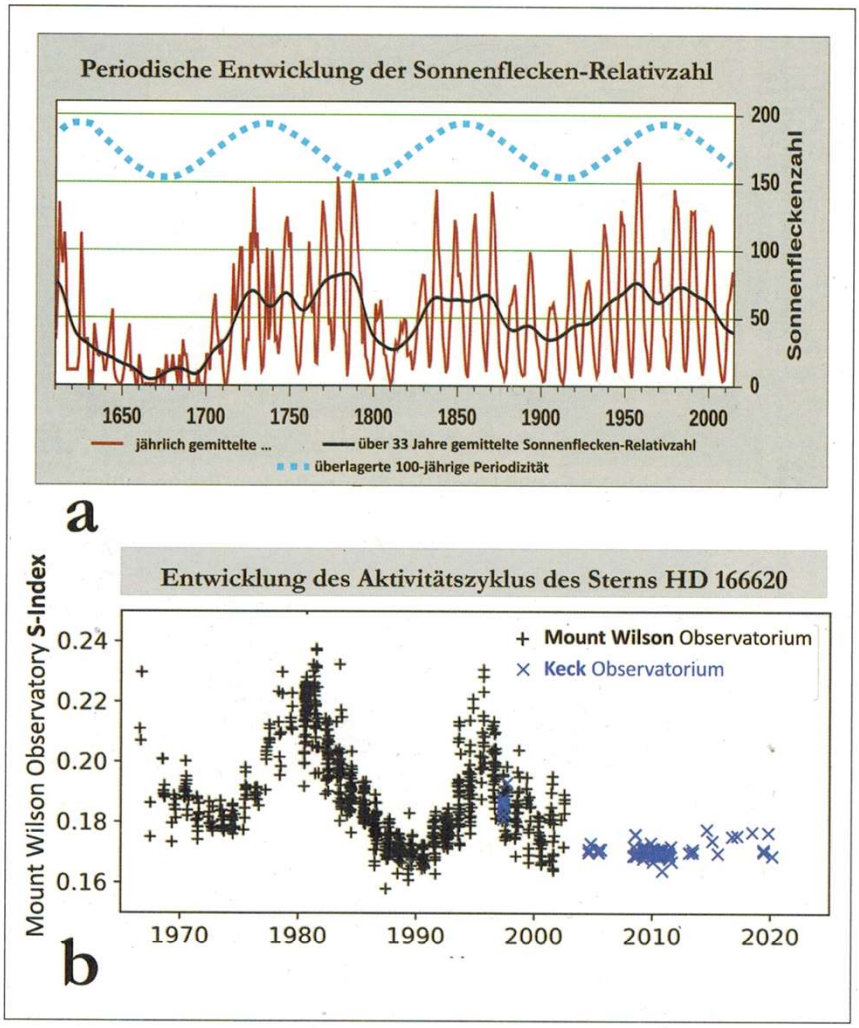
Auch andere sonnenähnliche Sterne besitzen nachweislich mehr oder weniger periodische stellare Aktivitätszyklen, deren Periodenlänge und charakteristische Ausprägung durch die zeitliche Entwicklung des durch die Sternoberfläche aufsteigenden magnetischen Flusses sowie durch die Anzahl und Größe der Sternflecken bestimmt sind. **Bild 9b** veranschaulicht die Entwicklung des Aktivitätszyklus des Sterns HD 166620, die sich anhand der variablen Emission der Kalziumlinien Ca II H und K im nahen UV-Bereich verfolgen lässt. Bis zum Jahre 2000 erfolgte die Entwicklung des stellaren Aktivitätszyklus mit einer Periodenlänge von etwa 15 Jahren periodisch. Danach begann offensichtlich ein langzeitiges Aktivitätsminimum wie im Fall der Sonne während des Maunder-Minimums. [14]



8 Periodische Entwicklungen der Aktivitäten magnetischer Sonnenflecken im Verlauf des gemittelt 11-jährigen solaren Zyklus. **a** Entwicklung der Sonnenflecken-Relativzahl in den vergangenen vier Aktivitätszyklen. **b** Darstellung der auffallend breitenabhängigen zeitlichen Entwicklung der dominierenden magnetischen Polaritäten im Zeitraum von 1975 bis 2016 mit systematischen Umpolungen sowohl in den äquatornäheren, durch das Auftreten von Sonnenflecken und Fackeln charakterisierten Aktivitätsgebieten als auch in den Polgebieten der Sonne.
Solar Influences Data Analysis Center/Royal Observatory of Belgium; D. H. Hathaway/NASA • Sunspots and Solar Activity PLUMMET. What's Happening? https://www.youtube.com/watch?v=FTPVCaOSkoE

Natürlich stellt sich nicht nur im Fall der 11-jährigen Schwabe- und des 22-jährigen magnetischen Hale-Zyklen der Sonne generell die Frage, wer der Taktgeber für derart prägnante periodische Aktivitätszyklen der Sonne sein könnte. Lange Zeit war es unumstritten, dass dies an der speziellen Rotationsgeschwindigkeit der Sonne, der Masse und Zusammensetzung der Sonne, den speziellen Eigenschaften der leitfähigen Materie sowie an den Strömungsverhältnissen des Plasmas im Sonneninneren liegen müsste. Dass dies aber auch möglicherweise durch die sich regelmäßig verändernden Planetenkonstellationen, die dabei erfolgende Übertragung von Drehimpuls auf der Sonne auf rosettenartigen Orbits um das Baryzentrum, den gravitativen Schwerpunkt des Sonnensystems, fremdgesteuert von außen erfolgen könnte, darüber gab es allerdings schon immer Spekulationen. ([15], [16])

Die Ergebnisse neuartiger Modellrechnungen, die im 3. Teil dieser Serie ausführlicher im Zusammenhang auch mit dem Einfluss des Weltraumwetters auf das Erdklima diskutiert werden sollen ([7], Kap. 10), lassen vermuten, dass es tatsächlich die Anziehungskräfte der



9 Stellare Aktivitätszyklen. **a** Anhand der Darstellung der zeitlichen Entwicklung der Sonnenflecken-Relativzahl lässt sich erkennen, dass der bekannten 11-jährigen Periode eine etwa 100-jährige Periode der Schwankungen der Aktivitätsmaxima überlagert ist, dass es von 1650 bis 1700 ein besonders prägnantes Minimum der Sonnenaktivität gab. **b** Periodische Entwicklung des Aktivitätszyklus des sonnenähnlichen Sterns HD 166620 mit einer Zykluslänge von etwa 15 Jahren und einem etwa 2005 begonnenen aktuellen Aktivitätsminimum, das sich anhand der Vermessung der Kalzium II KH Linienkernintensität am Mount Wilson und Keck Observatorium nachweisen lässt. *Wikimedia Commons*/U. v. Kusserow; S. V. Jeffers et al/K. Oláh et al. 2016/A. C. Baum et al. *2022*

Planeten sein könnten, die durch sensiblen Einfluss auf die in der Tachokline ablaufenden magnetischen Prozesse die Taktung der sich überlagernden solaren Aktivitätszyklen beeinflussen. Wie im Fall der durch wechselnde Planetenkonstellationen bestimmten Milankovitch-Zyklen, die die periodischen Veränderungen der Neigung und Präzession der Erdachse sowie der Elliptizität der Erdbahn beschreiben, wodurch das Erdklima im aktuellen Eiszeitalter regelmäßig wechselweise zwischen Kalt- und Warmzeiten wechselt, so könnte die externe Taktung der Sonnenaktivität ebenfalls durch Planeten klimarelevanten Einfluss auf das Erdsystem nehmen.

Im 2. Teil dieser Artikelserie wird ein größerer Überblick über die Vielzahl natürlicher, systemimmanenter und durch den Menschen verursachter Klimafaktoren gegeben. Es werden die Folgen der Energieeinstrahlungs-, Wärmetransport- und Speicherprozesse in den unterschiedlichen Atmosphärenschichten bzw. Ozeanströmungen auf das Erdsystem und der komplexen, nicht-linearen Rückkopplungsprozesse in den unterschiedlichen Energie- und Stoffkreisläufen analysiert, die in der Vergangenheit bereits entscheidenden Einfluss auf Veränderungen des Erdklimas genommen haben und auch in Zukunft, vermutlich nur schwer vorhersehbar, nehmen könnten.

Literatur:

[1] Vinós J.: Lösung des Klima-Puzzles – Die überraschende Rolle der Sonne. Critical Science Press, 2024

[2] Pustilnik, L. A., Din, G. Y.: Influence of solar activity on the state of the wheat market in medieval Europe. Solar Physics 223(1), 2004 https://www.researchgate.net/publication/227290513_Influence_of_solar_activity_on_the_state_of_the_wheat_market_in_medieval_Europe

[3] Love, J. J.: On the insignificance of Herschel's sunspot correlation. Geophysical Research Letters, August 2013 https://www.researchgate.net/publication/260330222_On_the_insignificance_of_Herschel's_sunspot_correlation

[4] Herschel, W.: On the nature and construction of the Sun and fixed stars. From the Philosophical transactions. 1795 https://archive.org/details/bim_eighteenth-century_on-the-nature-and-constr_herschel-sir-william_1795/page/n1/mode/2up

[5] Herschel, W.: Observations Tending to Investigate the Nature of the Sun, in Order to Find the Causes or Symptoms of Its Variable Emission of Light and Heat; With Remarks on the Use That May Possibly Be Drawn from Solar Observations. Royal Society of London, 1801 https://archive.org/details/philtrans09949192/page/n39/mode/2up

[6] Kawaler S., Veverka, J. The habitable Sun: One of William Herschel´s stranger ideas. J. Roy. Astron. Can., Vol.75, No.1, 1981 https://adsabs.harvard.edu/full/1981JRASC..75...46K

[7] von Kusserow, U., Marsch, E.: Magnetisches Sonnensystem – Solare Eruptionen, Sonnenwinde und das Weltraumwetter. Springer-Verlag GmbH Deutschland, 2023 https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-65401-9

[8] Sheehan, W., Lockwood, G. W.: Seeking an inconstant constant: The quest to discover the variability of the Sun from William Herschel to Andrew Ellicott. Journal of Astronomical History and Heritage , Volume 23, Issue 1, 2020 https://www.sciengine.com/JAHH/doi/10.3724/SP.J.1440-2807.2020.01.04

[9] Kopp R. et al.: The Impact of the Revised Sunspot Record on Solar Irradiance Reconstructions. Solar Physics 291(9-10), 2016 https://arxiv.org/abs/1601.05397

[10] Connolly R. et al.: How much has the Sun influenced Northern Hemisphere temperature trends? An ongoing debate. RAA 2021 Vol. 21 No. 6, 2021 https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1674-4527/21/6/131/pdf

[11] von Kusserow, U.: Die aktive Sonne, Kometen und Polarlichter – Unter magnetischem Einfluss. Astronomie + Raumfahrt im Unterricht 197, 2025 https://ulrich-von-kusserow.de/images/Beitraege/Artikel/Die%20aktive%20Sonnem%20Kometen%20und%20Polarlichter.pdf

[12] Arnab Rai Choudhuri, A. R.: Nature's Third Cycle: A Story of Sunspots. Oxford University Press, Oxford, 2015 https://de.scribd.com/document/522728306/Arnab-Rai-Choudhuri-Nature-s-Third-Cycle-A-Story-of-Sunspots

[13] Stefani, F. et al.: Schwabe, Gleissberg, Suess-de Vries: Towards a consistent model of planetary synchronization of solar cycle s. Magnetohydrodynamics Vol. 40, 2004 https://arxiv.org/pdf/1910.10383

[14] Jeffers, S. V., Kiefer, Metcalfe, T. S.: Stellar Activity Cycles. Space Sci Rev 219, 54, 2023 https://link.springer.com/article/10.1007/s11214-023-01000-x#Fig4

[15] Abreu, I. A. et al.: Is there a planetary influence on solar activity? A&A 548, A88, 2012 https://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2012/12/aa19997-12.pdf

[16] idw - Informationsdienst Wissenschaft: Die Taktgeber der Sonne. 2021 https://dds.sciengine.com/cfs/files/pdfs/view/1440-2807/C00BA301AC-654C2187A19DDF70930EC8.pdf

Ulrich von Kusserow
Besselstraße 32–34
28203 Bremen
E-Mail: uvkusserow@t-online.de