

Sonnenflecken und das Erdklima (3)

Wärmetransport und der Weltraumwettereinfluss

von Ulrich von Kusserow

Auf ganz unterschiedlichen Raum- und Zeitskalen wird die Entwicklung des Erdklimas durch eine Vielzahl miteinander interagierender, in häufig nichtlinearer Weise rückgekoppelt Einfluss nehmender natürlicher und anthropogener Prozesse bestimmt. Neben den aufgrund der Sonneneinstrahlung vor allem vertikal durch die Troposphäre und Stratosphäre hindurch wirksamen Strahlungsprozessen, für die der Treibhauseffekt, Wolkenbildungsprozesse, die Erdalbedo sowie die Ozonschichtentwicklung eine wichtige Rolle spielen, darf der Einfluss ozeanischer und atmosphärischer Transportprozesse zwischen dem Erdäquator und den Polgebieten nicht vergessen werden. Darüber hinaus stellt sich die Frage, inwieweit nicht auch das durch die Sonne, durch den von ihr ausgehenden Sonnenwind sowie weitere Prozesse im entfernteren Universum bestimmte Weltraumwetter insbesondere auch auf längeren Zeitskalen bedeutsamen Klimaeinfluss nehmen kann. Steuern möglicherweise sogar planetare Gezeitenkräfte die Magnetfelderzeugung durch den Sonnendynamo, die Entwicklung der Sonnenfleckenzyklen und damit auch des Erdklimas?

In dieser Artikelserie kann natürlich nur ein begrenzter Überblick über die Vielzahl der Klimaphänomene und möglichen Klimaeinflussfaktoren im Erdsystem gegeben werden. Längst nicht alle möglichen dafür relevanten Prozesse, die darin auf unterschiedlichen Raum- und Zeitskalen in häufig sehr komplexer Weise miteinander wechselwirken, können hier im Detail beschrieben werden. In den aktuell häufiger allzu heftig und unfair geführten Debatten wird darüber gestritten, welcher der Einflussfaktoren denn wohl der dominierende sein könnte. Meine persönliche Antwort auf die in diesem Zusammenhang oft gestellte Frage ist für manche sicherlich sehr unbefriedigend. Ich weiß es nicht wirklich genau, wer weiß es denn? ([37], [38])

Eine genaue Erklärung der so komplexen, vielfältigen Zusammenhänge im Rahmen der Klimaproblematik überfordert die Öffentlichkeit, die Presse und Politik. Selbst spezialisierte Klimaforscher kennen sich in angrenzenden, für das Verständnis der Erdklimaentwicklung sehr wohl bedeutsa-

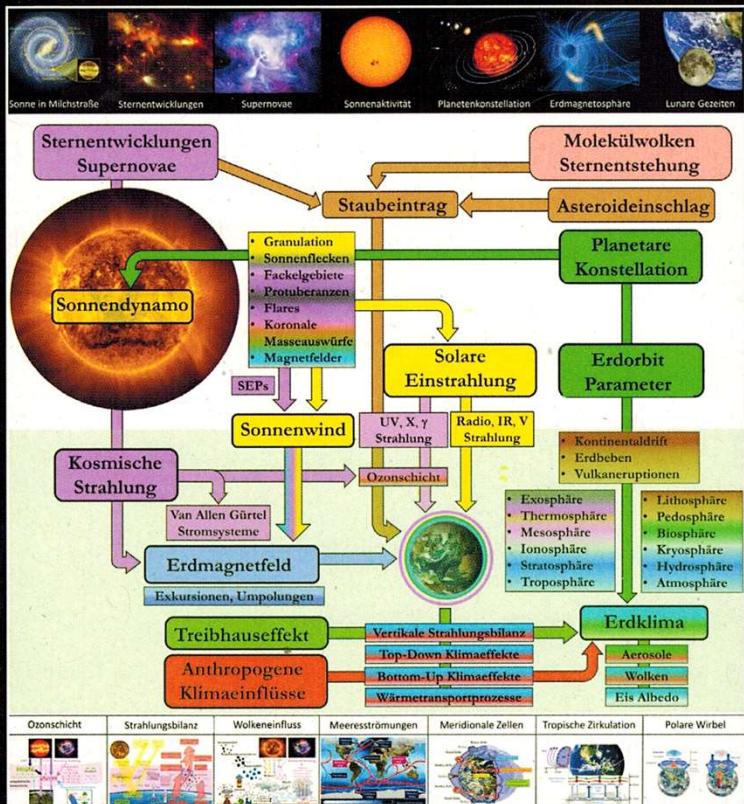
men Fachgebieten oft nicht genügend aus. So manche der heute noch als wenig relevant angesehenen Prozesse müssten in Zukunft eigentlich wesentlich genauer erforscht werden, zumal sie in einem nichtlinearen, durch zahlreiche Rückkopplungsprozesse ausgezeichneten, sich teilweise chaotisch entwickelnden System sehr wohl von Bedeutung sein können. Dabei sollten auch Wissenschaftler die möglichen Grenzen ihrer menschlichen Erkenntnisgewinnung im Auge behalten. Immer dann, wenn in einem sehr komplexen System unberechenbar viele Elemente teilweise unüberschaubar miteinander interagieren (Bild 18), wird es trotz des Einsatzes modernster Beobachtungsinstrumente und der Gewinnung umfangreichen Datenmaterials, trotz schlüssig erscheinender Theorien, guter Modellansätze und der Durchführung aufwendiger numerischer Simulationsrechnungen auch in Zukunft schwerfallen, hundertprozentig verlässliche Aussagen über die Klimaentwicklung zu gewinnen.

Klimaprozesse im Äquator- und Polbereich

Neben den in meridionaler Richtung wirksamen Wärmetransportprozessen (siehe **Teil 2** dieser Artikelserie), die, durch äquatornahen Energieeintrag bzw. polnahe Energieabstrahlung angetrieben, in Zirkulationszellen mit Längenabmessungen von Tausenden Kilometern erfolgen, gibt es sehr wichtige klimarelevante longitudinale Transportprozesse, die die Wärme in geschlossenen Konvektionszellen parallel zum Äquator umlaufen lassen. Diese werden vor allem im Pazifischen Ozean durch die Absorption und längerfristige Speicherung eingestrahlter und zugemischter Energie im Meeresswasser mit seiner hohen Wärmekapazität angetrieben. Die ozeanbasierten zonalen Zirkulationen erfolgen saisonal und mehrjährig auf Längenabmessungen, die durch die Größe der Ozeane und Kontinente vorgegeben sind. Die bedeutsame äquatoriale pazifische Walker-Zelle wurde erst 1969 nach dem englischen Physiker Gilbert Thomas Walker (1868–1958) benannt, der auf der Suche nach Möglichkeiten für die Vorhersage des Indischen Monsuns statistische Untersuchungen durchführte, die zur Entdeckung der sogenannten Südlichen Oszillation führten.

Die natürliche Walker-Zirkulation (Bild 19a) wird durch deutliche Unterschiede der Oberflächentemperatur zwischen dem westlichen und östlichen Pazifik angetrieben. Normalerweise ist der westlichen (östliche) Pazifik wärmer (kälter). Starke konvektive Strömungen starten aufgrund des warmen ostasiatischen Meeres sowie der kalten Luft über der südamerikanischen Westküste. In der oberen Troposphäre wird dadurch eine nach Osten gerichtete Luftströmung, über dem Meer ein nach Westen gerichteter Wind erzeugt, der das Wasser des pazifischen Ozeans nach Westen drückt. [39]

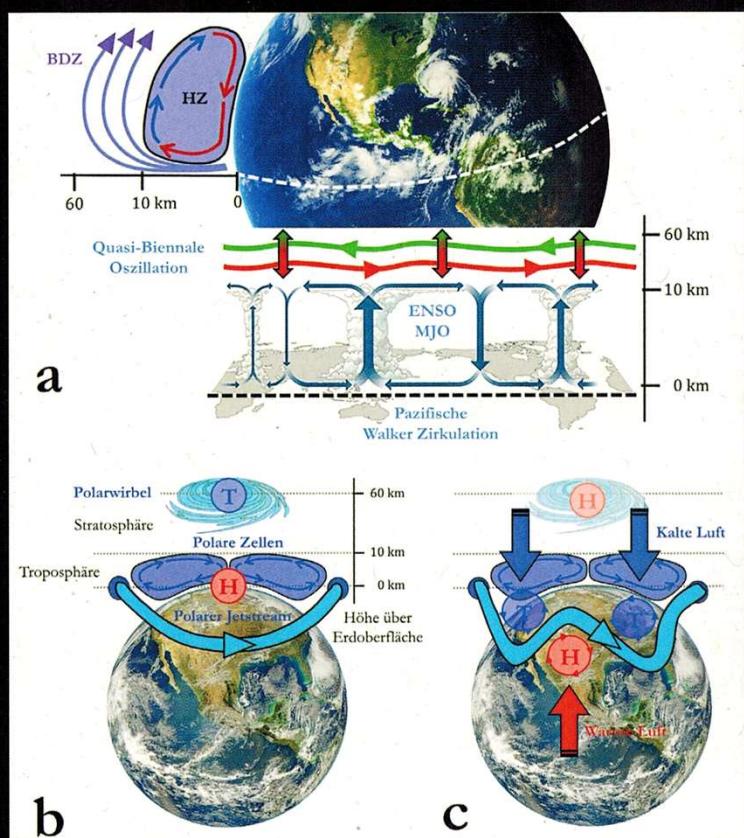
Zu unserem Beitrag auf S. 15



18 Überblick über die komplexe Vielfalt der Klimaeinflussfaktoren im Erdsystem. Bereits nach Entstehung des jungen Sonnensystems vor etwa 4,6 Milliarden Jahren haben außerhalb des Sonnensystems wirksame astronomische Prozesse kontinuierlich starken Einfluss auf die Entwicklung des Erdklimas genommen. Die von der magnetischen Sonne, deren vielfältige Aktivitätszyklen durch Dynamoprozesse getaktet werden, ausgesandte elektromagnetische und Teilchenstrahlung und die in diversen kosmischen Entwicklungsprozessen erzeugte hochenergetische kosmische Strahlung bestimmen das Weltraumwetter in der Magneto- und Ionosphäre der Erde, können deutlichen Einfluss auch auf das Wetter und Klima in der Troposphäre und auf der Erdoberfläche nehmen. Neben der vertikalen atmosphärischen Strahlungsbilanz, die durch die stratosphärische Ozonschicht und Wolkenbildung sowie den Treibhauseffekt entscheidend bestimmt wird, sind auch ozeanische und atmosphärische Transportprozesse und vielfältige menschliche Einflussfaktoren von zentraler Bedeutung für die aktuelle und zukünftige Entwicklung des Klimas auf der Erde. U. v. Kisserow, NASA, GSFC

Wenn sich die Strömungsumlaufrichtung in diesen troposphärischen Konvektionszellen nach wenigen Jahren im Verlauf der sogenannten Südlichen Oszillation (SO) während eines El Niño (EN)-Ereignisses umkehrt, dann hat dies in der Regel starke Auswirkung auch auf das Wetter und Klima in Europa. Im tropischen Ozean-Atmosphäre-System stellt die Madden-Julian-Oszillation (MJO) ein innerhalb von 20 Breitengraden beidseitig des Äquators beobachtbares 30- bis 60-jähriges Zirkulationsphänomen dar, bei dem ein anomales Regengebiet zwischen dem Indischen Ozean und dem zentralen Pazifik wandert. Die Quasi-Biennale-Oszillation (QBO) benennt den in den äquatorialen Stratosphäre mit einer mittleren Periode von etwa 27 Monaten ablaufenden zyklischen Prozess, bei dem regelmäßig eine Ost-West-Umkehr eines stratosphärischen tropischen Windstromes stattfindet. b Starke winterliche stratosphärische Polarwirbel mit einem Tiefdruckgebiet oberhalb der polaren Zellen mit Hochdruckgebieten am Erdboden über den Polen sorgen dafür, dass die polaren Jetstreams schnell und stabil strömen und dadurch kontinuierlich für relativ mildes Wetter sorgen. c Wenn sich diese im Winter in der Regel starken Polarwirbel allzu sehr abschwächen oder Hochdruckgebiete aus dem Äquatorbereich einströmen, dann verformen sich die polaren Jetstreams besonders kurvenreich. Hochdruckgebiete können dann polwärts, starke Tiefdruckgebiete äquatorwärts wandern, wodurch besonders extreme warme und sehr kalte, auch über längere Zeiträume stabile Wetterlagen entstehen können. UvK/NASA/GSFC Scientific Visualization Studio, U. v. Kisserow/NASA

- Walker Zirkulation <https://www.youtube.com/watch?v=aWuV5lwXWVo>
- El Niño <https://www.youtube.com/watch?v=JnHiX95439s>
- What is the Quasi-Biennale Oscillation? | QBO Climate driver <https://www.youtube.com/watch?v=LtkppqrmuLY>
- Wie der Polarwirbel unsere Winter beeinflusst: <https://www.youtube.com/watch?v=SdydeotXodQ>
- Was ist der Jetstream? <https://www.youtube.com/watch?v=F3UJPEaCnM>
- Polarwirbel und Polarwirbelsplit einfach erklärt: <https://www.youtube.com/watch?v=MTANKoYcowI>



19 Einflussreiche troposphärische und stratosphärische Wetter- und Klimaprozesse in den kalten Polargebieten sowie im warmen Äquatorbereich. a In der Innen tropischen Konvergenzzone steigt im Äquatorbereich besonders warme Luft bis in die Stratosphäre auf und strömt als sogenannte Brewer-Dobson-Zirkulation (BDZ) polwärts.

Im Umfeld dieses Wärmetransportsystems spielt sich insbesondere auch auf den Kontinenten ein „normales“ Wettergeschehen ab, das sich aber alle paar Jahre stark ändert. Die Winter werden eine Zeit lang ungewöhnlich warm oder besonders kalt, und die Anzahl stürmischer Hurrikane steigt bzw. fällt. In dem einen Fall (El Niño) verringert sich die konvektive Aktivität dieser westpazifischen Oszillation, im anderen Fall (La Niña) verstärkt sie sich. In solchen besonderen Phasen verändern sich die pazifischen Meerestemperaturen sehr stark mit gravierendem Einfluss auf das weltweite Wettergeschehen. Die genauen Ursachen für die daraus resultierenden globalen Wetteränderungen und längerfristigen Entwicklungen des Erdklimas im Zusammenhang mit dem komplexen Phänomen der El Niño/La Niña-Südlichen Oszillationen sind bisher nicht zufriedenstellend geklärt. Unter anderem wird vermutet, dass auch die schwankende Sonnenaktivität Einfluss auf das ENSO Phänomen nehmen könnte. [40]

Im Gegensatz zur ENSO, die weitgehend lokal verankert ist, stellt die 1971 von *Roland Madden* und *Paul Julian* im Zentralen Pazifik entdeckte Madden-Julian-Oszillation (MJO) (Bild 19a) ein ebenfalls quasi-periodisches atmosphärisches Zirkulationsphänomen dar, das allerdings mit Perioden zwischen 30 bis 60 Tagen im Äquatorbereich wandert. Ein anomales Regengebiet bewegt sich dabei mit Geschwindigkeiten zwischen 3 m/s und 8 m/s vom Indischen Ozean ostwärts bis in den kälteren östlichen Pazifik. Anschließend taucht es wieder im tropischen Atlantik auf. In seiner feuchten Phase zeichnet es sich durch besonders starke Regenfälle aus, während in der sich anschließenden trockenen Phase Gewitter unterdrückt werden.

Wichtige Wärmetransportprozesse treten auch in der Stratosphäre auf. Die in den 1950er Jahren von *Alan Brewer* (1915–2007) und *Gordon M. B. Dobson* (1889–1976) entdeckte meridionale Brewer-Dobson-Zirkulation (BDZ) (Bild 19a) beginnt mit dem Aufstieg der von der Sonne in der Innertropischen Konvergenzzone stark erwärmten Luftmassen bis hinauf in die Stratosphäre. In etwa 12 und 16 km Höhe wird diese Luftströmung in Polrichtung umgelenkt, gelangt dabei bis zu höheren Breitengraden bzw. bis in die Polargebiete, sinkt dort wieder ab und strömt unterhalb

der Troposphäre äquatorwärts zurück. Die Periodendauer beträgt etwa 5 Jahre. Dadurch, dass sie die Verteilung der atmosphärischen Spurengase, vor allem auch der Treibhausgase und Ozonmoleküle steuert, stellt die BDZ einen wichtigen Klimaeinflussfaktor dar. Durch ihren Einfluss lassen sich u. a. der extrem niedrige Wasserdampfgehalt in der Stratosphäre, die hohen stratosphärischen Sulfatkonzentrationen nach Vulkanausbrüchen in den Tropen sowie die hohen Ozonkonzentration in der polnahren Troposphäre erklären. El Niño führt offensichtlich zu einer verstärkten BDZ, was eine Abkühlung der Stratosphäre zur Folge hat und Einfluss auf die stratosphärischen Polarwirbel nehmen kann. Die BDZ kann dadurch extreme Wetterlagen erzeugen und das Klima auf der Erdoberfläche beeinflussen.

Die 1952 entdeckte Quasi-Biennale Oszillation (QBO) (Bild 19a) bezeichnet die im Rhythmus von etwas mehr als zwei Jahren erfolgende regelmäßige Ost-West-Umkehr der Richtung zonaler stratosphärischer Winde in wechselnden Höhen zwischen 16 km und 48 km Höhe über dem Äquator. In der Westwindphase mit Windgeschwindigkeiten von etwa 30 m/s verstärken sich die stratosphärischen Polarwirbel und Polaren Jetstreams, wodurch es zu mehr Atlantiktiefs und milderem Wetter in Europa kommt. Dagegen fallen die Ostwindphasen bei typischen Geschwindigkeiten von nur etwa 15 m/s häufiger mit plötzlichen stratosphärischen Erwärmungen zusammen. Die QBO beeinflusst u. a. die Auswirkungen der variablen Sonnenaktivität auf das Erdklima, korreliert mit einer Vielzahl anderer Prozesse, z. B. im Zusammenhang mit den AO und NAO Meeresoszillationen. [41]

Die stratosphärischen Polarwirbel (**Bild 19b, c**) stellen gewaltige Windzirkulationen dar, die sich in 10 bis 80 km Höhe mit typischen Geschwindigkeiten von 250 km/h über der Arktis von Westen nach Osten bewegen. Sie bilden sich hier im Herbst aus, wenn die Sonneninstrahlung in die Polregionen drastisch reduziert wird. Sie können sich aus ganz unterschiedlichen Gründen verstärken oder abschwächen. Auch wenn sie keine direkte Einwirkung auf das Wetter haben, so beeinflussen sie die Ausprägung der sehr wetterrelevanten Polaren Jetstreams doch sehr deutlich. Diese Starkwindbänder wehen in etwa 10 km Höhe und steuern die Ent-

wicklung starker Hoch- und Tiefdruckgebiete in Europa. ([42], [43])

In einem typischen Winter sind die Polaren Jetstreams sehr stark (Bild 19b). Auf der Nordhalbkugel bringen sie dann z. B. mildes, windiges und feuchtes Wetter vom Atlantik nach Europa. Die stratosphärischen Polarwirbel als Tiefdruckgebiete können durch eindringende Hochdruckgebiete oder sich von unten vertikal nach oben ausbreitende großräumige atmosphärische, als Rossby-Wellen bezeichnete planetare Wellen merklich abgeschwächt werden. Dann gehen dort Druckgleichgewichte verloren, wodurch sich der große Polarwirbel in kleinere Wirbel aufteilt. Diese Störungen übertragen sich in die darunter umlaufenden troposphärischen Wirbelstrukturen, wodurch die Polaren Jetstreams an Stärke verlieren (Bild 19c). Es bilden sich in ihnen langgestreckte mäanderförmige Wellungen aus, in die sich starke Hoch- und Tiefdruckgebiete stabil auch über längere Zeiträume einstellen können und dadurch das Wettergeschehen massiv beeinflussen.

In den Winterzeiten ist der Temperaturunterschied zwischen dem sehr warmen Äquator und den dann besonders kalten Polargebieten sehr groß, die Wirkung des Treibhauseffektes in der polnaren Atmosphäre dabei sehr gering. Der Wärmetransport zu hohen Breiten ist in diesen Zeiten deshalb sehr stark, und die Wärmeenergie könnte von hier aus besonders effektiv ins Weltall abgestrahlt werden. Die Existenz stabiler stratosphärischer Polarwirbel stellt dafür allerdings eine wirkungsvolle Barriere dar. Vulkanausbrüche, die Quasi-Biennale-Oszillation, die El Niño/Südliche Oszillation, die multidekadischen Meeresoszillationen und vor allem die variable Sonnenaktivität könnten aber als Klimaantriebe auf recht unterschiedlichen Zeitskalen fungieren, die den Wärmedurchgang durch den Polarwirbel sowie die Wärmeabstrahlung ins Weltall regulieren.

Zur Analyse der Entwicklung des Erdklimas reicht es nicht aus, allein den äquatornah verstärkten Eintrag der Sonnenenergie in das Erdsystem zu betrachten, der durch die Entwicklungen in der stratosphärischen Ozonschicht, Wolkenbildungsprozesse und den Treibhauseffekt moderiert wird. Genauso bedeutsam sind die Prozesse, die auch den polnahren Abtransport von Wärmeenergie aus dem Erdsystem hinaus in das Weltall bewirken. [1]

Natürliche kosmische und geologisch-tektonische Klimaeinflussfaktoren

Unser Sonnensystem umläuft das Zentrum der Milchstraße in einem Abstand von rund 28.000 Lichtjahren mit einer Geschwindigkeit um 220 km/s in etwa 230 Millionen Jahren (Bild 21a). Es trifft dabei auf galaktische Bereiche mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften, durchquert dabei etwa alle 100 Millionen Jahre einen der vier, zwischen 3.000 und 10.000 LJ breiten Spiralarme. Dort liegt die Materiedichte oft vier bis fünf Größenordnungen über der in den Zwischenarmbereichen vorherrschenden Materiedichte, wodurch in ihnen verstärkt Sternentwicklungsprozesse ablaufen. In den Molekül- und Staubwolken entstehen junge Sternsysteme, von denen heftige und hochenergetische Sternwinde ausgesandt werden, die Materie verdichten und ionisieren können. Am Ende des relativ kurzen Lebens massereicherer Sterne stoßen diese entweder Planetarische Nebel oder nach Supernovaexplosionen besonders stark kollimierte Druckwellenfronten ab, in denen radioaktive Materiateilchen stark beschleunigt werden, und aufgrund derer das umgebende Medium stark verdichtet und aufgeheizt werden kann. [44]

Durchläuft das Sonnensystem einen dieser Spiralarme und trifft dort auf stark verdichtete, relativ kalte Molekül- und Staubwolken oder auf ionisierte Bugstoßwellen, die von Supernovaexplosionen ausgesandt wurden, dann kann die Heliosphäre aufgrund des Staudrucks von außen stark zusammengedrückt und intensiv von radioaktiven Elementen durchsetzt werden. Als Folge davon bewirkt dies eine drastische Veränderung des heliosphärischen Weltraumwetters und hat damit auch merkliche Auswirkungen auf das Erdklima. Höherer Staubeintrag würde zu einer deutlichen Abkühlung führen, und der verstärkte Eintrag hochenergetischer kosmischer Strahlung müsste die Prozesse in der stratosphärischen Ozonschicht beeinflussen, wodurch die Wolkenbildungsprozesse stark beeinflusst werden können (siehe Teil 2 der Artikelserie). [45]

Nach neueren Erkenntnissen hat unser Sonnensystem u. a. vor etwa 14 Millionen Jahren ein als Radcliffe-Welle (Bild 20a) bezeichnetes, mit verdichten Gas- und Staubwolken und Ster-

nentwicklungsgebieten durchsetztes, 9000 Lichtjahre langes und sinusförmiges Materieband im lokalen Orion-Arm durchquert, der zwischen dem Sagittarius- und Perseus-Arm gelegen ist. Die dabei sicherlich induzierten Störungen der Oortschen Wolke im äußeren Sonnensystem könnten verstärkt zur Injektion von Kometen geführt haben. Der intensivierte Einstrom kalten Staubes und hochenergetischer radioaktiver Partikel sollte die Strahlungsbilanz in der Erdatmosphäre deutlich verändert haben. Tatsächlich fand auf der Erde genau zu dieser Zeit, vor allem auch aufgrund der Verringerung der Sonneneinstrahlung, eine globale Abkühlung statt. Die Ausdehnung und die damit einhergehende nachhaltige, besonders großflächige kontinentale Vereisung des antarktischen Eisschildes im mittleren Miozän bewirkten einen deutlichen Klimawechsel auf der Erde. [46]

Im Archaikum vor etwa 4 bis 2,5 Milliarden Jahren, in der sogenannten „Zeit des ersten Lebens“ auf der Erde mit ersten Kontinenten, allerdings ohne die Existenz freien Sauerstoffs, muss die Leuchtkraft der Sonne nach Erkenntnissen aus Modellrechnungen zur Entwicklung der Sonne um 20 bis 25% niedriger als heute gewesen sein. Das „Paradoxon der schwachen jungen Sonne“ bezeichnet den offensichtlichen Widerspruch zwischen der damals wesentlich geringeren solaren Strahlungsleistung, die ein wesentlich kälteres Klima, möglicherweise eine vollständige planetare Vereisung bewirkt hat, sowie die anscheinend bestätigte Existenz bereits erster früher Lebensformen wie Bakterien, Blaualgen und Archaeen behindert haben müsste. Wissenschaftler versuchen diese Diskrepanz zum Beispiel dadurch aufzulösen, dass sie von einem damals höheren Gehalt an wärmenden Treibhausgasen wie Kohlendioxid und Methan ausgehen, eine geringere Wolkenalbedo, eine früher wesentlich stärkere Tidenwirkung des Mondes oder eine höhere Konzentration heizender radioaktiver Elemente unterstellen. [47]

Die Sonne rotierte im Archaikum mit einer Periode zwischen 6 und 15 Tagen anstatt von heute 27 Tagen wesentlich schneller, wodurch die z. B. durch die Sonnenfleckenrelativzahl und die Ausprägung solarer Fackelgebiete charakterisierte magnetische Aktivität stärker, die Häufigkeit intensiver solarer Flares und Koronaler Eruptionen we-

sentlich größer gewesen sein muss. Die Topologien magnetischer Feldstrukturen waren viel komplexer. Und die aus der Konvektionszone aufsteigenden Sonnenflecken konzentrierten sich in sehr viel höheren Breiten als heute (Bild 20 b). Die wesentlich stärkeren heliosphärischen Magnetfelder bewirkten einen deutlich effektiveren Schutz vor dem Einstrom kosmischer Strahlung, insbesondere auch in die Atmosphäre der Erde, wodurch sehr wahrscheinlich weniger Wolken entstehen konnten, das Klima auf der Erde auch aus diesem Grunde deutlich lebensfreundlicher als vermutet gewesen sein könnte. Die verstärkt hochenergetische solare UV-Strahlung der Sonne hat sicherlich starken Einfluss auf die atmosphärische Chemie, vor allem auch in der stratosphärischen Ozonschicht, genommen und den Temperaturgradienten zwischen den Polen und dem Äquator verändert. Magnetische Prozesse könnten somit das „Faint Young Sun Problem“ auflösen. [48]

Die gravitative Kraft des im Vergleich zu anderen Morden sehr massereichen, aktuell recht nahen, in 27,32 Stunden umlaufenden Erdmondes (Bild 20c), beeinflusst die Neigung der Erdachse und sorgt dadurch für deren recht stabile Ausrichtung und damit für eine relative Stabilität des Erdklimas. Die elliptische Mondbahn schneidet die Ekliptik dabei in den zwei sogenannten Mondknoten, die periodisch innerhalb von etwa 18,6 Jahren um die Erde wandern. Auch wenn der direkte Einfluss der Bewegung des Mondes relativ zur Erde auf die globale Erdtemperaturen nur sehr gering ist, so können die von ihm ausgehenden Gezeitenkräfte doch sowohl in den Ozeanen als auch in der Atmosphäre merklichen Einfluss auf die Entwicklung regionaler Klimamuster nehmen. [49]

Die ozeanischen Gezeiten bewirken periodische, ortsabhängig mehr oder weniger starke An- und Abstiege des Meeresspiegels, wodurch die Ozeanströmungen beeinflusst, durchmischt, lokal abgekühlt oder erwärmt werden, und sich die Verteilung des Salzgehaltes und der Nährstoffe in ihnen verändern kann. In der Nähe der Polargebiete verändert sich durch Schmelzung die See-eisbedeckung, wodurch langfristiger auch das regionale Klima und die Höhe des Meeresspiegels beeinflusst werden können. Die lunare Gravitationskraft er-

zeugt darüber hinaus auch atmosphärische Gezeiten, die vor allem in höheren Atmosphärenschichten wirksam werden können. So beeinflussen sie hier die Dichteverteilung in der Thermosphäre, verändern die atmosphärischen Druck- und Windverhältnisse auch in tieferen Atmosphärenschichten und können dort zumindest geringen Einfluss auf Starkregenereignisse haben.

Nachdem der Superkontinent Pangäa vor rund 300 Millionen Jahren als größte Landmasse der Erde noch weitgehend zusammenhing (**Bild 20d**), brach er vor etwa 200 Millionen Jahren allmählich auseinander. Diese heute noch auf langen Zeitskalen kontinuierlich erfolgende Drift der Kontinente, einhergehend mit Veränderungen der Verteilung der Landmassen, der globalen Meeresströme, des Wärmetransports, der Feuchtigkeits- und Windverhältnisse, nahm auch damals starken Einfluss auf das Erdklima. Durch die Bildung von Gebirgen, die Barrieren für feuchte Luftmassen darstellen, können die Niederschlagsmuster beidseitig dieser Gebirge stark verändert werden. In Polnähe versammelte Landmassen unterstützen dabei die Ausbildung größerer Eiskappen, wodurch sich die Eis-Albedo-Rückstreuung des Sonnenlichtes verstärkt und zu weiterer Abkühlung und Entwicklung von Eiszeiten führen konnte. Kontinente in niedrigen geographischen Breiten bewirken dagegen eher die Ausbildung wärmerer Klimazonen. Durch die Kontinentalverschiebung kann es zu Erdbeben und Vulkanausbrüchen kommen, wodurch der Ausstoß von Kohlendioxid und Methan die Erderwärmung unterstützen wird, verstärkte Verwitterungsprozesse andererseits für den Einbau dieser Treibhausgase in Gesteinen sorgen können. [50]

Vor etwa 66 Millionen Jahren bewirkte der gewaltige Asteroideneinschlag im Norden der mexikanischen Halbinsel Yucatán, bei dem der Chicxulub-Krater mit einem Durchmesser von 180 km entstand, vermutlich nicht nur das Aussterben der Dinosaurier. Der danach erfolgte Eintrag riesiger Mengen an Staub-, Ruß-, auch geladener Aerosolpartikel sowie chemischer Verbindungen in hohe Atmosphärenschichten muss damals über einen langen Zeitraum zur Verdunklung der Sonne und globaler Abkühlung, zu drastischen Klimaveränderungen, aber auch zur Freisetzung von Treibhausgasen geführt ha-

ben. Asteroideneinschläge (**Bild 20e**) können massive Auswirkung auf das Leben im Ökosystem der Erde haben. Auch bei größeren Erdbeben und Vulkanausbrüchen (**Bild 20f**) können sowohl kühlende als auch wärmende Effekte in komplexer Weise zumindest kurzzeitig und eher lokal Einfluss auf das Klimasystem nehmen. In die Atmosphäre aufsteigender Staub und Asche blockieren das Sonnenlicht und können immense Auswirkungen auf die Entwicklung der stratosphärischen Ozonschicht haben. Sulfataerosole reflektieren oder absorbieren das Sonnenlicht, Treibhausgase unterstützen die Erderwärmung. [51], [52]

Klimaeinfluss durch Kosmische Strahlung, Sonnenaktivität und Wolkenbildung

Bereits Ende des 18. Jahrhunderts ging *Wilhelm Herschel* (1738–1822) davon aus, dass sich sowohl die Temperaturschwankungen als auch die Klimavariabilität auf der Erde synchron mit den Schwankungen der Sonnenfleckenrelativzahl, also mit der Sonnenaktivität entwickeln würden (siehe Text zu **Bild 2**). Die periodischen Veränderungen der elektromagnetischen Gesamtausstrahlung TSI der Sonne alleine können die komplexe Entwicklung des Erdklimas bekanntlich allerdings nicht erklären. In **Bild 21b** sind die auf typischen Zeitskalen von etwa 100 Millionen angenähert periodisch schwankenden Änderungen der mittleren Erdtemperatur der vergangenen 500 Millionen dargestellt, die anscheinend relativ eng mit dem im Erdsystem gemessenen Fluss hochenergetischer Kosmischer Partikel korrelieren. Hoher (niedriger) kosmischer Strahlungsfluss hat offensichtlich eine merkliche Abnahme (Zunahme) der Temperatur gegenüber einem Mittelwert $\Delta T = 0^\circ \text{C}$ zur Folge. Der Vergleich mit **Bild 21a** macht deutlich, dass der Fluss kosmischer Partikel beim Durchgang durch die unterschiedlichen Spiralarme der Milchstraße mit ihren Sternentstehungsgebieten und häufigeren Supernovaexplosionen aus verständlichen Gründen jeweils deutlich ansteigt (siehe Text zu Bild 20a). Erhöhter (erniedrigter) Eintrag geladener kosmischer Partikel sollte eine Zunahme (Abnahme) von Kondensationskernen zur Unterstützung (Abnahme) der Wolken-

bildung zur Folge haben (siehe Text zu **Bild 16**), was zu der in Bild 21b registrierten Abkühlung (Erwärmung) des Erdklimas führen kann. [53]

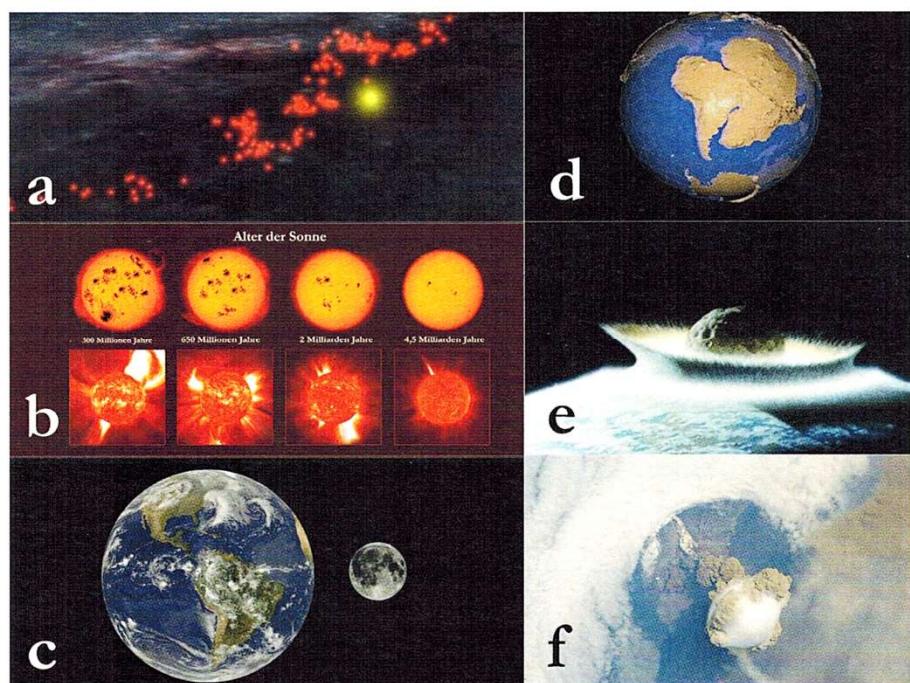
In Zeiten hoher magnetischer Sonnenaktivität strömen stärkere Sonnenwindkomponenten und wesentlich häufiger koronale Masseauswürfe von der Sonne in den interplanetaren Raum ab. Im Gleichgewicht mit dem Staudruck des Windes aus dem umgebenden interstellaren Medium bewirkt der magnetisierte Sonnenwind mit seinen spiralförmigen heliosphärischen Magnetfeldern die Ausbildung einer Bugstoßwelle (**Bild 22a**). Im Sonnenfleckenmaximum (-minimum) behindern Turbulenzen in ihr das Eindringen kosmischer Strahlung wesentlich stärker (schwächer). Die Graphen in **Bild 22b** veranschaulichen eindrucksvoll diese Antikorrelation. Eine hohe (niedrige) Sonnenfleckenrelativzahl reduziert (verstärkt) die Zählrate galaktischer kosmischer Strahlung. Im Laufe des Sonnenfleckenzyklus kann diese um bis zu 20 % schwanken.

Bereits 1997 hatten der dänische Geo- und Weltraumphysiker *Egil Friis-Christensen* (1944–2018) sowie der dänische Physiker *Hendrik Svensmark* auf eine beeindruckend starke Korrelation zwischen der vor allem niedrigen Wolkenbedeckung und dem im Rhythmus der solaren Aktivitätszyklen schwankenden kosmischen Strahlungsfluss hingewiesen, die in **Bild 23a** für den Zeitraum von 1984 bis 2005 dargestellt ist. Da diese Korrelation danach jedoch völlig „aus dem Ruder lief“, wird die Bedeutung des betreffenden Zusammenhangs heute von einer Anzahl von Wissenschaftlern als grundsätzlich nicht existent abgelehnt. Es ist allerdings kein Wunder, dass eine, wie in diesem Fall, physikalisch durchaus begründbare Korrelation zwischen zwei Messgrößen in der Datenuordnung plötzlich nicht mehr direkt nachweisbar ist, wenn andere überlagernde Einflussfaktoren dominierend eine andere Entwicklung erzwingen. Im Rahmen einer verlässlichen physikalischen Erkenntnisgewinnung sollten Forschungsarbeiten in diesem Zusammenhang aber sehr wohl weiter unterstützt werden. Vermutlich könnte die Stärke der Sonnenaktivität die Wolkenbildung und damit das Erdklima vielleicht doch sehr viel stärker als angenommen durch Variation des kosmischen Strahlungsflusses beeinflussen. ([54], [55], [56])

Auch gewaltige solare Masseauswürfe mit den in sie eingebetteten Magnetfeldstrukturen müssten den Einstrom hochenergetischer galaktischer kosmischer Partikel in die Erdatmosphäre zumindest kurzzeitig verändern. Nach Theorie von *Svensmark* müsste dies Einfluss auf die Wolkenbildung und damit zumindest vorübergehend auch auf das Wetter nehmen. Es war der US-amerikanische Geophysiker *Scott E. Forbush* (1904–1984), der die zeitlichen Variationen der Stärke der kosmischen Strahlung erforschte und nach dem der Forbush-Effekt benannt wurde, der zeitversetzt einen messbaren plötzlichen Abfall solcher hochenergetischen Teilchenstrahlung nach einer solaren Erruption bewirkt. **Bild 23b** veranschaulicht die mit unterschiedlichen Messapparaturen registrierten und danach jeweils gemittelten Abnahmen der Anzahl der Aerosolpartikel, des Wolkenwassergehalts, des Flüssigkeitswasseranteils, auch in den im schwachen Infrarot detektierten Wolken, die einige Tage nach starken Forbush-Ereignissen auftraten. Die anhand dieser Datensammlung sowie umfangreicher Laborexperimente gewonnenen Erkenntnisse können die These vom Einfluss der Kosmischen Strahlung auf die Aerosol- und Wolkenbildung offensichtlich unterstützen.

Getaktete solare Dynamoprozesse und das Erdklima

In Teil 1 dieser Artikelserie wurde erläutert, wie die solaren Magnetfelder in Dynamoprozessen erzeugt werden, wie die periodisch variierende Stärke und Topologie dieser Felder die Häufigkeit und Lage des Auftretens von Sonnenflecken und Fackelgebieten im Verlauf einer Vielzahl von Fleckenzyklen auf ganz unterschiedlichen Zeitskalen bestimmt. Der Schweizer Astronom *Rudolf Wolf* (1816–1893), nach dem die Fleckenrelativzahl benannt wurde, und der erstmals die Periode des etwa 11-jährigen Sonnenfleckenzyklusses genauer ermittelte sowie deren Übereinstimmung mit der Zyklizität der Schwankungen des Erdmagnetfeldes herausgefunden hatte, vermutete bereits 1859, dass die von Venus, Erde und Jupiter gemeinsam ausgeübten gravitativen Gezeitenkräfte für die Ausprägung der so charakteristischen Periode der Sonnenaktivität von 11 Jahren verantwortlich sein könnten.

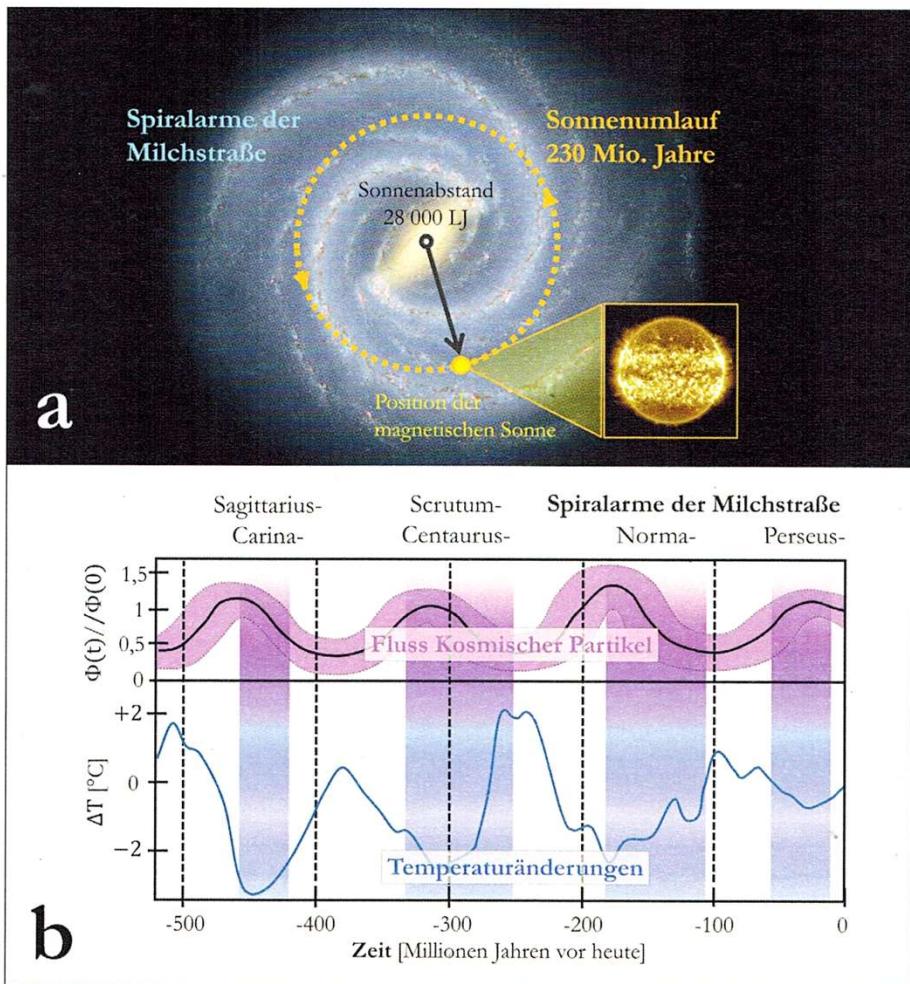


20 Kosmische und geologische Klimaeinflussfaktoren. **a** Veranschaulichung der Wanderung des Sonnensystems (gelb) in die Radcliffe-Welle (rot) im Orion-Arm der Milchstraße. Staubeintrag und Kosmische Strahlung aus den dort durchlaufenden Molekül- und Staubwolken können langzeitige Abkühlungen auch im Erdsystem bewirken. **b** Wesentlich stärkere magnetische Aktivitäten der jungen Sonne müssten in frühen Entwicklungsphasen zu verstärktem Einfluss des Weltraumwetters auf das Erdklima geführt haben. **c** Auch die Gezeitenkräfte des Mondes können Parameter des Erdklimas verändern. **d** Aufgrund der Kontinentaldrift verändert sich das Erdklima auf langen Zeitskalen sicherlich gravierend. **e** Starker Staubeintrag nach dem Einschlag größerer Asteroiden führt zur Abkühlung auf der Erde. **f** Auf kürzeren Zeitskalen kann dies auch für Vulkanausbrüche gelten, bei denen verstärkt Staub-, auch geladene Partikel, Aerosole und klimarelevante chemische Verbindungen freigesetzt werden. A. A. Goodman/Harvard University; IAU/E. Guinan; NASA, D. Hon/NASA; NASA/JPL Caltech, D. Davis/NASA; NASA • Radcliffe passage Orion: <https://phys.org/news/2025-02-solar-journey-orion-complex-million.html> • How Does The Moon's Orbit Affect Earth's Climate? - Physics Frontier <https://www.youtube.com/watch?v=jrGZeblrNgs> • Welche Faktoren beeinflussen den Klimawandel? <https://www.youtube.com/watch?v=AvmTjnx64e4> • Asteroiden-Einschläge: <https://taz.de/Forschung-zu-Asteroiden-Einschlaegen/15919918/> • Vulcano Eruption <https://www.nasa.gov/image-article/sarychev-volcano/> • Earth Quakes: <https://spaceplace.nasa.gov/earthquakes/en/>

Es war der US-amerikanische Astrophysiker *Robert Henry Dicke* (1916–1997), der sich 1978 die Frage stellte, ob es im Innern der Sonne ein Chronometer geben könnte, das eine regelmäßige Taktung des Sonnenzyklus erzwingt, oder ob die Schwankungen der Länge des 11-jährigen Sonnenzyklus, basierend auf komplexen Wechselwirkungen unterschiedlicher physikalischer Prozesse, eher zufällig erfolgen. Anhand seiner statistischen Datenanalyse von Sonnenfleckenzzyklen kam *Dicke* damals zu dem Schluss, dass es sich eher um einen getakteten Prozess handeln müsste, der von zufälligen Fluktuationen überlagert sein könnte. Nach der Analyse größerer Datensätze war es in der Folgezeit aber wissenschaftlicher Konsens, dass die Sonnenzyklen wohl eher einem zufälligen Random-Walk-Prozess unterliegen müssten.

Angeregt vor allem durch die überraschend exakte Übereinstimmung der

im Mittel etwas mehr als 11-jährigen Periode des solaren Aktivitätszyklusses, mit der sich alle 11,07 Jahre wiederholenden speziellen Planetenkonjunktion von Venus, Erde und Jupiter, ihrer Ausrichtung entlang einer Linie, findet in den letzten beiden Jahrzehnten wieder eine kontrovers geführte Auseinandersetzung zur Theorie der Sonne-Planeten-Einwirkung (SPW) durch Gezeitenkräfte auf den Sonnenzyklus statt. Auch wenn die Stärke dieser direkt einwirkenden Gravitationskräfte nicht nur von Kritikern als sehr klein, als zumindest energetisch nicht ausreichend angesehen wird, so erforschen Wissenschaftler doch unterschiedliche mehr oder weniger spekulativen Mechanismen, durch die ein schwacher, sich periodisch wiederholender puschender Einfluss der Planetenkonstellationen auf die Ausprägung der Sonnenzyklen doch signifikant wirksam werden könnte. ([57], [58])



21 Änderung der Erdtemperatur beim Umlauf des Sonnensystems durch die Milchstraße. **a** Durchlauf des Sonnensystems durch die galaktischen Spiralarme im Abstand von etwa 100.000 Jahren, in denen verstärkt Sternentstehungsprozesse ablaufen und intensive kosmische Strahlung freigesetzt wird. **b** Darstellung der inversen zeitlichen Korrelation zwischen dem Verhältnis von deren variabler Intensität $\Phi(t)$ zu einem Normalwert $\Phi(0)$ und der mittleren Temperaturänderung ΔT auf der Erde bei deren Durchlauf durch die Milchstraße in den vergangenen 500 Millionen Jahren. *NASA/JPL-Caltech/R. Hurt (SSC/Caltech), U. v. Kusserow; N. J. Shaviv/J. Veizer, U. v. Kusserow*

- The REAL Movement of Earth Through the Galaxy <https://www.youtube.com/watch?v=oW2GT48ZLwA>
- Die Bewegung des Sonnensystems durch die Milchstraße <https://www.youtube.com/watch?v=kxtDQwVfAaE>
- Warum wir heute in einer Eiszeit leben https://www.youtube.com/watch?v=iuV-A_ms9RM

Einige recht exotisch erscheinende Modellvorstellungen gehen davon aus, dass planetare Gezeitenkräfte durch periodische Variationen, z. B. der Kernfusionsrate im Zentralbereich der Sonne, der Stärke und räumlichen Verteilung der potentiellen Energie oder des Drehmomentes im Sonneninneren, speziell in einer nicht-sphärischen Tachokline (**Bild 24a**) im Bereich zwischen der Strahlungs- und Konvektionszone die Ausprägung der unterschiedlichen Periodenlängen der Sonnenzyklen bewirken könnten. Darüber hinaus werden vier weitere realistischere Mechanismen für einen wahrnehmbaren Effekt direkt auf den Dynamoprozess verantwortlich gemacht. Zum einen könnte die periodische Bewegung der Sonne

auf ihrem elliptischen Orbit um das Baryzentrum den Schwerpunkt des Sonnensystems (**Bild 11b**), die differentielle Rotation, sehr regelmäßig verändern. Zum andern könnte die SPW auch die Speicherkapazität der Magnetfelder in der Tachokline sensitiv verändern, wodurch der Auftrieb magnetischer Flussröhren zur Sonnenoberfläche und die Ausbildung der Sonnenflecken zeitlich geeignet moderiert wird (**Bild 24b**).

Frank Stefani und Mitarbeiter am Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR) modellieren seit 2016 zwei weitere mögliche Mechanismen für den durch Planeten synchronisierten Sonnendynamo, die periodischen Einfluss auf den in der Tachokline wirkenden α -Effekt nehmen könnten. Für

das oszillierende Verhalten der Dynamoprozesse haben sie anfangs die dort möglicherweise wirksamen Drehsinnoszillationen der Helizität einer stromgetriebenen Instabilität für toroidale Magnetfelder, die nach dem britischen Astronomen Roger John Tayler (1929–1997) benannt wurde, für ein solches regelmäßig variierendes Verhalten der solaren Dynamoprozesse verantwortlich gemacht. Aktuell studieren sie sehr erfolgreich ein abgewandeltes Konzept, wonach eher die Überlagerung geeigneter, durch unterschiedliche planetare Gezeitenkräfte in der Tachokline angeregter magnetischer Rossby-Wellen dieses Verhalten erklären könnte (**Bild 24c**).

Eine klassische Erklärung für die charakteristische Periodenlänge von $P_{VEJ} = 11,07$ Tagen konnte Nicolas Scafetta 2022 im Rahmen seiner Theorie der Planetenharmonie anhand der von ihm entwickelten Formel

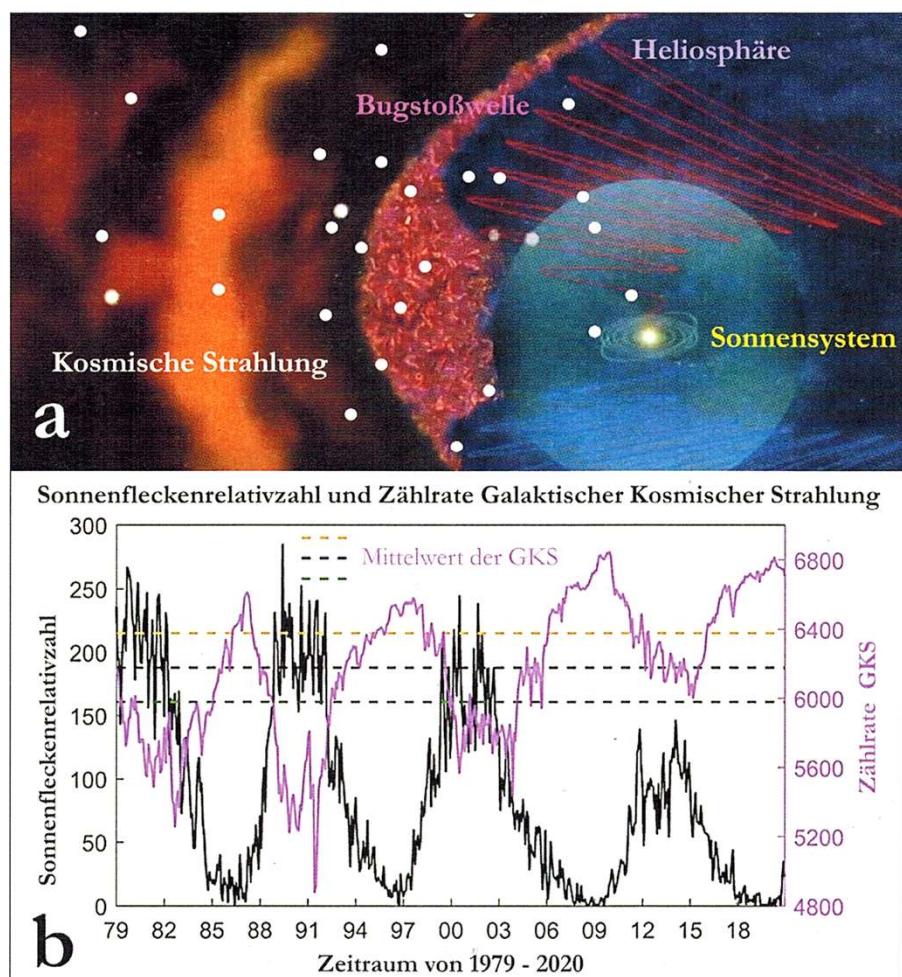
$$P_{VEJ} = \left[\frac{1}{2} \cdot \frac{3}{P_V} - \frac{5}{P_E} + \frac{2}{P_J} \right]^{-1} \cong 4043,21 \text{ d} \cong 11,07 \text{ Jahre}$$

geben, in der $P_V = 224,701 \text{ d}$, $P_E = 365,256 \text{ d}$ bzw. $P_J = 4332,589 \text{ d}$ die Umlaufperioden der drei Planeten Venus, Erde und Jupiter in Tagen angeben. In dem anhand von Ephemeriden, den berechneten Positionen und Geschwindigkeiten der Planeten des Sonnensystems ermittelten Spektrum der Gezeitenwirkungen, lässt sich allerdings ein direkter gemeinsamer starker Einfluss der in Reihe angeordneten drei Planeten Venus, Erde und Jupiter gar nicht erkennen. Besonders markante Spitzeneinflusswerte ergeben sich im Gezeitspektrum stattdessen für die Zwei-Planeten-Gezeitenwirkung der Planetenpaare Venus-Jupiter, Erde-Jupiter und Venus-Erde mit Zeitabständen von $P_{VJ} = 118,50 \text{ d}$, $P_{EJ} = 199,44 \text{ d}$, und $P_{VE} = 291,96 \text{ d}$. Wie die umfangreichen Forschungsarbeiten am HZDR zeigen, könnte sich die so spezielle 11,07-jährige Periode durch Überlagerung dieser drei, durch Rossby-Wellen bestimmten Taktperioden, ergeben. [59]

Wie die planetaren Wellen in den Ozeanen und der Erdatmosphäre (siehe Text zu Bild 19c) stellen Magnetische Rossby-Wellen auch in der elektrisch sehr gut leitfähigen Tachokline großräumige, relativ niederfrequente Wellentypen dar, die sich in rotierenden Fluiden unter Einfluss der Corioliskraft und von Wirbelgradienten ausbilden können, deren Eigenschaften

zusätzlich aber durch die hier gelagerten und aufsteigenden toroidalen Magnetfelder beeinflusst werden. Stefani und Mitarbeiter konnten in ihren Modellrechnungen zeigen, dass die Geschwindigkeit der durch Gezeitenkräfte angeregten magnetischen Rossby-Wellen sehr wohl ausreichen kann, um durch sie einen, zur Erklärung der unterschiedlichen solaren Aktivitätszyklen, ausreichend stark wirksamen dynamosynchronisierenden α -Effekt treiben zu können. Die in **Bild 24** unten notierten Formeln machen deutlich, wie kompliziert dafür allein schon der in den Modellrechnungen neben dem klassischen Term α^k verwendete periodische Term α^p gewählt wurde, in dem $P[B(\theta), t]$ den von der Stärke $B(\theta)$ des breiten-abhängigen Magnetfeldes und der Zeit t abhängenden Einfluss periodisch variierender Gezeitenkräfte beschreibt. In der Dynamogleichung (siehe dazu **Bild 7**) haben die Wissenschaftler einen Zusatzterm eingefügt, der den gezeiten gesteuerten magnetischen Auftrieb magnetischer Flussröhren von der Tachokline durch die Konvektionszone zur Sonnenoberfläche beschreibt. [60]

In ihren komplexen Modellrechnungen können sie zeigen, dass der durch spezielle Eigenschaften im Sonneninnern geprägte konventionelle α - ω -Dynamo mit einer „natürlichen“ Periode von etwa 20 Jahren durch die drei Gezeiten getriggerten Magneto-Rossby-Wellen und den daraus resultierenden 11,07-jährig variierenden periodischen α -Effekt in der Tachokline getaktet wird. Dadurch lassen sich die periodische Stärkenschwankung des im Mittel etwa 11-jährigen Schwabe-Zyklus sowie die regelmäßigen Umpolungen der Magnetfelder im Verlaufe des zirka 22-jährigen magnetischen Hale-Zyklus erklären (siehe hierzu **Tabelle 1**). Eine überlagernte, mit 193 Jahren den Suess-de-Vries-Zyklus charakterisierende Schwingungsmodus, lässt sich danach durch zusätzliche Berücksichtigung der Spin-Bahn-Kopplung aufgrund axialer Rotation der Sonne und deren rosettenartige Umlaufbewegung um das Baryzentrum mit einer Periode von 19,86 Jahren erklären (siehe **Bild 11b**). Möglicherweise lässt sich auch die Periodenlänge des Gleissberg-Zyklus von 80 bis 90 Jahren durch eine Überlagerung des Schwabe-Zyklus mit den, von den Planetenpaaren Jupiter-Uranus und Jupiter-Nep tun ausgeübten Gezeitenkräften und



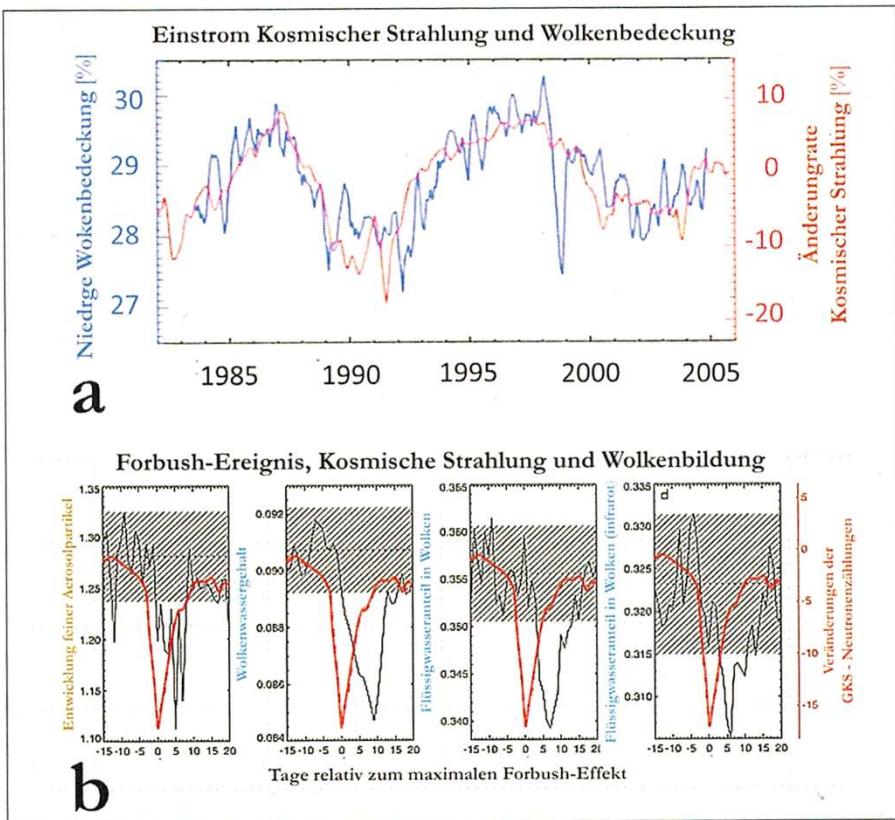
22 Einfluss der Stärke des heliosphärischen Magnetfeldes auf den Einstrom kosmischer Strahlung in das Erdsystem. **a** Die sich im Verlaufe der Sonnenaktivitätszyklen ändernde Stärke und Topologie der solaren Magnetfelder bewirkt starke Veränderungen des Sonnenwindes, der heliosphärischen Magnetfelder sowie der Verhältnisse in der Bugstoßwelle, die unser Sonnensystem vor allzu starkem Einstrom galaktischer kosmischer Strahlung schützt. **b** Die Gegenüberstellung der zeitlichen Entwicklung des Einstroms kosmischer Strahlung (violet eingefärbt) sowie der Sonnenfleckenzahl (schwarz dargestellt) veranschaulicht eine inverse Korrelation, wonach starke solare Magnetfelder in Zeiten der Sonnenfleckemaxima recht starke Abschwächung des Einstroms kosmischer Strahlung zur Folge haben können. NASA, U. v. Kusserow; V. Kumar et al.

- NASA | Voyager Finds Magnetic Bubbles at Solar System's Edge <https://www.youtube.com/watch?v=5HbJiY1wATQ>
- Ist die kosmische Strahlung am Klimawandel schuld? <https://www.youtube.com/watch?v=yuJgqHCeqQ>

dem Gezeiteneinfluss weiterer Planeten erklären. Der Bray-Hallstadt-Zyklus mit Periodenlängen zwischen 2100 und 2500 Jahren lässt sich allerdings so nicht einfach erklären, weil der phasenweise Übergang der Dynamoprozesse in ein eher chaotisches Verhalten jede langfristige Vorhersage der Variationen des Sonnenzyklus verhindern würde. In einer neueren Arbeit haben die Wissenschaftler am HZDR darüber hinaus jetzt gezeigt, dass die unterschiedlichen magnetischen Rossby-Wellen in der Tachokline, die jeweils durch die Gezeitenkräfte der drei Paare der Planeten Venus, Erde und Jupiter angeregt werden, auch für die beobachtbaren Quasi-Biennalen, ansatzweise periodischen

Schwankungen mehrerer solarer Phänomene auf typischen Zeitskalen von 1,7 Jahren oder kürzer verantwortlich sein können. ([61], [62])

Im 2. Teil dieser Artikelserie wurden bereits die Hintergründe der Milankovitch-Zyklen unter dem quasi-periodisch schwankenden Einfluss der Planetenkonstellationen auf die Erdbahnparameter und dadurch auch auf das Erdklima betrachtet. Im Wissenschaftsjournal *Climate* des *Multidisciplinary Digital Publishing Institute* (MDPI) hat Frank Stefani 2021 eine Arbeit veröffentlicht, in der er die relative Stärke des Einflusses der Sonnenaktivität sowie des durch Kohlendioxid-Eintrag bewirkten Treibhauseffektes auf die Tem-



23 Wolkenbildung unter Einfluss kosmischer Strahlung und magnetischer Sonnenaktivität. **a** Enge Korrelation zwischen dem Einstrom kosmischer Strahlung und der Bedeckung durch niedrige Wolken von 1984 bis 2005. **b** Plötzliche starke Verringerung des kosmischen Teilchenstrahlungsflusses (roter Graph) nach einem koronalen Massenauswurf auf der Sonne (sogenannter Forbush-Effekt), was um einige Tage zeitverzögert deutlich Abnahmen der gemessenen Aerosolteilchendichte (ganz links), des Wolkenwassergehalts (Mitte links) sowie des Flüssigwasseranteils in den Wolken (Mitte rechts und rechts im Infraroten gemessen) zur Folge hat. H. Svensmark; H. Svensmark/T. Bondon/J. Svensmark (Bildbearbeitung: U. v. Kusserow)

- Henrik Svensmark – Der Einfluss kosmischer Strahlung auf das Klima <https://www.youtube.com/watch?v=8AdAV3Va9Mg&t=4s>
- Henrik Svensmark: Der Zusammenhang zwischen kosmischer Strahlung und Klima <https://www.youtube.com/watch?v=yhr0kiMIQc>

peraturentwicklung für den Zeitraum von 1850 bis 2018 abschätzt. Er verwendet darin auch seine Erkenntnisse über die mögliche planetare Synchronisation des Sonnendynamos, um Vorhersagen für die zukünftige Entwicklung der globalen Erdtemperatur auf der Erde bis zum Jahre 2150 machen zu können. [63]

In Bild 25 sind recht verlässlich gemessene Daten für die Änderungen der gemittelten globalen Temperatur ΔT (a), die Entwicklung des aa-Indexes (b), der als langzeitig gut verfügbares Maß für die globale geomagnetische Aktivität indirekt auch die Stärke der Sonnenaktivität gut repräsentiert, sowie des Zweierlogarithmus einer relativen CO_2 -Konzentration (c) für den Zeitraum von 1850 bis etwa heute registriert. Die Abbildung zeigt, dass die Entwicklung der gemittelten geomagnetischen aa-Indexwerte, die in dieser Arbeit als indirekte Proxydaten für die Stärke der Sonnenaktivität verwendet wurden, und

die im Gegensatz zur CO_2 -Konzentration wesentlich stärker schwanken, zwischen 1850 und 1990 eine bemerkenswerte Ähnlichkeit mit der Entwicklung der Temperatur aufweist. Für diesen Zeitraum kann mit 0,95 ein dem Idealfall 1,00 für optimale Korrelation sehr naher, hoher Korrelationskoeffizient nachgewiesen werden. Dass diese enge Korrelation danach allerdings zusammenbricht, die aa-Indexwerte aufgrund abnehmender Sonnenaktivität kleiner werden, ΔT aber zunimmt, kann zum einen an der stärker angestiegenen Kohlendioxid-Konzentration, zum andern aber auch an den nach 1990 starken El Niño-Ereignissen und gleichzeitig positiven Phasen der Pazifischen Dekaden-Oszillation (PDO+) sowie an stärker auftretendem Vulkanismus liegen.

In einem als multiple Regressionsanalyse bezeichneten statistischen Analyseverfahren wurden die für die Beziehung zwischen der abhängigen Variablen ΔT

und den beiden unabhängigen Variablen aa und passenden Wichtungen und für die beiden unabhängigen Einflussfaktoren mit Hilfe des unter Abbildung 25c notierten Ansatzes ermittelt. Die Korrelationsrechnungen ergaben Klimasensibilitäten zwischen $0,5^\circ\text{C}$ und $1,5^\circ\text{C}$ für die Verdoppelung der CO_2 -Konzentrationen und Werte zwischen $0,017^\circ\text{C}$ und $0,032^\circ\text{C}$ bei Änderung der Stärke der magnetischen Flussdichte um ein Nanotesla. Für optimale Kombinationen von w_{aa} und CO_2 konnte im Rahmen dieser Regressionsanalyse gezeigt werden, dass die jeweils über 25 Jahre gemittelten Daten mit den modellierten Temperaturdaten bis zum Jahre 2010 recht gut übereinstimmen. Dies würde für einen durchaus vergleichbar starken Einfluss des Kohlendioxids als auch der Sonnenaktivität auf das Erdklima sprechen.

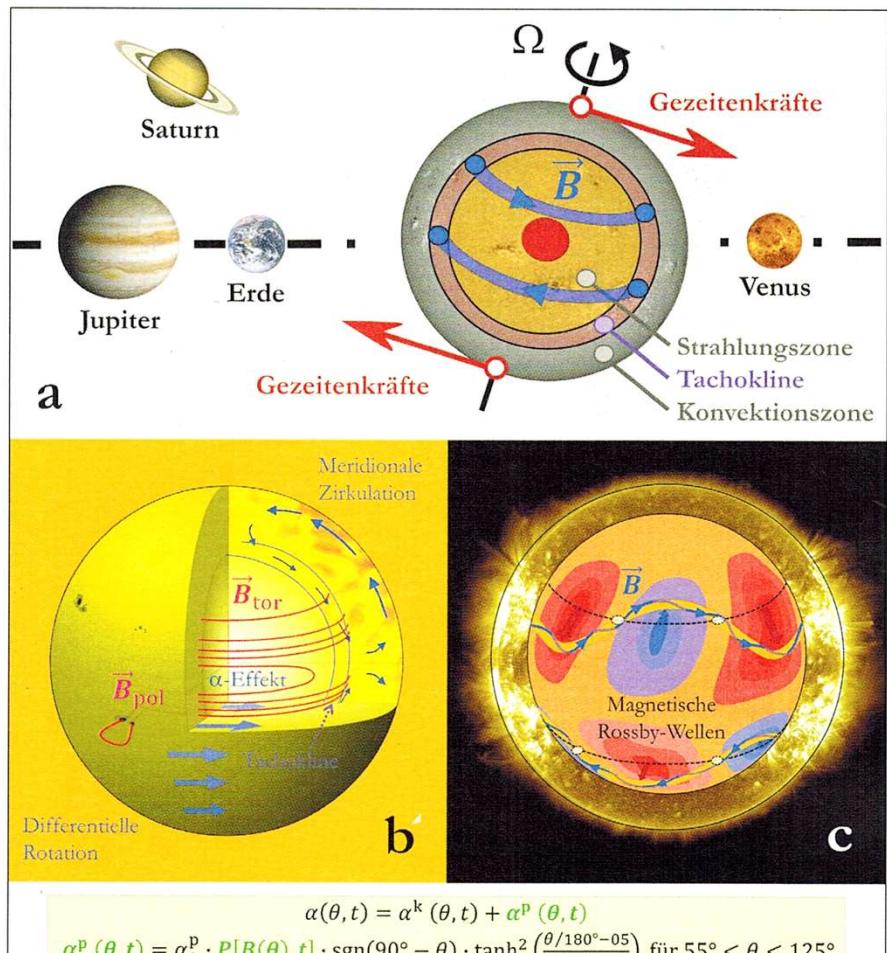
Basierend auf den Ergebnissen der Modellrechnungen zur Anregung von Rossby-Wellen durch planetare Gezeitenkräfte, durch die die zukünftige Entwicklung solarer Dynamoprozesse mit variierender Stärke des α -Effekts und den sich überlagernden solaren Aktivitätszyklen näherungsweise ermittelt wurde, hat Stefani schließlich auch vorsichtige Abschätzung für die mögliche Entwicklung der Temperaturveränderungen bis zum Jahre 2150 durchgeführt. Für den CO_2 -Entwicklungstrend hat er dabei drei Szenarien gerechnet, bei denen er von einer stark bzw. nur gering zunehmenden sowie einer abnehmenden Konzentration ausgegangen ist. Die graphische Veranschaulichung seiner Ergebnisse für geringe Zunahme der Kohlendioxid-Konzentration in Bild 25c lässt erkennen, dass die Temperaturen, abhängig vom Zeitraum, für den die Basisdaten zur Vorhersage verwendet wurden, in den nächsten 150 Jahren maximal um 1°C ansteigen sollten. Möglicherweise können solche Vorhersagen aufgrund solarer und anthropogener Einflussfaktoren allerdings durch Temperaturänderungen im Verlaufe der Entwicklung des aktuellen Milankovitch-Zyklusses gestört werden.

Resumee

Heute wissen wir, dass die eindimensionale, lineare Betrachtungsweise, die Wilhelm Herschel Ende des 18. Jahrhunderts veröffentlichte, nach der die Anzahl der Sonnenflecken

wesentlich für die Entwicklung des Klimas und indirekt dadurch auch der Weizenpreise auf der Erde sein könnte, allzu naiv und nicht ganz richtig sein kann. In dieser Artikelserie wurde versucht, die ungeheure Vielfalt, Komplexität und Nichtlinearität des Klimageschehens, die unterschiedlichsten Korrelationen zwischen klimarelevanten Messgrößen sowie qualitative wissenschaftlich oder zumindest plausible Begründungen dafür vorzustellen, ohne abschließend wirklich verlässliche quantitative Aussagen über das jeweilige Ausmaß der Bedeutung der einzelnen Klimaeinflussfaktoren machen zu können und zu wollen. So viele kosmische, dem Klimasystem mit seinem komplexen Strahlungshaushalt, vielfältigen Speicher- und Energietransportprozessen innewohnende oder von uns Menschen nicht nur durch verstärkten Ausstoß von Treibhausgasen beeinflusste, auf sehr unterschiedlichen Raum- und Zeitskalen sich lokal oder global überlagernde, mehr oder weniger periodisch resonanzartig ablaufende Wechselwirkungsprozesse können miteinander konkurrieren. Sehr wohl ist es aber auch die magnetische Sonne, die nicht nur das Weltraumwetter in unserem Sonnensystem, sondern als energetischer Motor auch das Erdklima entscheidend mitbestimmt. [64], [7]

Auch wenn die Variabilität der Sonneneinstrahlung allein nicht ausreicht, um die zeitlichen Veränderungen des Erdklimas durch den Sonneneinfluss zu erklären, so wurden in dieser Artikelserie doch einige weitere wichtige, von der Sonne vermittelte Mechanismen vorgestellt, die sehr wohl klimarelevant sein können und deshalb in Zukunft auch weiterhin genauer erforscht werden müssten. Die im Verlaufe der Sonnenzyklen stark variierende UV-Strahlung nimmt nicht nur Einfluss auf die stratosphärische Ozonschicht und die angrenzenden Troposphären-Schichten. In den Ozeanen kann sie außerdem Auswirkungen auf das Wachstum des Phytoplanktons und die Produktion von Dimethylsulfid-Molekülen haben, die als Kondensationskeime die Wolkenbildung fördern. Auch das im Sonnenwind abströmende heliosphärische Magnetfeld, das den Einstrom galaktischer kosmischer Strahlung in die Erdatmosphäre moduliert, beeinflusst die Entwicklungen sowohl in der Ozonschicht als auch der Wolken. Und Son-



$$\alpha(\theta, t) = \alpha^k(\theta, t) + \alpha^p(\theta, t)$$

$$\alpha^p(\theta, t) = \alpha_0^p \cdot P[B(\theta), t] \cdot \text{sgn}(90^\circ - \theta) \cdot \tanh^2\left(\frac{\theta/180^\circ - 0.05}{0.2}\right) \text{ für } 55^\circ < \theta < 125^\circ$$

24 Zeitliche Taktung solarer Dynamoprozesse durch magnetische Rossby-Wellen, die unter Einfluss planetarer Gezeitenkräfte in der Tachokline angeregt werden. **a** Kumulierte planetare Gezeitenkräfte nehmen Einfluss auf die Entwicklung magnetischer Feldstrukturen in einer leicht asphärischen Tachokline. **b** Differentielle Rotation (ω -Effekt), der α -Effekt sowie meridionale Zirkulation treiben im Laufe der Aktivitätszyklen periodisch oszillierende Dynamoprozesse in der Konvektionszone der Sonne, in der poloidale (B_{pol}) und toroidale (B_{tor}) Magnetfelder wechselseitig ineinander umgewandelt werden, und Sonnenflecken durch magnetischen Auftrieb toroidaler Felder beim Durchstoß durch die Sonnenoberfläche entstehen (siehe Bild 7). **c** Magnetische Rossby-Wellen steuern den Aufstieg toroidaler Feldstrukturen aus der Tachokline. Die unten aufgeführten Gleichungen vermitteln einen Eindruck von der komplexen Form des in den Modellrechnungen verwendeten α -Effekts, der vom heliographischen Co-Breitengrad θ und der Zeit t abhängt, der sich aus einem klassischen Anteil $\alpha^k(\theta, t)$ und einem unter Einfluss der Rossby-Wellen periodisch variierten Anteil $\alpha^p(\theta, t)$ zusammensetzt. U. v. Kusserow, NASA, R. Arlt/AIP

• Planeten getaktete Sonnenaktivität und das Erdklima

<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2023SW003852>

• Frank Stefani - Harmonically forced and synchronized dynamos: theory and experiments - IPAM at UCLA <https://www.youtube.com/watch?v=6kj3baD1YmM>

nenstürme erzeugen geomagnetische Stürme, elektrische Aufladungen, Ströme und Abwärtswinde in den äußeren Atmosphärenschichten, die verstärkt vor allem polnah in tiefere Atmosphärenschichten vordringen und hier klimarelevant wirksam werden können. Wie beim möglichen Einfluss der Planetenkonstellationen auf die Sonnenaktivität kann bis heute aber für keinen dieser Mechanismen der Grad ihrer Relevanz für die Entwicklung des Erdklimas ausreichend verlässlich ermittelt werden. [65]

Literatur

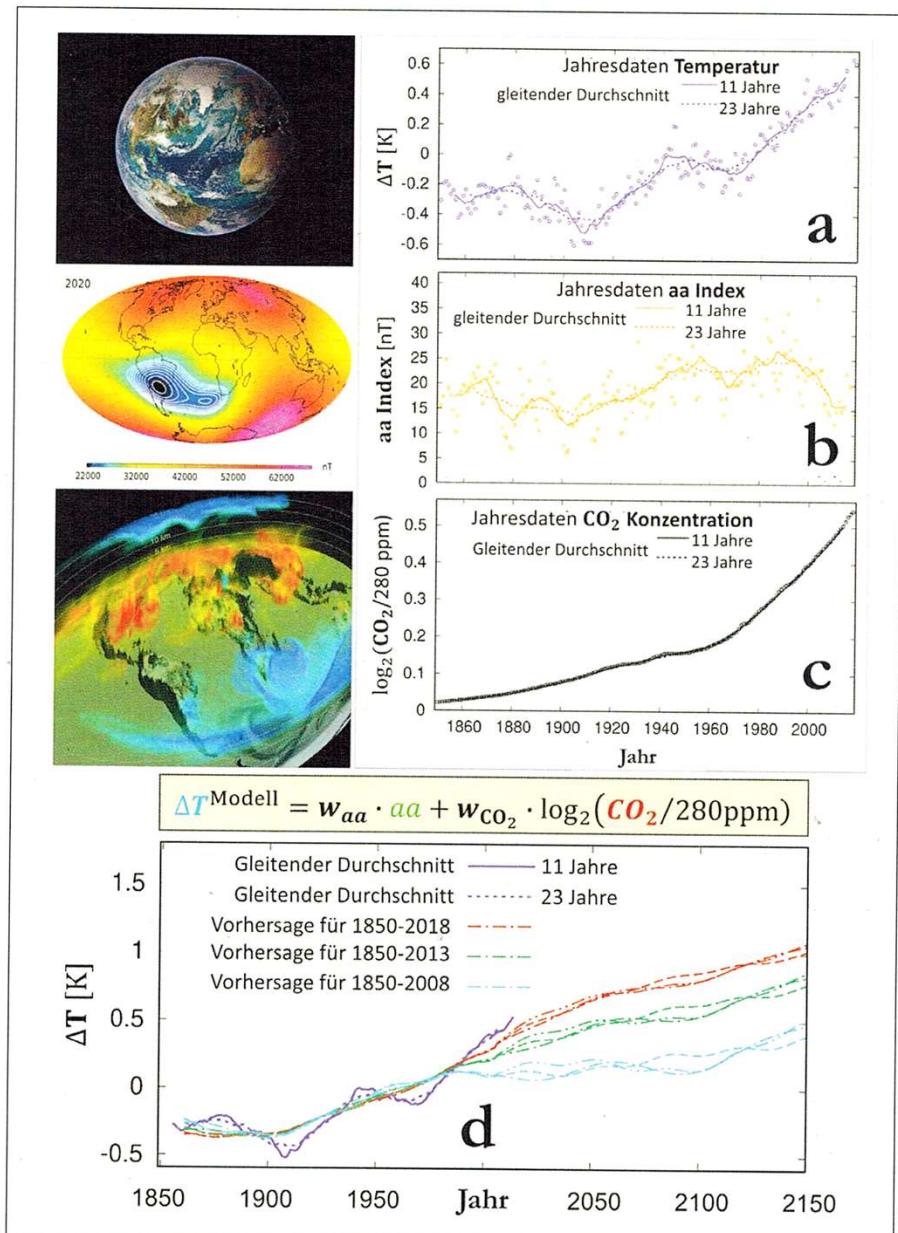
[37] von Kusserow, U.: Bremer Klimatage der Olbers-Gesellschaft e. V. 1996-2000 <https://ulrich-von-kusserow.de/index.php/artikel>

[38] von Kusserow, U.: Die Sonne, das Erdklima und das Leben auf unserem Planeten (1-8). 2008-2013 <https://ulrich-von-kusserow.de/index.php/artikel>

[39] Stefanie Kaboth-Bahr, S., Mudelsee, M.; The multifaceted history of the Walker Circulation during the Plio-Pleistocene. ELSEVIER Quaternary Science Reviews, Volume 286, June 2022 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273779122001603>

[40] Baldenhofer K.: El Niño / Southern Oscillation im Blick der Fernerkundung, Friedrichshafen, 2017 https://www.enso.info/material/anhang/ENSO_und_Fernerkundung.pdf

[41] Baldwin M. P. et al. The quasi-biennial oscillation. Reviews of Geophysics, Volume 39, Issue 2,



25 Basisdaten von 1850–2018 für eine multiple Regressionsanalyse zur Ermittlung der jeweiligen Stärke der Abhängigkeit (siehe relative Wichtungen w_{aa} bzw. w_{CO_2} in der notierten Formel) der Schwankungen der Meeresoberflächentemperaturen (ΔT , **a**) von den Schwankungen der Sonnenaktivität (repräsentiert durch den aa -Index des Erdmagnetfeldes (**b**) sowie der logarithmischen Konzentration ($CO_2/280\text{ppm}$) des Kohlendioxids relativ zur aktuellen Konzentration (**c**). Für drei unterschiedliche Zeiträume der verwendeten Basisdaten veranschaulicht Bild **d** die Ergebnisse modellierter Vorhersagen für die zu erwartenden Temperaturänderungen ΔT bis zum Jahre 2150 für jeweils drei verschiedene aa -Index-Entwicklungen unter der Bedingung, dass die Kohlendioxidkonzentration zukünftig nur moderat ansteigt.

• Solare und anthropogene Einflüsse auf das Erdklima - Dr. Frank Stefani <https://www.youtube.com/watch?v=7KAiwCkapOg>

- 2001 <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/1999rg000073>
[42] Waugh D. W., Sobel A. H., Polvani L. M.: What Is the Polar Vortex and How Does It Influence Weather? BAMS, Volume 98, Issue 1, 2017 https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/98/1/bams-d-15-00212.1.xml?tab_body=pdf
[43] Jetstreams, Zyklone und der Nordatlantik. K. L. S. Publishing, E-Journ Nr. Pt-05, Köln <http://klspublishing.de/ejourns/e-Journ%20Pt-05%20Jetstreams%20Zyklone%20und%20der%20Nordatlantik.pdf>
[44] Shaviv, N The Spiral Structure of the Milky way, Cosmic ray, and Ice Age Epochs on Earth. New Astronomy, Volume 8, Issue 1, January 2003 <https://>

- www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1384107602001938?via%3Dihub
[45] Opher, M., Loeb, A., Peek, J. E. G.: A possible direct exposure of the Earth to the cold dense interstellar medium 2–3 Myr ago. Nature Astronomy, Vol. 8 | August 2024 <https://www.nature.com/articles/s41550-024-02279-8>
[46] Alves, J., Maconi, E., Bittermann, T.: Die galaktische Reise unseres Sonnensystems. Pressemitteilung Universität Wien, 2025 <https://medienportal.univie.ac.at/media/aktuelle-pressemeldungen/detailansicht/artikel/die-galaktische-reise-unseres-sonnensystems/>
[47] H.-W. Ou: Resolving the Faint Young Sun Paradox and Climate Extremes: A Unified Thermodynamic Clo-

sure Theory. Climate 2025, 13(6) <https://www.mdpi.com/2225-1154/13/6/116>

[48] Strobel, R.: Sonne und Erde eigentlich schlechte Kandidaten für Leben. Spektrum News 13.08.2009 <https://www.spektrum.de/news/sonne-und-erde-eigentlich-schlechte-kandidaten-fuer-leben/1004607>

[49] Camuffo, D.: Lunar Influences On Climate. In: Earth, Moon and Planets, Kluwer Academic Publishers, 2001 https://www.researchgate.net/publication/226454722_Lunar_Influences_On_Climate

[50] M. J. Way, M. J.: The Climates of Earth's Next Supercontinent: Effects of Tectonics, Rotation Rate, and Insolation Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 22, e2021GC009983 2021 <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2021GC009983>

[51] Kunio Kaiho, K., Oshima, N.: Site of asteroid impact changed the history of life on Earth: the low probability of mass extinction. Sci Rep 7, 14855 (2017). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14199-x>

[52] Büntgen, U.: Volcanoes, Climate, and Society. Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 2026. 54:1.1–1.31 https://www.climatology.uni-mainz.de/files/2025/06/Buettgen_2025_AREPS.pdf

[53] Shaviv, N. J., Veizer, J. (2003): Celestial driver of Phanerozoic climate? GSA Today, Volume 13, Number 7, 2003 https://stephenschneider.stanford.edu/Publications/PDF_Papers/shaviv-veizer-03.pdf

[54] Svensmark, J. et al. The response of clouds and aerosols to cosmic ray decreases. JGR Space Physics Volume 121, Issue 9 September 2016 <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2016JA022689>

[55] Henrik Svensmark, H. et al. Atmospheric ionization and cloud radiative forcing. Sci Rep 11, 19668 (2021)

[56] Svensmark, H.: Cosmic ray, Clouds and Climate. Euro Physics News 2015 <https://www.europhysicsnews.org/articles/epn/pdf/2015/02/epn2015462p26.pdf>

[57] Scafetta, N., Bianchini A.: The Planetary Theory of Solar Activity Variability: A Review. Front. Astron. Space Sci., August 2022 <https://www.frontiersin.org/journals/astromony-and-space-sciences/articles/10.3389/fspas.2022.937930/full>

[58] Abreu, J. 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>

[59] Stefani, F.: Sonnenzyklen neu gedacht - Neues physikalisches Modell stärkt Planetenhypothese. HZDR Pressemitteilung 27. Mai 2024 <https://www.hzdr.de/db/Cms?pOid=71921&pNid=3438>

[60] Stefani, F., Stepanov, R., Weier, T.: Shaken and Stirred: When Bond meets Suess-de Vries and Gnevyshev-Ohl. Solar Physics (2021) 296:88 <https://link.springer.com/article/10.1007/s11207-021-01822-4>

[61] Stefani, F.: Dämpfer für die Sonne - Einfluss der Planeten könnte Sonnenaktivität drosseln. HZDR Pressemitteilung 12. August 2025 <https://www.hzdr.de/db/Cms?pOid=75402&pNid=0&pLang=de>

[62] Stefani, S. et al.: Adding Further Pieces to the synchronization Puzzle: QBO, Bimodality, and Phase Jumps. Solar Physics (2025) 300:110 <https://link.springer.com/article/10.1007/s11207-025-02521-0>

[63] Stefani, F.: Solar and Anthropogenic Influences on Climate: Regression Analysis and Tentative Predictions. Climate 2021, 9, 163 https://www.researchgate.net/publication/355896913_Solar_and_Anthropogenic_Influences_on_Climate_Regression_Analysis_and_Tentative_Predictions

[64] Vahrenholt, F., Lüning, S.: Unerwünschte Wahrheiten: Was Sie über den Klimawandel wissen sollten. Langen Müller Verlag GmbH, München 2020

[65] Vahrenholt, F., Lüning, S.: Die kalte Sonne: Warum die Klimakatastrophe nicht stattfindet. Hoffmann und Campe Verlag GmbH, Hamburg 2012

Ulrich von Kusserow

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