

Dr. Stefan Uhlig



EL CAMBIO CLIMÁTICO NATURAL

Aspectos geológicos,
arqueológicos y astrofísicos

WELTBUCH

Pie de imprenta

© 2022
WELTBUCH Verlag GmbH
Sargans, Suiza

www.weltbuch.com

1ª edición, español
Edición electrónica, 03/2022
ISBN 978-3-906212-97-5
(La versión impresa se publicará en 02/2022 con el ISBN 978-3-906212-98-2)

Diseño de portada: Dirk Kohl, Annalena Kohl, Weltbuch Verlag
Foto de portada: A. Kohl / Adobe Stock
Diseño del libro, composición tipográfica: Dirk Kohl, Weltbuch Verlag
Ilustraciones/tablas: Proporcionado por el Dr. Stefan Uhlig. Cuando es necesario, se indican las referencias en la figura o tabla correspondiente.
Si una ilustración/tabla no está suficientemente protegida por los derechos de autor, pedimos disculpas y solicitamos que se nos informe para que se corrija en ediciones posteriores.

Producción total: Weltbuch Verlag GmbH, Suiza

Todos los derechos reservados

Breve descripción

Con su concepto del mundo, donde el Sol y el Universo giran alrededor de la Tierra, los poderosos y los "influenzadores" de la Europa medieval colocaron al hombre, como especie dominante de la Tierra, en el centro del Universo. Una situación similar de nuestros tiempos es la heterodoxia que el ser humano se crea capaz de poder provocar o controlar los cambios climáticos por la emisión de CO₂ de origen antropogénico.

En este libro se describen los cambios climáticos naturales, sus testigos y los efectos en la evolución de la temperatura de la atmósfera terrestre y del nivel del mar durante los últimos millones de años. A la vez se explican y discuten las razones y los procesos desde los puntos de vista geológico, arqueológico y astrofísico. Se demuestra que muy complejos mecanismos astrofísicos y heliofísicos son los que provocan los cambios climáticos con episodios repetitivos a largo y a corto plazo, sin que el hombre pudiera influirlos de ninguna manera, ni tampoco por el aumento o la reducción de la contribución antropogénica de CO₂.

Se intentó a escribir este libro en un estilo que fuera fácilmente comprensible para todos aquellos que

viéndose afectados por las importantes y trascendentales consecuencias políticas del Cambio Climático, deseen formarse una idea propia de este tema, tan actual y controvertido. También es intención del libro animar, sirviendo como referencia resumida, a la nueva generación científica para seguir investigando sobre este amplio e interesante tema.

Contenido

Prólogo

1. ¿Qué es el clima?
2. Épocas glaciales (períodos de frío) y Épocas interglaciales (períodos de calor)
3. La posición de la Tierra en nuestro Sistema Solar
4. Nuestro Sol pulsante
5. El planeta azul - sin océanos todo sería muy diferente
6. El clima y nosotros - ¡no nosotros y el clima!
7. Fenómenos meteorológicos extremos
8. El ascenso y el descenso del nivel del mar
9. El vaivén de los glaciares
10. El efecto invernadero y gases de efecto invernadero
11. La parte fría de las erupciones volcánicas
12. ¿Qué pasó con el agujero de ozono?
13. Hablando de osos polares e hipopótamos
14. Un tema relacionado - las partículas finas

Epílogo

Bibliografía

Sobre el autor

Prólogo

El objeto de este trabajo es aportar algunos datos a la actual polémica sobre el Cambio climático dado el carácter más emocional que racional de muchas discusiones, muy influidas por cuestiones ideológicas, a menudo con escasa base científica que además mezclan con otros temas del medio ambiente. El origen del continuo Cambio climático es muy complejo y no se puede explicar por un solo factor como es la concentración del dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera. Las temperaturas de la atmósfera terrestre están subiendo constantemente, si bien con interrupciones, desde el final de la última Época glacial hace unos 12.000 años, aumento compaginado con una subida del nivel del mar de los océanos. Si el calentamiento llegara al nivel del último Interglacial (Época cálida del Eem), hace unos 120.000 años, el nivel del mar subiría unos 6-9 metros más, al menos en algunas costas de la Tierra. Fue la continua subida del nivel del mar, por ejemplo, en los Países Bajos, lo que obligó a elevar los diques y terraplenes, desde la Edad Media. En consecuencia, estas actividades de salvamiento costero acabaran por observarse con frecuencia también en otras regiones de la Tierra.

Ya nuestros antepasados prehistóricos se sintieron impresionados y a la vez asustados por los fenómenos meteorológicos violentos, entonces incomprensibles y en ocasiones mortales, como eran por ejemplo rayos, truenos,

granizos y fríos glaciales. Partiendo de estos hechos, se desarrollaron las primeras religiones y las creencias en seres superiores, como por ejemplo el dios del trueno, que persistió hasta los tiempos de las tribus nórdicas europeas como dios Thor, e incluso perdura hoy día en el nombre alemán del día de la semana de "Donnerstag", como también "Thursday" en el mundo anglohablante. Como dios del trueno, Thor recorrió el cielo en su carro tronante tirado por dos machos cabríos lanzando relámpagos a la Tierra con su martillo (POHANKA 2018). Transcurridos más de 300 años desde la revolución científica de la Ilustración parece que se mantiene en nuestro "substrato Neanderthal" el temor arcaico a los fenómenos meteorológicos naturales catastróficos.

Esta aproximación al tema no sustituye a los numerosos trabajos científicos existentes, sino más bien quiere animar a tratar este amplio tema profunda- y críticamente. En las gráficas que se presentan, se demuestra entre otras la evolución de la radiación solar, del crecimiento vegetal, de la temperatura, del CO₂ etc., basándose en investigaciones científicas interdisciplinarias que utilizan elementos trazas, isótopos, pólenes, microfósiles y aún más en testigos de hielo, sedimentos lacustres y dendrocronología, sólo por mencionar los tipos de datos más importantes. Como no se pueden determinar directamente a las temperaturas y a la insolación de tiempos pasados, la ciencia se sirve de los llamados "proxies" (indicadores indirectos o "representantes" del acrónimo inglés). Entre otras, las concentraciones de los isótopos del ¹⁴C, ¹⁰Be (para la insolación) y del ¹⁸O (para la evolución de la temperatura) en suelos, sedimentos, testigos de hielo, organismos, etc. representan a los parámetros relevantes del clima. Además, hallazgos arqueológicos, por ejemplo, de los tiempos

romanos, están demostrando que el nivel del mar subió imparablemente desde tiempos preindustriales. Las correspondientes informaciones detalladas y los resultados particulares, como también las explicaciones de los correspondientes métodos analíticos, se pueden encontrar en la bibliografía, al final de este libro. Dignas de mención son las publicaciones de SIROCKO (2012), BGR (2004) y VAHRENHOLT & LÜNNING (2020).

Mientras se redactaba esta sinopsis de hechos climáticos, aparecieron progresivamente datos nuevos cada vez más interesantes, por lo que este trabajo y la bibliografía se ampliaron algo más de lo previsto. La intención de mi sinopsis no es convencer, sino llamar a examinar críticamente el actual pensamiento "*main stream*". Como bien puntualizó el filósofo español José Ortega y Gasset (1883-1955) con respecto al ensayo: "*Con mayor razón habrá de hacerse así en ensayos de este género, donde las doctrinas, bien que convicciones científicas para el autor, no pretenden ser recibidas por el lector como verdades. Yo sólo ofrezco "modi res considerandi", posibles maneras nuevas de mirar las cosas. Invito al lector que las ensaye por sí mismo; que experimente si, en efecto, proporcionan visiones fecundas; él, pues, en virtud de su íntima y leal experiencia, probará su verdad o su error.*"

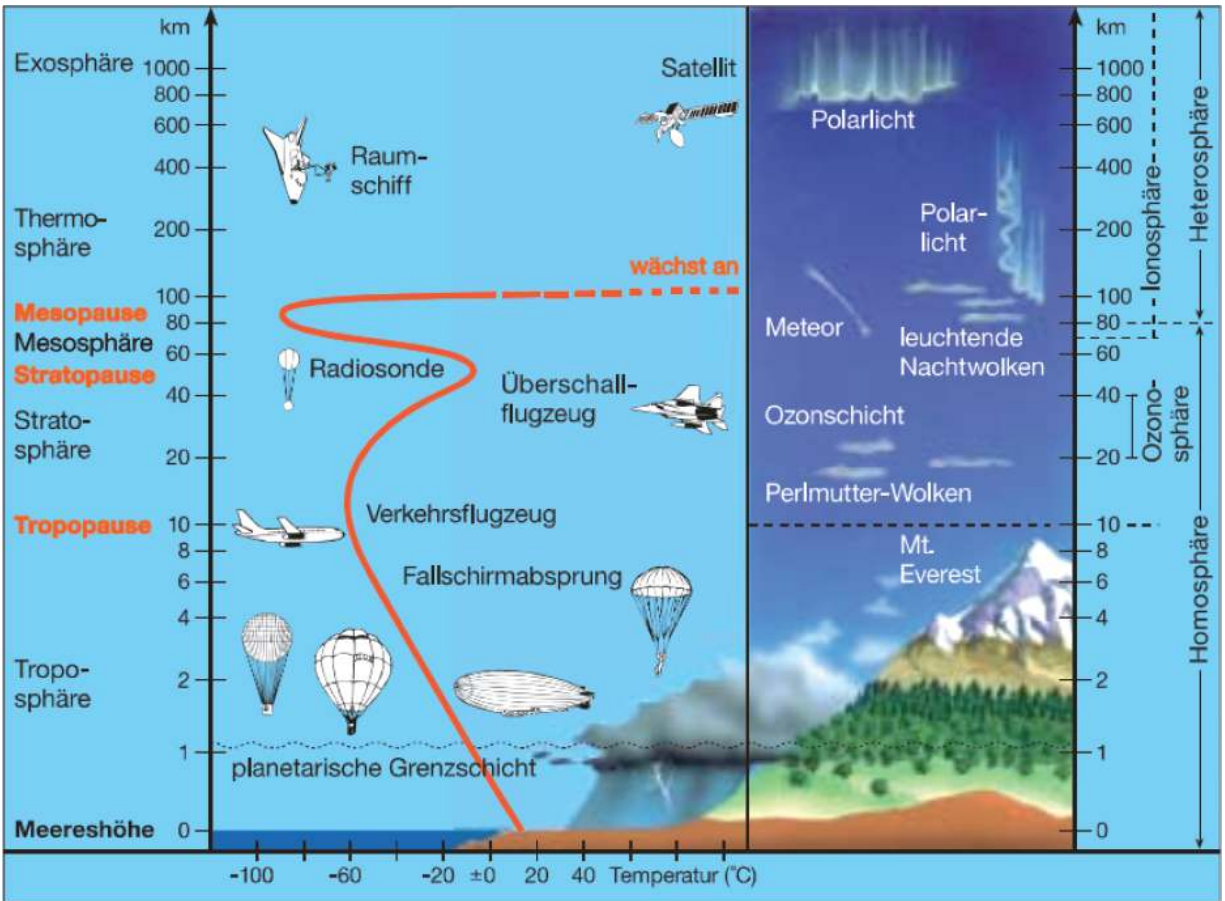
1.

¿Qué es el clima?

Nuestro planeta Tierra se divide en diferentes **Zonas climáticas**, como son las zonas polares, subpolares, templadas, subtropicales y tropicales (desde los polos al ecuador), por lo cual la expresión "clima global" no es correcta. El clima tampoco se puede enfriar o calentar. El clima se puede cambiar en el sentido que las zonas climáticas se desplazan continuamente, o sea que cambian continuamente - a escala de tiempo geológico. Es decir que la expresión "calentamiento del clima" no es correcta. Y la de "calentamiento del clima global" menos aún. Se refiere más bien a cambios de temperatura por desplazamientos continuos de las zonas climáticas. Tampoco tiene sentido la expresión "salvar el clima" porque el clima cambia continuamente de manera natural. Como vamos a ver, los cambios climáticos son, a fin de cuentas, controlados fundamentalmente por la energía del Sol. Si en lo que sigue se habla de temperaturas sin más especificación, es que nos referimos a la temperatura de la atmósfera inferior de la Tierra. Las diferentes zonas climáticas se caracterizan por la predominación de temperaturas y situaciones meteorológicas típicas. El **Tiempo atmosférico** o meteorológico describe los procesos físicos en la atmósfera para un lugar o terreno determinado y en un momento o corto período específico y está definido por diversos parámetros meteorológicos como la temperatura, la

presión, la humedad, el viento, la radiación solar y la precipitación. Por eso es importante diferenciar entre tiempo y clima.

Figura 1 (siguiente): Estructura de la atmósfera terrestre y la evolución de la temperatura del aire (**curva roja**) a lo largo de la altitud (eje Y, ¡ojo - escala logarítmica!) y en las diferentes capas atmosféricas. Los fenómenos meteorológicos ocurren principalmente en la troposfera. En su zona más alta, la temperatura del aire baja hasta unos -60°C . Encima sigue la estratosfera que puede intercambiarse con la troposfera. Por encima de unos 100 kilómetros de altitud, las temperaturas suben de nuevo por encima de los 0°C . La capa de ozono se encuentra dentro de la estratosfera en una altura entre 20 y 40 km (ver también al [Capítulo 12](#)).



Quelle: "Fonds der Chemischen Industrie" Folienserie 22 "Umweltbereich Luft", Ausgabe 1995 Graphik: diGraph 77933 Lahr

Fig. 1

Los fenómenos meteorológicos tienen lugar en la parte inferior de la atmósfera terrestre, principalmente en la **Troposfera** (Figura 1). Su altura varía entre los 8-10 km en los polos y los 16-18 km en el ecuador. En la superficie de la Tierra la temperatura media de la atmósfera es de unos +15°C. Hacia la zona de transición entre la troposfera y la estratosfera, llamada la tropopausa, la temperatura baja hasta unos -60°C. De media, la temperatura en la troposfera baja actualmente unos 6,5°C por cada kilómetro de altitud. Encima de la tropopausa, es decir en la estratosfera, las temperaturas del aire vuelven a subir hasta pocos grados por debajo de 0°C en una altura de unos 50 kilómetros. Por encima de la estratosfera, las

temperaturas bajan de nuevo hasta unos -80°C a -90°C en una altura de cerca de 85 kilómetros, para subir de nuevo por encima de 0°C a partir de altitudes de unos 100 kilómetros. En el [Capítulo 12](#), discutiendo el tema del ozono, se darán más detalles de la estratosfera y de la gran complejidad de los procesos térmicos, químicos y espectrales que ocurren en ella. Las diferentes capas atmosféricas están separadas por zonas de transición, por ejemplo, la tropopausa y la estratopausa, lo que se puede observar también por el desarrollo de las temperaturas atmosféricas ([Figura 1](#)). Si embargo, eso no significa que la atmósfera es un sistema cerrado como un invernadero, sino que entre las diferentes capas atmosféricas existen procesos internos de intercambio de corrientes de aire e interacciones de la radiación electromagnética.

La evaporación en la superficie terrestre mantiene la atmósfera húmeda en forma de vapor de agua, sobre todo encima de los océanos. El componente gaseoso de agua en la atmósfera (el **Vapor de agua**) se eleva de una media de un 0,3-0,4 % (o 3.000 - 4.000 ppm) disminuyendo rápidamente con la altitud. En las zonas inferiores de la troposfera, es decir cerca de la superficie, el porcentaje del vapor de agua atmosférico puede alcanzar hasta un 4 %. Los muy altos contenidos, de un 3-4 %, ocurren principalmente en el aire extremadamente húmedo de los trópicos. En cambio, las regiones polares son extremadamente secas. También la estratosfera contiene vapor de agua atmosférico, sobre todo en sus zonas inferiores, que asimismo puede jugar un papel importante en el desarrollo del tiempo atmosférico. Los fenómenos de interacción entre la troposfera y la estratosfera son objeto de intensivas investigaciones meteorológicas y físicas

actuales que se apoyan también en numerosos satélites de investigación.

El argumento principal que atribuye al dióxido de carbono (CO_2) como gas invernadero una influencia en el cambio de temperatura en la atmósfera terrestre, y en definitiva en el Cambio climático global, se basa en que el gas (CO_2), como otros gases atmosféricos, puede absorber parte de la radiación térmica reflejada de la Tierra que no puede perderse completamente hacia el Cosmos y por lo tanto calienta la Tierra. Sin embargo, esa capacidad de absorción de los distintos gases atmosféricos está relacionado a veces con muy estrechos sectores de longitudes de onda (o zonas espectrales) de la radiación térmica, característicos para cada gas atmosférico. Es importante abordar a este tema brevemente ya ahora mismo, para estar preparado para la discusión detallada del tema del CO_2 en el [Capítulo 10](#). La radiación solar que llega a la Tierra consiste de amplias bandas de muy diferentes longitudes de onda ([Figuras 2 y 75](#)). La radiación ultravioleta (UV) de onda corta que es maligna para los seres vivos está absorbida en mayor parte en la capa de ozono de la estratosfera media en unos 20-40 km de altura ([Figura 1](#)). En [Capítulo 12](#) el interesante tema del ozono se va a discutir en detalle.

La radiación de ondas largas que nos llega desde el Sol, sobre todo la luz visible, es de gran importancia tanto para la fotosíntesis de las plantas, como también la radiación infrarroja (IR) que no es absorbida o dispersada, o muy poco, por los gases de la atmósfera, que llega hasta la superficie de la Tierra pero tiene gran influencia en los sucesos meteorológicos y climáticos. En dirección contraria, la superficie de la Tierra emite radiación térmica

de longitudes de ondas largas hacia el Cosmos. Afortunadamente los gases de la atmósfera de la Tierra evitan que esta radiación térmica retransmitida abandone por completo la Tierra. Cada uno de esos gases atmosféricos actúa de distinta manera ante las radiaciones de distintas longitudes de onda, absorbiendo algunas casi en su totalidad y siendo medio transparentes a otras ([Figura 2](#)). La **Ventana atmosférica** de la Tierra cubre sectores de longitudes de onda (o zonas espectrales) de radiación solar que no son absorbidos o dispersados por los gases de la atmósfera, es decir que son las radiaciones que pueden llegar hasta la superficie de la Tierra (la parte **gráfica roja** en la [Figura 2](#)), como también en dirección opuesta, las radiaciones, sobre todo la radiación térmica de la Tierra, que puede escaparse hacia el Cosmos (la parte **gráfica azul** de la [Figura 2](#)). En el [Capítulo 10](#) vamos a discutir los detalles de estos procesos, sobre todo qué gases atmosféricos pueden absorber qué longitudes de onda y en qué dimensiones. La radiación cósmica de alta energía que actúa en la Tierra y las radiaciones secundarias relacionadas que también influyen la evolución de la temperatura atmosférica y del tiempo meteorológico, no están representadas en este concepto simplificado de radiación de la [Figura 2](#).

Figura 2 (siguiente): Concepto simplificado de la radiación (**2-A**) que llega a la Tierra desde el Sol (ventana atmosférica de onda corta en **rojo**) y radiación que es emitida desde la superficie terrestre hacia el Cosmos (ventana atmosférica de onda larga en **azul**); **2-B**: Absorción y dispersión total (0-100 por ciento, eje Y) de la atmósfera (radiación entrante y saliente); **2-C**: sectores de longitudes de onda (en μm , eje X) que pueden ser absorbidos por los diferentes gases atmosféricos. El vapor

de agua (H_2O) es el gas atmosférico que puede absorber los mayores sectores de longitudes de onda y muchos de ellos muy fuertemente o incluso en su totalidad; de https://de.wikipedia.org/wiki/Atmosphärisches_Fenster; ver también la [Figura 75](#).

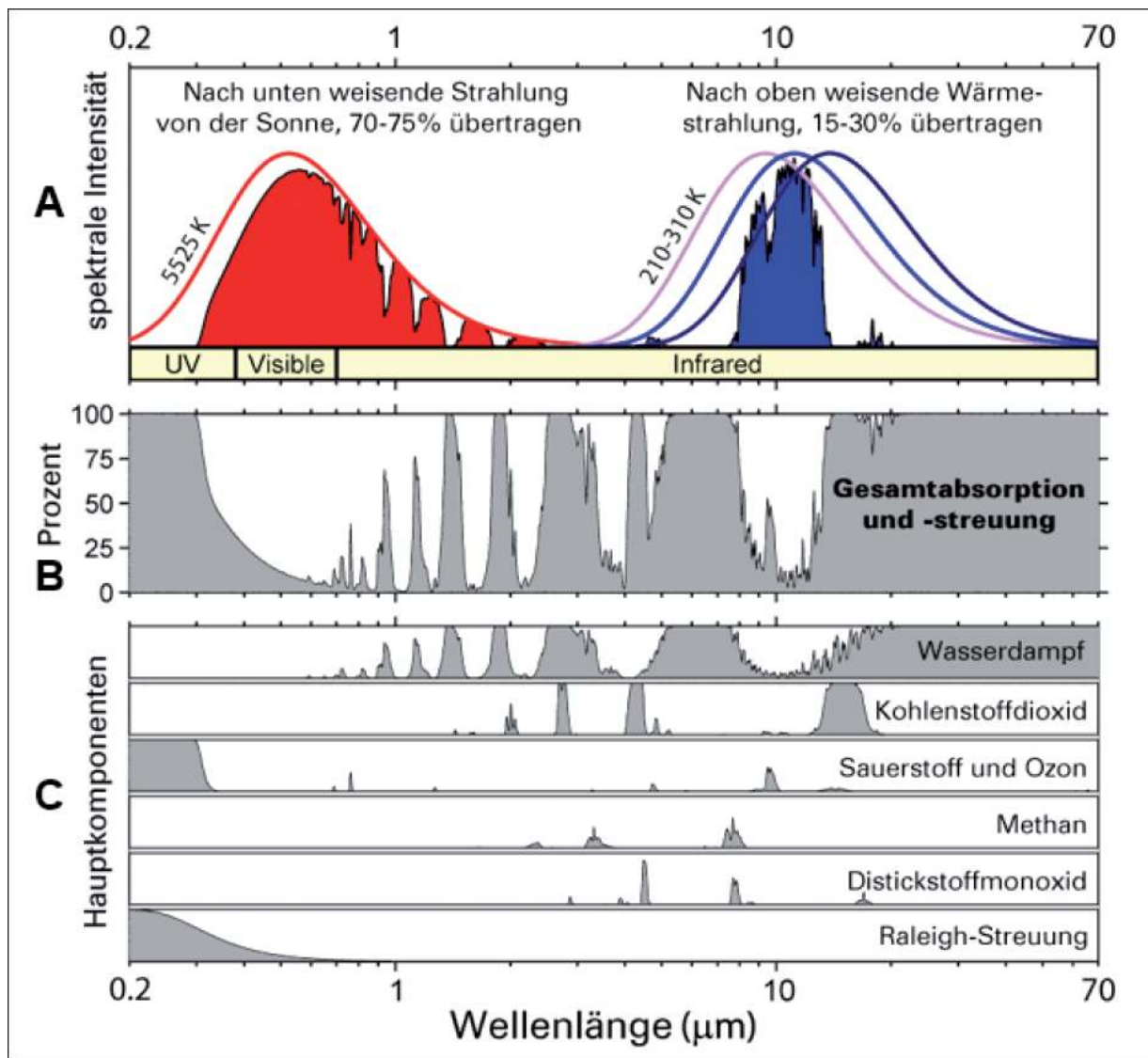


Fig. 2

Como podremos ver en lo que sigue, el clima de nuestro planeta, y correlativamente las temperaturas, han variado mucho durante la historia geológica. Por ejemplo, la parte

septentrional del Sáhara no fue siempre tan seca como hoy día. Desde haber finalizada la última Época glacial y hasta hace unos 5.000 años, el Sáhara era verde a causa de períodos repetidamente húmedos. Aparentemente se puede diferenciar una primera fase húmeda en el Sáhara que duró desde hace 11.000 a 8.000 años y una segunda fase húmeda entre hace 7.000 y 5.000 años. El arte rupestre prueba de existencia de grandes mamíferos en un Sáhara verde. Pinturas y grabados en cuevas presentan los típicos animales de la sabana, como son antílopes, elefantes, jirafas, rinocerontes, hipopótamos etc. Se han encontrado fósiles de grandes mamíferos, cáscaras de huevos de avestruz, polen y semillas, como también fragmentos de cerámica - todos indicativos de un ambiente habitable en estos tiempos para una fauna, incluido el hombre, y una flora correspondiente a un clima más húmedo que el actual. Fue hace unos 5.000 años cuando empezó repentinamente una fase muy árida en el norte de África que dura hasta hoy provocando una rápida desaparición de la vegetación en el Sáhara que corresponde aproximadamente con el comienzo del segundo máximo de temperatura del Óptimo climático del Atlántico (ver [Figura 6](#) y [51](#)). Probablemente fue también la razón de la concentración del desarrollo de la agricultura a lo largo del fértil y productivo valle del Nilo hace unos 4.000 a 3.000 años y del apogeo de las altas culturas de los faraones en Egipto. En la actualidad, se observa aparentemente un ligero aumento de las precipitaciones en el norte de África.

Aunque los fenómenos o tiempos meteorológicos dependen de las zonas climáticas, no se pueden equiparar con el clima. Fenómenos meteorológicos locales antropogénicos, como por ejemplo la formación de copos de nieve en invierno (en tiempos de heladas, se llama también "nieve

industrial") en la cercanía de fábricas (por ejemplo papeleras) que emiten vapor de agua, no son cambios climáticos, sino hechos meteorológicos locales. Otro fenómeno meteorológico antropogénico común, sobre todo en las zonas meteorológicas templadas, son los "focos de calor" de las ciudades y metrópolis modernas, que pueden ser hasta $+3^{\circ}\text{C}$ más cálidas en comparación con su entorno, dependiendo del tamaño de la urbe. Eso es provocado por la interacción de varios diferentes efectos, como por ejemplo un fuerte calentamiento de día (de su masa de edificios de hormigón y el asfalto en las calles) y un limitado enfriamiento de noche, lo que se intensifica sobre todo en invierno por las calefacciones.

Para entender mejor a la evolución de la temperatura en la Tierra será conveniente a hablar también de varios fenómenos meteorológicos y climáticos, sobre todo para poder valorar mejor y críticamente a ciertas noticias sensacionalista que muchas veces globalizan o fallan en describir correctamente las condiciones previas. Los océanos ocupan casi el 71 % de la superficie terrestre y tienen una gran influencia en los sucesos meteorológicos y climáticos de los continentes terrestres que principalmente se concentran en la actualidad en el hemisferio norte. La Tierra está ampliamente expuesta a la radiación solar en sus océanos cuyos enormes volúmenes de agua reaccionan por consecuencia fuertemente a las oscilaciones de la actividad solar. Por eso será muy importante hablar en el [Capítulo 5](#) detalladamente del sistema climático Sol - Océanos - Atmósfera para poder entender mejor los cambios climáticos.

2. Épocas glaciales (períodos de frío) y Épocas interglaciales (períodos de calor)

Los **Cambios climáticos** ya han existido desde hace millones de años, relacionados con cambios de temperatura, con épocas de tiempos fríos (períodos glaciales) y tiempos cálidos (períodos interglaciales), donde evidentemente la duración de los primeros fue siempre mucho más larga que la de los últimos. Durante el Cuaternario, es decir durante los últimos 2,56 millones de años, se pueden distinguir más de 20 cambios fuertes de períodos fríos y períodos cálidos. La mayoría (más o menos un 90 %) de los últimos 420.000 años fueron más fríos que en la actualidad, y períodos cálidos, como el que disfrutamos hoy día, son más bien la excepción en la historia de la Tierra ([Figura 3](#)). Sin embargo, también durante los últimos 12.000 años, es decir desde el fin de la última Época glacial de Würm, hubo períodos mucho más cálidos que hoy en día. Así fue por ejemplo durante el Óptimo climático del Atlántico hace unos 8.000 a 4.000 años (ver [Tabla 1](#), como también el [Capítulo 8](#) y las [Figuras 6 y 51](#)). Este período climático del Atlántico, llamado

también "Óptimo climático del Holoceno", se caracteriza por una mayor extensión de plantas de ambientes cálidos, como por ejemplo bosques mixtos de robles, la retirada de tundras sin árboles en las regiones septentrionales (o borales) del hemisferio norte y la subida del límite superior del bosque en las montañas.

Tabla 1 (siguiente): Resumen simplificado de los distintos períodos de épocas frías y cálidas de los últimos 885.000 años basado en la nomenclatura clásica. Las épocas cálidas son resaltadas en rojizo, las épocas frías en azulado. Ligeramente más pálidos se resaltan los períodos más cálidos ("Óptimos" o máximos) o más fríos ("Pésimos" o mínimos) del actual Holoceno, la época cálida que empezó hace unos 11.700 años, después del final de la última Época glacial. En la climatología moderna las diferentes épocas cálidas y frías son numeradas correlativamente a base de **Marine Isotope Stages (MIS, Estadios Isotópicos Marinos)**. En la columna derecha se presentan las diferencias del nivel del mar con respecto al nivel actual (ver también las [Figuras 49 y 50](#)).

approx. ages before Present (based on MIS)	MIS - Marine Isotope Stages	classic nomenclature of Glacial (cold) and Interglacial (warm) Periods	Sea level below (-) / above (+) today's level (in meters)
1.400 - 1.700 AD		Little Ice Age Climate Pessimum	
950 - 1.200 AD		Medieval Climatic Optimum	
350 - 550 AD		Migration Period Climate Pessimum	
50 BC - 250 AD		Roman Times Climate Optimum	- 3-4
8.000-4.000 before Present		Atlantic Period	- 20-30
11.700 till present	1	Holocene Interglacial	
115.000 - 11.700	2, 3a-c, 4, 5a-d	Würm/Weichsel/Wisconsin Glacial	- 130-140
126.000 - 115.000	5e	Eem Interglacial	+ 6-9
320.000 - 126.000	6a-e, 7a-e, 8a-c, 9a-d	Riss/Saale Glacial	- 140-150
335.000 - 320.000	9e	Holstein Interglacial	+ 10-15
475.000 - 335000	10a-c, 11a-b, 12a-c	Mindel/Elster Glacial	- 140-150
505.000 - 475.000	13a	Mindel-Günz Interglacial	+ 10-15
885.000 - 475.000	13 - 21	Günz/Cromer Complex	STU 2021

Tab. 1

En la [Tabla 1](#) se presenta un resumen de los cambiantes períodos de épocas frías y cálidas de los últimos 885.000 años que corresponden a menos de la mitad de la duración del Cuaternario de 2,56 millones de años. A la última Época glacial los científicos la llaman "Würm" en la región de los Alpes europeos que es un afluente del río Isar (Baviera, Alemania) porque en esta región se habían encontrado numerosos sedimentos glaciales y típicas formas y paisajes de la última glaciación. El avance glacial simultáneo que abarcó el norte de Alemania y de Polonia desde Escandinavia tiene el nombre "Weichsel" o "Vístula" (el río más largo de Polonia). En el norte del continente americano se aplica el nombre "Wisconsin" según el estado de los E.E.U.U. con el mismo nombre situado en la región de los Grandes Lagos. La época fría anterior se llama Glacial de "Riss" en los Alpes y Pre-Alpes y Glacial de "Saale" en el Norte de Alemania. Los glaciares de Escandinavia de la época fría de "Saale" avanzaron más hacia las tierras bajas del Norte de Alemania (hacia el sur) que los de la época

fría de "Weichsel". Aunque ahora esa terminología ha caído en desuso y ahora es habitual referirse preferentemente a los MIS (Estadios Isotópicos Marinos, [Figura 4](#)).

Los períodos glaciales se subdividen por diferentes mínimos y máximos de temperatura, como se puede ver en las [Figuras 3 y 4](#). [Figura 3](#) demuestra las oscilaciones de CO_2 y de las temperaturas de los últimos 420.000 años a base de investigaciones de testigos de hielo de la Antártida y de evaluaciones de datos índice "proxy" (representantes) relacionados. Se pueden diferenciar bien las tres últimas épocas cálidas (términos en **rojo**) y frías (términos en **azul**). A base de estos datos "representantes" se ve claramente que las concentraciones del CO_2 van detrás de la evolución de la temperatura (ver también el recorte detallado de la [Figura 76](#) y las correspondientes discusiones del [Capítulo 10](#)). La pregunta sobre la relación entre el CO_2 y la temperatura es similar a la de la discusión de ¿quién fue primero, el huevo o la gallina? Aquí hay que recordarse de la vieja regla básica para la interpretación de datos estadísticos que dice que encontrar **una correlación (aún) no es encontrar una relación de causalidad**. Como vamos a ver, la temperatura en la atmósfera terrestre depende de otros factores mucho más importantes que el CO_2 . Lo que ya se puede percibir en la [Figura 3](#), por ejemplo en el período de hace 420.000 a 400.000 de años, en que la **curva verde** de CO_2 claramente sigue a la **curva roja** de la temperatura. Eso significa que cuando el cambio de temperatura ya está en curso, bajando o subiendo la temperatura, la concentración de CO_2 empieza a seguirlo con cierto retraso de tiempo (aparentemente de unos cientos de años, por ejemplo en LÜDECKE 2010). Es decir que la concentración del CO_2 es más bien una función de la

temperatura del aire atmosférico (y de los océanos como vamos a ver) y no al contrario. Este tema se discutirá en detalle en el [Capítulo 10](#).

Figura 3 (siguiente): Cambios climáticos y evolución del CO₂ (**curva verde**) y de la temperatura (**curva roja**) durante los últimos 420.000 años (eje X) documentados en los núcleos (testigos) de hielo de Vostok (Antártida). Los 4 períodos fríos (de temperaturas mínimas) corresponden a las 3 últimas clásicas épocas glaciales (Mindel, Riss (en realidad abarcando dos períodos fríos) y Würm). Los muy cortos períodos cálidos (de temperaturas máximas) corresponden a las clásicas Épocas interglaciales (Holstein, Eem y el actual Holoceno); de BGR - Klimafakten (2004).

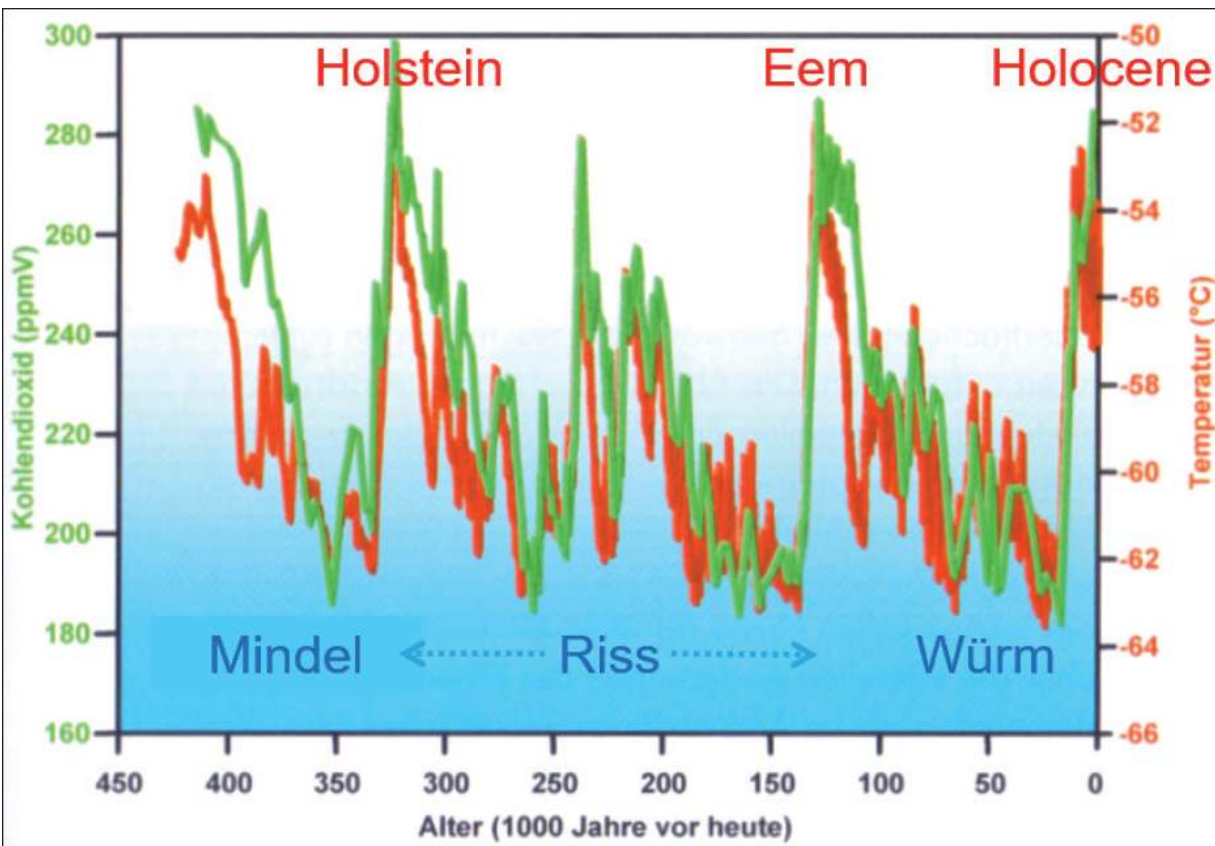


Fig. 3

La nomenclatura y asignación clásica de las diferentes épocas glaciales e interglaciales se basan en las investigaciones sistemáticas que los geólogos de campo iniciaron en el siglo XIX. Pero en los últimos 50 años, la datación fue objeto de evidentes ajustes, diferenciándose de las primeras clasificaciones geocientíficas de hace 200 años. LAUER & WEISS (2018), por ejemplo, llegan a la conclusión que la Época glacial Saale/Riss ya debería haber empezado hace unos 450.000 años, basado en determinaciones de edad modernas. Para evitar referirse a las muy variadas nomenclaturas regionales de las últimas épocas frías y cálidas y para estandarizarlas, hoy día se utilizan más a menudo los **Estadios Isotópicos Marinos (= MIS Marine Isotope Stages, [Tabla 1](#) y la [Figura 4](#))**, es decir a datos isotópicos de muestras de sedimentos marinos que nos dan indicaciones sobre las condiciones climáticas del pasado. La gran ventaja de los sedimentos de océanos y lagos (por ejemplo el lago de Laacher See, Alemania) es que ellos presentan normalmente una secuencia de estratos casi siempre completa e inalterada. En cambio, depósitos en tierra pueden estar alterados y/o superpuestos por avances glaciares posteriores y procesos de erosión.

Figura 4 (siguiente): 21 Estadios y subestadios Isotópicos Marinos (**MIS Marine Isotope Stages**) han tenido lugar en los últimos 830.000 años. La presentación inversa de los datos índice de $\delta^{18}\text{O}$ (‰ versus VPDB Vienna PeeDee Belemnite), representando un indicador indirecto („proxy") de la evolución de temperatura, muestra los valores índice bajos correspondiendo a temperaturas (y niveles de los océanos) elevados en la parte superior izquierda del eje Y. Se observa claramente una cierta periodicidad de los diferentes MIS, es decir de los picos o máximos de

temperatura. La **línea pálida** corresponde a los valores índice mínimos de $\delta^{18}\text{O}$, respectivamente la **línea azul claro** a los valores índice máximos de $\delta^{18}\text{O}$, de épocas glaciales típicas después de la última inversión del campo magnético terrestre (Brunhes-Matuyama) hace unos 781.000 de años; gráfica de RAILSBACK et al. (2015); ver también la [Tabla 1](#).

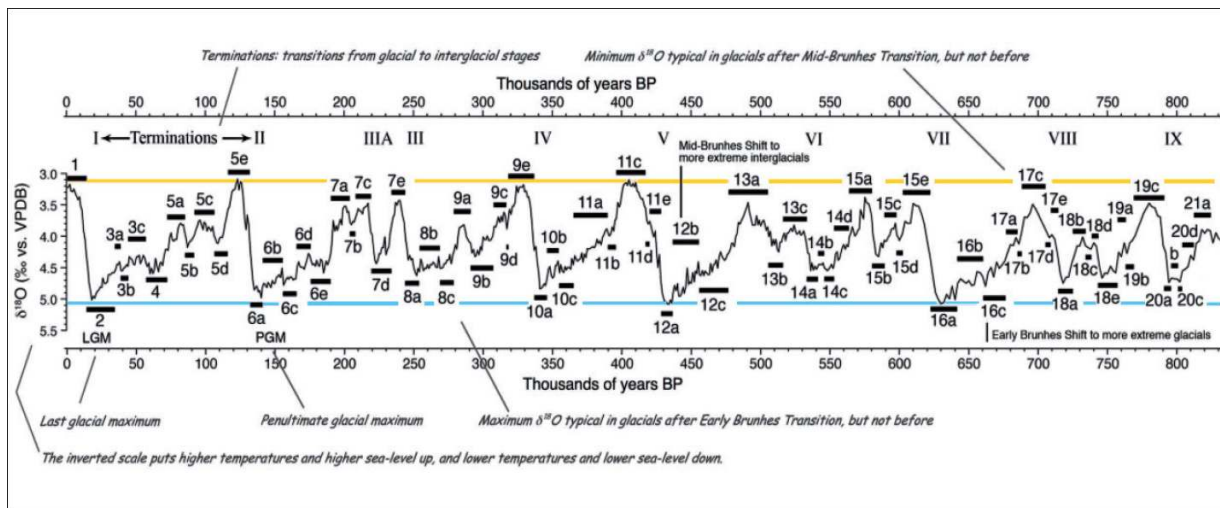


Fig. 4

En la [Figura 4](#) se presentan 21 de estos Estadios Isotópicos Marinos (MIS) cubriendo los últimos 830.000 años. La presentación inversa de los datos índice de $\delta^{18}\text{O}$, representando un indicador indirecto ("proxy") de la evolución de temperatura, enseña los valores índice bajos correspondiendo a temperaturas (y en consecuencia a niveles de los océanos) elevados en la parte superior del eje Y (quiere decir hacia arriba). Los isótopos de oxígeno $\delta^{18}\text{O}$ se determinaron en foraminíferos, que son protistas ameboides de unos pocos milímetros de diámetro, que se encuentran en los sondeos de sedimentos marinos. Cuando la condición de ambiente de los foraminíferos cambia a más fría, estos incorporan más del isótopo de oxígeno estable de

^{18}O . Es la razón de la presentación inversa de la [Figura 4](#): bajos valores índice de $\delta^{18}\text{O}$ (en el eje Y hacia arriba) corresponden a más altas temperaturas. En esta figura se pueden observar también las oscilaciones de temperaturas durante la historia reciente de la Tierra a las que se pueden identificar claramente intervalos de tiempo que demuestran una cierta repetición y regularidad. En el curso de los últimos 830.000 años presentados se pueden contar unos 21 estados isotópicos marinos, o 20 si contamos correctamente el primero y el último estadio a la mitad, lo que corresponde a un período medio de unos 39.500, o, respectivamente a unos 41.500 de años. Si consideramos en la [Figura 4](#) los diferentes pequeños y grandes máximos de temperatura, se pueden contar más o menos 38-40 diferentes picos de temperatura que correspondería a una duración media de los períodos de aproximadamente de 22.000 años. Con estos períodos aproximadamente de 41.000 y de 22.000 años de duración nos vamos a tropezar de nuevo más adelante en el [siguiente capítulo](#).

[Figura 5](#) presenta en más detalle la evolución de la temperatura y también de la insolación del Sol de los últimos 500.000 años. Aquí se puede observar claramente que las 4 épocas frías (glaciales) interrumpen 5 muy cortas épocas cálidas (interglaciales) donde los dos períodos fríos, en el centro (período de hace 320.000-126.000 años), corresponden a la clásica Época glacial llamada antiguamente "Riss". La evolución de la temperatura en la Tierra durante el período del actual Interglacial del Holoceno, es decir de los últimos 11.700 años, se presenta en la [Figura 6](#) donde se observa una etapa cálida hace 8.000-4.000 años, el llamado Óptimo cálido del Atlántico, de que hablamos antes, cuando las temperaturas estaban varios grados por encima de la temperatura actual. Incluso,

no se puede descartar que tal vez el período más cálido del Atlántico fue el período más cálido de todo el actual Interglacial de Holoceno.

Figura 5 (siguiente): Evolución de temperatura (basado en el "proxy" Deuterio (^2H)) durante las 4 últimas épocas glaciales. Curva izquierda: períodos fríos ("kalt") hacia la izquierda, períodos cálidos ("warm") hacia la derecha, ver también la [Figura 3](#). Curva derecha: desarrollo de la insolación (en wátios por m^2) en el mismo período, como también una predicción de los próximos 100.000 de años; gráfica de SIROCKO (2012).

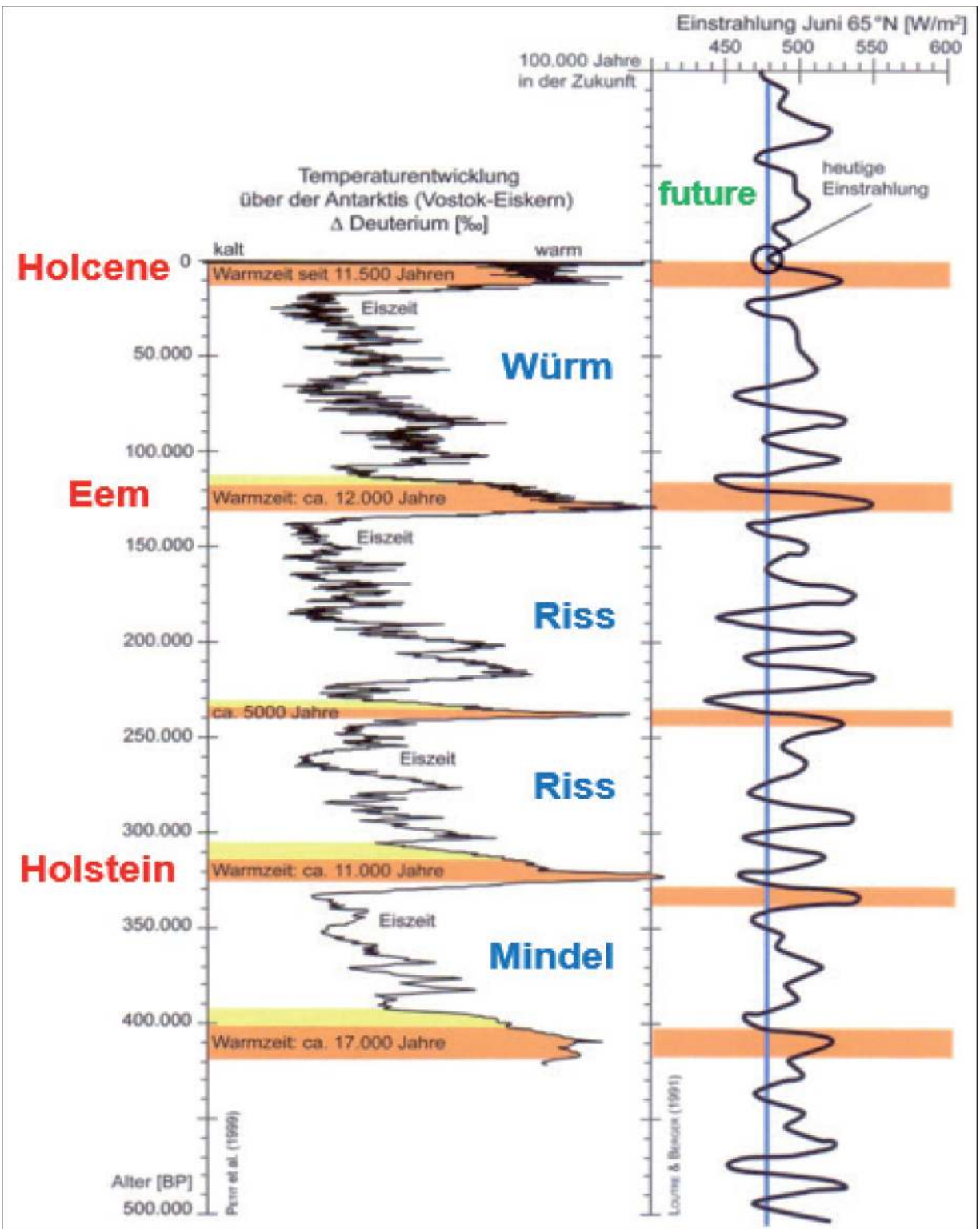


Fig. 5