
Eiszeit – Warmzeit; Die Rolle der Sonne

Themenheft zu den Grundlagen des Klimawandels

© Marc Eyer, 2009

Abteilung Physik, Gymnasium Neufeld, Bern

1 Variable Landschaften und Klimazonen

☞ Das Klima auf der Erde hat sich im Verlaufe der Erdgeschichte immer wieder verändert. Dabei haben sich auch die Landschaftstypen und Klimazonen auf der Erde immer wieder räumlich verschoben. Eine grüne Sahara oder das Berner Mittelland unter meterdickem Eis; Zustände, die wir uns heute nur schwer vorstellen können.

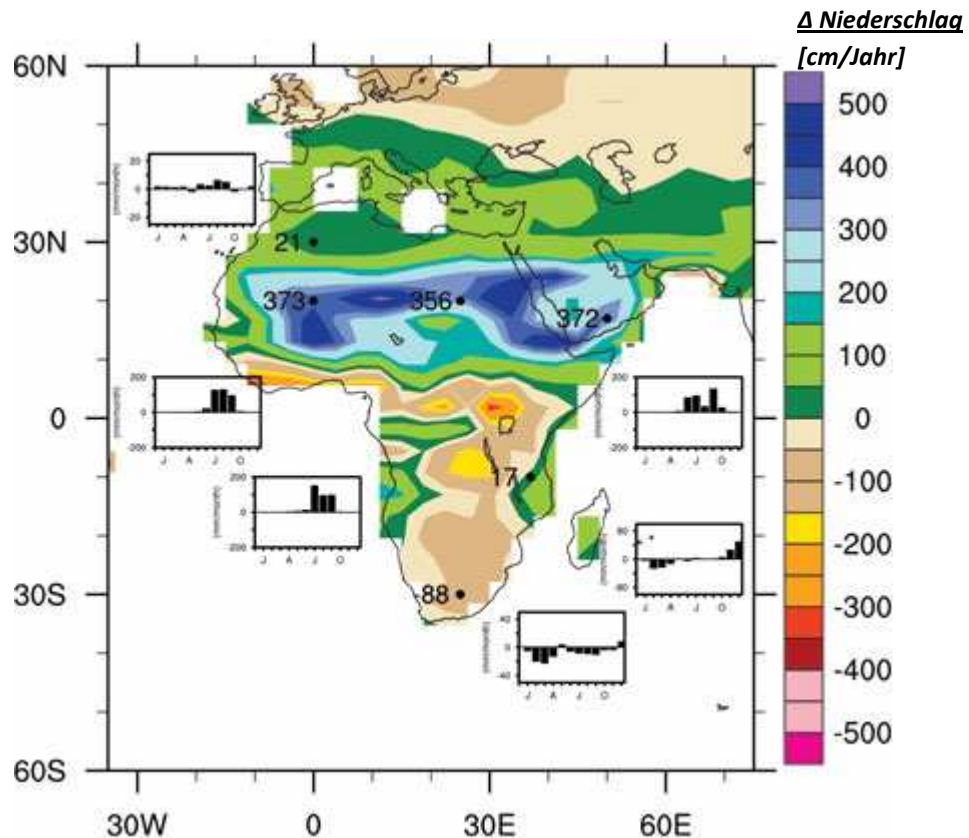


Abbildung 1: Die Abbildung zeigt die Resultate einer Computersimulation (CCSM2), welche die **Veränderung** der jährlichen Niederschlagsmenge über Afrika (in cm Wassersäule) von vor 8500 Jahren gegenüber heute errechnet hat. So bedeutet der Wert 21, dass dort der jährliche Niederschlag um 21 cm höher war als heute. (Quelle: National Center for Atmospheric Research (NCAR) in Boulder, Colorado; <http://www.cgd.ucar.edu/asr/asr03/ccr/index.html>)



1. Interpretiere die Abbildung 1. Schreibe stichwortartig auf, was sich wo verändert hat. Schlage in einem Atlas nach, wie viel die Niederschlagsmenge heute in der Sahara etwa beträgt. Wie gross war demzufolge die totale jährliche Niederschlagsmenge in der Sahara vor 8500 Jahren? Mit was für einer Region ist das heute vergleichbar?
2. Betrachte die Abbildung 2. Schau auf einer Karte nach, wie weit sich der Aaregletscher heute erstreckt. Vergleiche dies mit dem Stand von vor 18'000 Jahren.

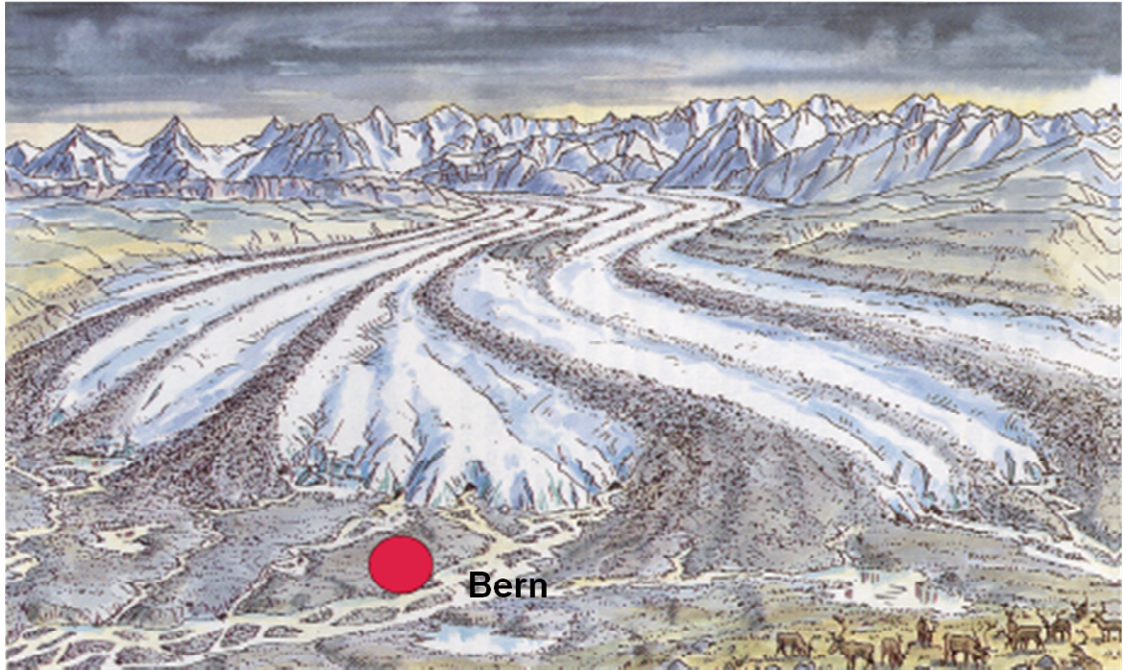


Abbildung 2: Die Abbildung zeigt eine auf wissenschaftliche Daten gestützte Zeichnung des Standes des Aaregletschers von vor etwa 18'000 Jahren. Der Standpunkt des Betrachters ist auf dem Bantiger beim heutigen Bern. Der Rote Punkt zeigt die heutige Lage von Bern.
(Quelle : Oeschger Zentrum Bern, Heinz Wanner; Zeichnung: Martin Ryser)

Wärmere und kältere Klimaperioden wechseln sich auf der Erde offenbar ab. Dabei lässt die Abkühlung des Klimas in einer Region aber nicht zwingend auf eine globale Abkühlung schliessen, es kann sich auch um eine lokale Verschiebung von klimatischen Verhältnissen handeln.

② Klimarekonstruktionen

✎ Aus verschiedenen *Klimaarchiven* lässt sich heute das Klima der Vergangenheit zum Teil rekonstruieren. Unter einem Klimaarchiv versteht man ein organisches oder anorganisches, gewachsenes System, in welchem sich klimatische Faktoren eingepreßt und über lange Zeit erhalten haben. Wir nennen hier nur fünf Vertreter als Beispiel vieler verschiedener Klimaarchive (→Arbeitsheft *Eisbohrkerne als Klimaarchive*):

- Kontinentale Eisschilder (Arktis, Antarktis)
- Baumringe
- See- oder Meeres-Sedimente
- Korallenriffe
- Tropfsteine

Je nach Fragestellung (Zeitepoche, Auflösung der Daten, etc.) eignet sich das eine oder andere Klimaarchiv besser.

In diesem Arbeitsheft wollen wir uns mit Warm- und Eiszeiten befassen. Diese widerspiegeln sich sehr eindrücklich in Temperatur-Rekonstruktionen von Daten, die aus Untersuchungen von Eisbohrkernen stammen.

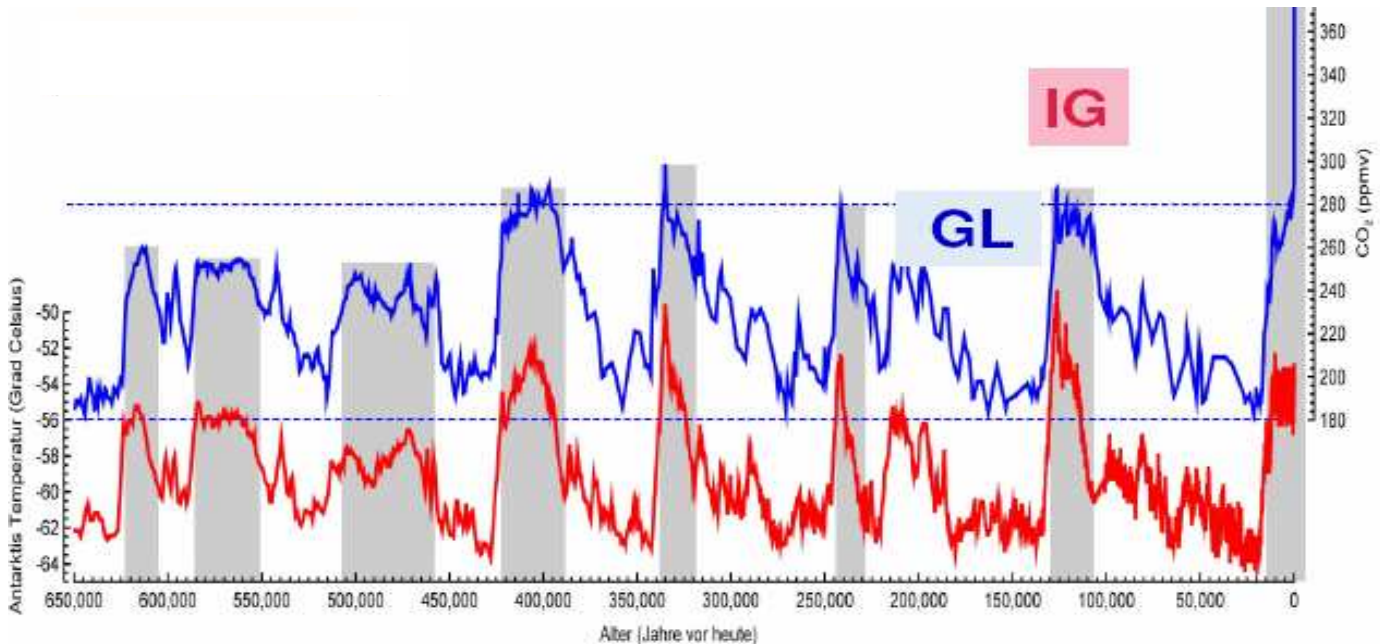


Abbildung 3: CO₂- (blau) und Temperatur- (rot) Rekonstruktion über die vergangenen 650'000 Jahre anhand von Daten aus dem antarktischen Eisbohrkern EPICA Dome C. **GL** steht für Glazial und **IG** für Interglazial. (Quelle : EPICA Community Members, Eight glacial cycles from an Antarctic ice core, Nature, 429, 623-628, 2004)

Das quartäre Eiszeitalter wird auch *Pleistozän* genannt und umfasst den Zeitraum von 2.6 Mio Jahre bis 11'000 Jahre vor heute. In dieser Epoche findet man mehrere Eiszeitzyklen. In Abbildung 3 sind acht solcher Warm-Kalt-Zyklen auszumachen. Die Kaltphasen heissen auch *Glaziale* und die Warmphasen *Interglaziale*. Diese für die Antarktis rekonstruierten Temperaturschwankungen über die letzten 650'000 Jahre hatten grösstenteils globale Ausmasse. Allerdings betrugen die Temperaturänderungen global gemittelt nur etwa 4 bis 5°C, während die Antarktis in der letzten Eiszeit 8 bis 10°C kälter war als heute. So sind zumindest die letzten drei bis vier Eiszeiten auch für das nördliche Mitteleuropa durch massive Gletschervorstösse nachgewiesen.



3. Wo in der Abbildung 3 befinden wir uns heute? Befinden wir uns in einem Interglazial oder in einem Glazial?
4. Welcher klimatische Zustand hat in den vergangenen 650'000 Jahren dominiert?
5. Im Wechsel zwischen Eis- und Warmzeit ist eine deutliche Periodizität zu erkennen. Mit welcher Periodendauer wiederholte sich der Eis-Warmzeit-Zyklus in den letzten 350'000 Jahren?



Beim Betrachten der Abbildung 3 hast du dich möglicherweise gefragt, wie es denn überhaupt zu solch extremen Klimaschwankungen kommen kann. Vielleicht ist dir auch aufgefallen, dass die Zeit, in welcher wir leben, geprägt ist durch eine äusserst stabile Warmphase, diese trägt übrigens den Namen *Holozaen*.

3 Die Erde, ein grosser Kreisel, der sich um die Sonne bewegt

Einer der wichtigsten Einflussfaktoren für unser Klima ist die Sonneneinstrahlung auf die Erde. Von der Sonne gelangt ständig kurzwellige Strahlung auf die Erde. Die Intensität dieser Strahlung prägt wesentlich das Klima. Diese Strahlungsintensität ist aber im Verlaufe der in Abbildung 3 betrachteten Zeiträume nicht konstant. Sie ist mal stärker und mal schwächer. Dies hat im Wesentlichen zwei Gründe:

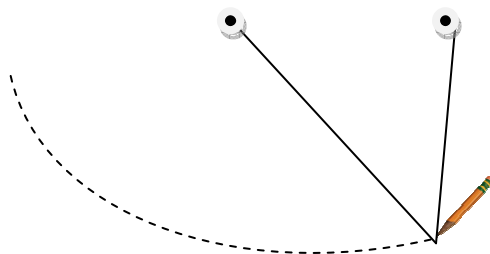
- Die Sonne selber gibt nicht immer gleichviel Energie ab und
- die Stellung der Erde gegenüber der Sonne verändert sich.

Wir wollen uns nun vor allem um den zweiten Aspekt kümmern, um die Veränderung der Erdbahn und der Stellung der Erde gegenüber der Sonne:

Die Erde bewegt sich bekanntlich auf einer Ellipse um die Sonne, wobei sich die Sonne in einem ihrer Brennpunkte befindet.



6. Zeichne eine Ellipse nach folgender Anleitung: Nimm eine Schnur von 20 cm Länge. Befestige deren Enden im Abstand von etwa 7 cm auf einer beschreibbaren Unterlage, z.B. mit Klebstreifen oder mit zwei Reissnägeln. Nimm einen Bleistift und spanne damit die Schnur so, dass die Bleistiftspitze auf die Unterlage zeigt. Fahre nun mit dem Bleistift, das in der Schnur eingespannt ist vorsichtig um die beiden Brennpunkte so, dass die Schnur immer gespannt bleibt. Du bekommst eine regelmässige Ellipse!



Der Abstand der beiden Brennpunkte (in unserem Beispiel 7 cm) heisst *Exzentrizität der Ellipse*. Je kleiner die Exzentrizität ist, desto mehr gleicht die Ellipse einem Kreis. Der Kreis ist eine Ellipse mit der Exzentrizität null, d.h. beide Brennpunkte liegen aufeinander.

Die Exzentrizität der Erdbahn ist sehr klein, so dass die Erdbahn *fast* kreisförmig ist.

Die Erde bewegt sich aber nicht nur auf einer Ellipse um die Sonne, sondern rotiert auch noch wie ein Kreisel um sich selbst und dies auch noch schräg. Ein sich schräg drehender Kreisel macht eine sonderbare Bewegung; seine schräge Rotationsachse beginnt selber um die Senkrechte zu rotieren, man nennt das *die Präzession* des Kreisels.





7. Spiele mit einem Kreisel und schaue nach, ob du siehst, was mit dem Begriff *Präzession* gemeint ist.

④ Milankovic-Zyklen

Die Stellung der Erde gegenüber der Sonne verändert sich aufgrund dreier Ursachen:

I. Veränderung der **Exzentrizität** der Erdbahn:

Ursache dieser Variationen sind Störungen der Erdbahn durch die anderen Planeten des Sonnensystems, vor allem durch Jupiter und Saturn. Die Hauptkomponente dieser Abweichung variiert mit einer Periode von **413'000 Jahren**. Die Ellipse *pulsiert* sozusagen! Darüber überlagert ist eine Nebenkomponekte mit einer Periode von etwa **100'000 Jahren**.

II. Veränderung der **Schrägstellung** (Schiefe) der Erde (man nennt das die *Nutation*, das „Nicken“ der Erde)

Die Schiefe der Erdachse gegen die Erdbahn ändert sich periodisch zwischen $22,1^\circ$ und $24,5^\circ$, mit einer Periode von etwa **41'000 Jahren**.

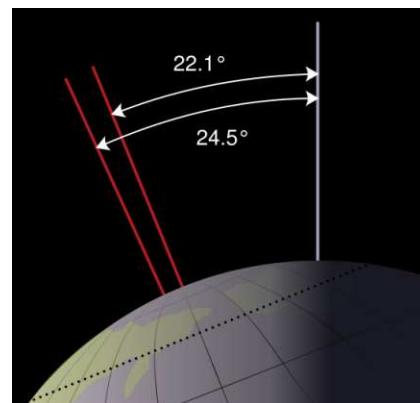


Abbildung 4: Nutation der Erde.
(Quelle : <http://de.wikipedia.org>)

III. **Präzession der Erde** und **Drehung der Ellipse**

Der Grund für die Präzession der Erde sind die Gravitationskräfte von Sonne und Mond auf die Erde. Die Präzession des Erdkreisels hat eine Periodendauer von etwa **26'000 Jahren**.

Neben der Präzession der Erdachse kommt es auch zu einer sehr langsamen Drehung der Erdbahn-Ellipse.

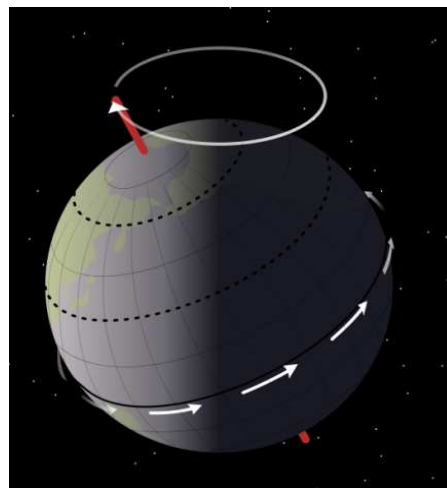


Abbildung 5: Präzession der Erde.
(Quelle : <http://de.wikipedia.org>)

☞ Wenn wir mal davon absehen, dass die Sonne selber in ihrer Strahlungsintensität ja auch variiert, so wird der Einfluss der Sonne auf das Erdklima also durch alle die periodischen Veränderungen der Erdbahngrößen beeinflusst. Man spricht auch vom *solaren Forcing*.

Vorsicht: Aufgrund der oben gemachten Überlegungen könnte man irrtümlicherweise annehmen, dass all diese Faktoren die **Nettoeinstrahlung der Sonne auf der gesamten Erde im Jahresmittel** verändern. Das ist aber quasi nicht der Fall! Was sich durch die Veränderung der Erdbahnparameter ändert, ist die **saisonale und geographische Verteilung der Sonneneinstrahlung auf der Erde!**

Die *Milankovic-Theorie* besagt nun, dass die Zyklen von Warm- und Eiszeiten im Wesentlichen eine Reaktion auf das solare Forcing sind. Dieses solare Forcing ist also eine Überlagerung von drei Effekten mit fünf verschiedenen Periodizitäten.

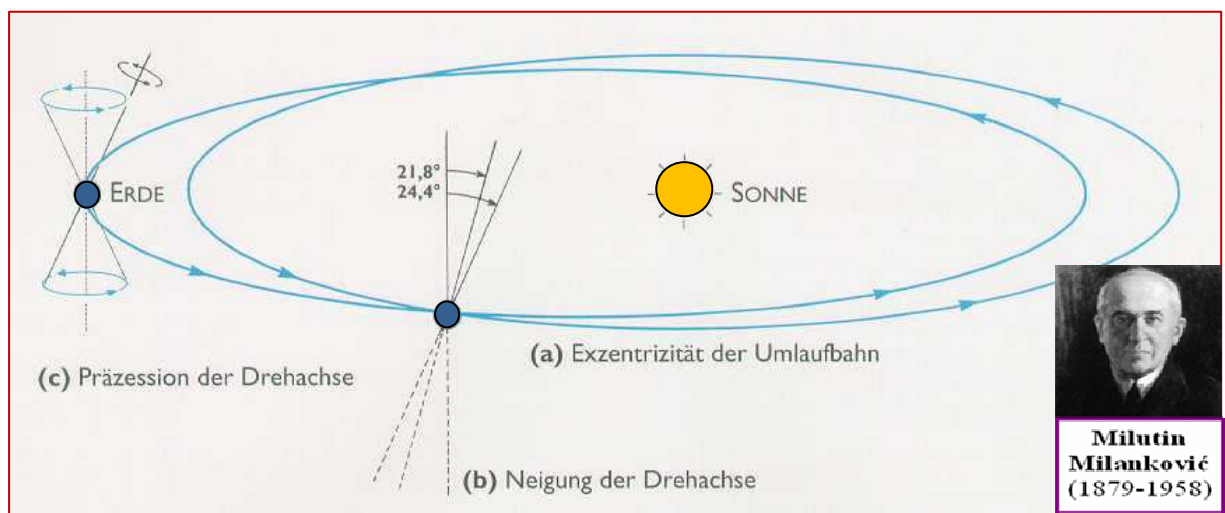


Abbildung 6: Zusammenfassung der drei Effekte, die das solare Forcing beeinflussen.

5 Überlagerung von Schwingungen

☞ Damit wir dieser Milankovic-Theorie etwas auf den Grund gehen können, müssen wir einen kurzen Exkurs in die Mathematik machen und uns um die Überlagerung von Schwingungen kümmern. Eine Schwingung (genauer *harmonische Schwingung*) kann mathematisch als Sinus-Funktion geschrieben werden.

$$y(t) = \hat{y} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t + \varphi\right)$$

$y(t)$ heisst *Auslenkung der Schwingung*, $\hat{y}$ ist die *Amplitude* (maximale Auslenkung) der Schwingung, T ist die *Periodendauer* oder Periodizität und φ die *Phase* der Schwingung.

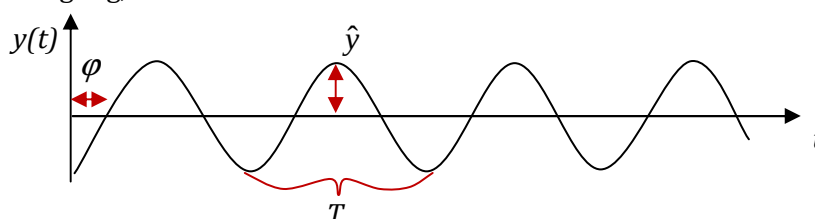


Abbildung 7: Die harmonische Schwingung

Eine harmonische Schwingung lässt sich mit drei Grössen vollständig beschreiben:

I. Die Amplitude $\hat{y}$:

Die Amplitude ist die maximale Auslenkung einer Schwingung.

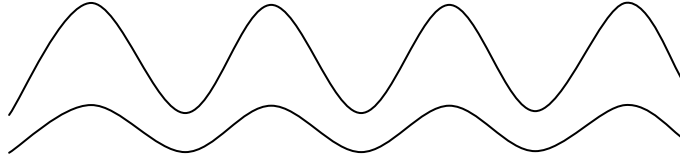


Abbildung 8: Zwei Schwingungen mit unterschiedlichen Amplituden

In Bezug auf die Milankovic-Zyklen würde dies einer maximalen Abweichung der Strahlungsintensität der Sonne von einem Durchschnittswert gleichkommen.

II. Die Periodendauer T :

Die Periodendauer ist die Zeit, die eine Schwingung für einen ganzen Schwingungszyklus braucht.

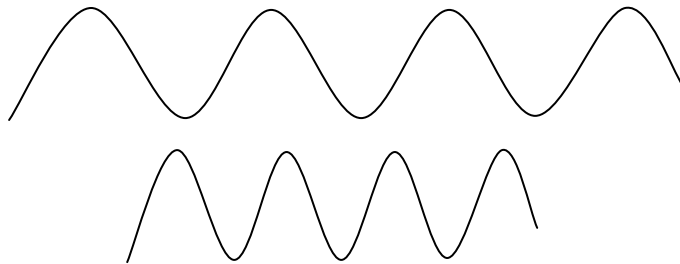


Abbildung 9: Zwei Schwingungen mit unterschiedlichen Periodendauern

In Bezug auf die Milankovic-Zyklen sind die Periodendauern die verschiedenen Zeiten, bis ein Zyklus (zum Beispiel Präzessions-Zyklus) durchlaufen ist.

III. Die Phase φ :

Die Phase ist die zeitliche Verschiebung einer Schwingung gegenüber einer anderen.

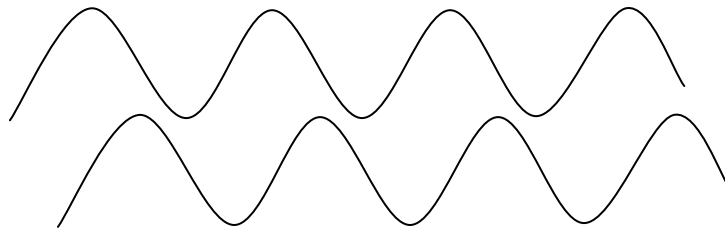


Abbildung 10: Zwei Schwingungen, wovon die eine gegenüber der anderen phasenverschoben ist, das heisst zeitlich voraus läuft.

Überlagern sich nun Schwingungen verschiedener Art, so addieren sich die jeweiligen momentanen Auslenkungen zu einem Gesamtsignal. Je nach dem in welcher Phase sich die Schwingungen relativ zueinander befinden, können sich die Schwingungen gegenseitig verstärken oder auch abschwächen, man spricht von *Interferenz*.

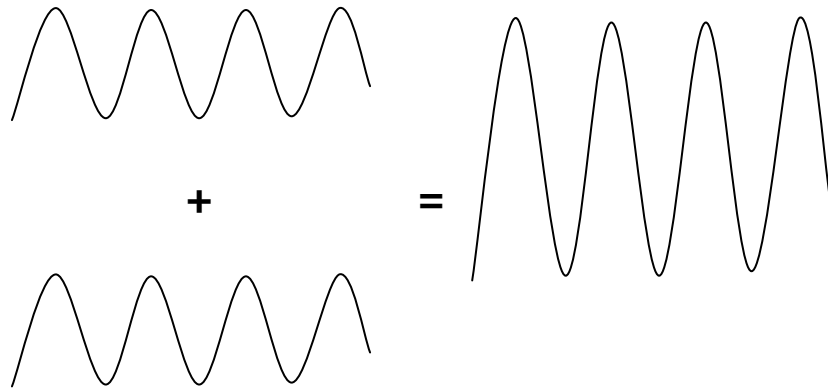


Abbildung 11: Verstärken sich zwei Schwingungen spricht man von konstruktiver Interferenz

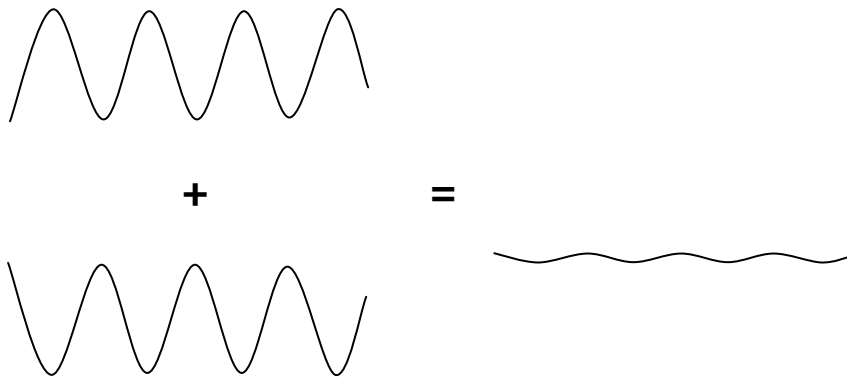


Abbildung 12: Sind zwei gleiche Schwingungen in Antiphasen so löschen sie sich gegenseitig im Extremfall aus, man spricht von destruktiver Interferenz

Alle in Kapitel 4 besprochenen Milankovic-Faktoren sind Schwingungen mit unterschiedlichen Amplituden, Periodendauern und Phasen. Alle diese Schwingungen überlagern sich nun zu einem Gesamtsignal. Interessant ist es nun, diese Überlagerung zu simulieren und sie mit dem Temperaturverlauf unseres Klimas im Verlaufe der letzten paar Eis- Warmzeit-Zyklen zu vergleichen.

⑥ Computermodell – Eine Übung mit Excel

Wir wollen uns nun als Klimamodellierer versuchen und mit einem Tabellenkalkulationsprogramm die Temperaturschwankungen, die aus Daten von einem Antarktischen Eisbohrkern rekonstruiert wurden, modellieren. Als Vorlage verwenden wir den Datensatz des Antarktischen Eisbohrkerns Vostok. Dieser Datensatz ist öffentlich und findet sich unter folgender Internetadresse:

<http://cdiac.ornl.gov/ftp/trends/temp/vostok/vostok.1999.temp.dat>

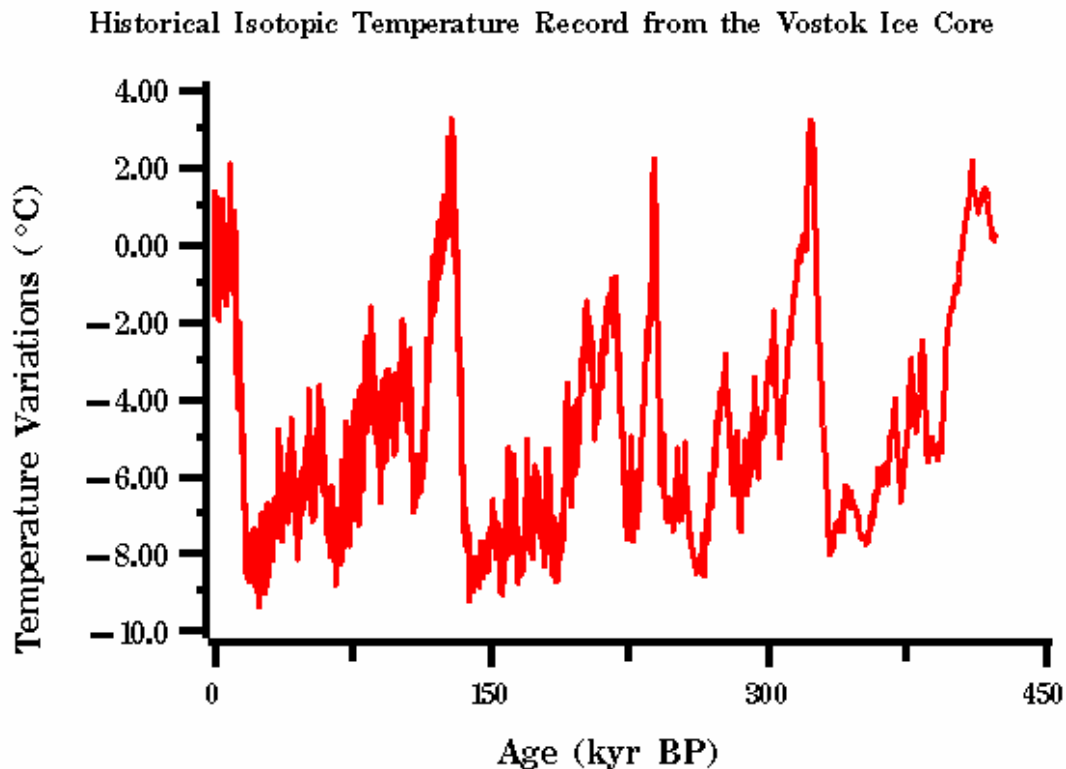


Abbildung 13: Die Grafik zeigt die rekonstruierten Temperaturvariationen in Vostok, Antarktis über die letzten 450'000 Jahren. Dabei handelt es sich um Abweichungen gegenüber der heutigen durchschnittlichen Oberflächentemperatur von -55.5°C . (Die Abkürzungen auf der x-Achse, kyr BP bedeuten: **kilo years befor present** oder auf Deutsch 1000 Jahre vor heute. Quelle: Petit et al. 1999)

Der Datensatz umfasst rekonstruierte Informationen über die Temperaturschwankungen in Vostok (Antarktis) über die letzten 450'000 Jahre. Diesen Daten wollen wir nun das Signal des **solaren Forcings** gegenüberstellen, das wir selber modellieren. Wir machen das so, dass wir im Programm *Excel* fünf Schwingungen einander überlagern, wovon jede Schwingung die Periodendauer eines typischen Milankovic-Faktors hat:

- Präzession 1: 19'000 Jahre
- Präzession 2: 23'000 Jahre
- Schiefe: 41'000 Jahre
- Exzentrizität 1: 100'000 Jahre
- Exzentrizität 2: 400'000 Jahre

Da wir weder die Amplitude, noch die Phase der fünf Schwingungen kennen, setzen wir vorerst alle Amplituden auf 1 und alle Phasen auf 0. Wenn wir die Überlagerung der fünf Schwingungen gerechnet und dargestellt haben, können wir durch Ausprobieren versuchen, eine bestmögliche Übereinstimmung des modellierten Signals mit den Daten zu erhalten.

Alle weiteren Anweisungen und eine mögliche Lösung findest du in der zugehörigen Excel-Datei.

Bemerkung zu dieser Übung:

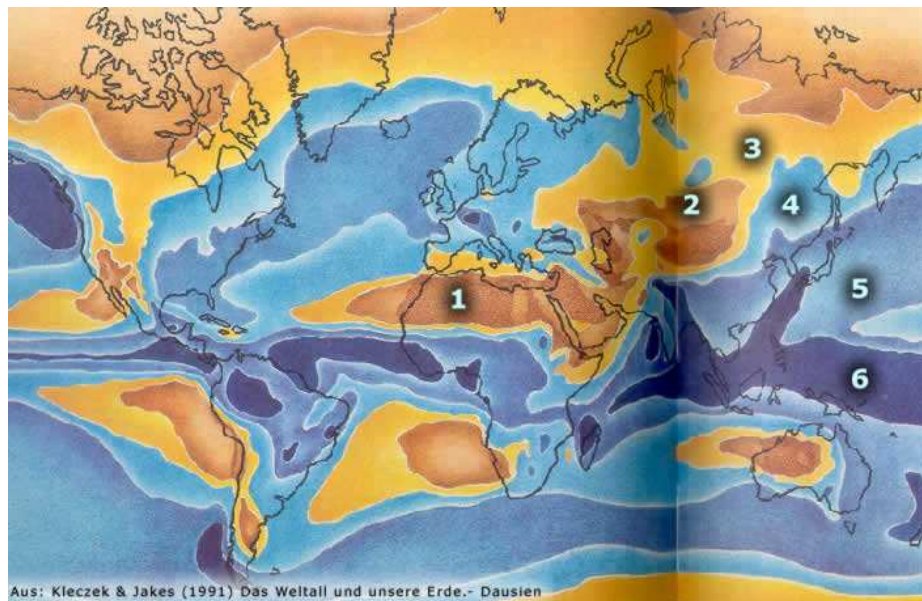
Die Art und Weise wie wir in der Übung versuchen, ein künstliches Signal mit realen Daten zur Übereinstimmung zu bringen, ist nicht sehr wissenschaftlich. In der wirklichen Klimamodellierung wird mit modellierten Signalen nicht einfach gespielt, bis sie möglichst gut passen. Die Gestalt der modellierten Signale ist immer sehr gut begründet. In unserer Übung geht es einerseits darum zu sehen, dass mit unseren einfachen Annahmen tatsächlich grössere Sprünge und Schwankungen im solaren Forcing erzeugt werden können. Andererseits soll es auch eine Übung im Umgang mit Tabellenkalkulations-Programmen und grossen Datensätzen sein.

Lösungen

1.

- Mitteleuropa war trockener als heute
- Der mediterrane Raum war feuchter als heute
- Die Sahara hatte enorm viel Niederschläge
- Das mittlere Afrika war sehr trocken

Die durchschnittliche Niederschlagsmenge in der Sahara beträgt heute 45.5 mm. Zusammen mit den 3730 mm zusätzlichem Niederschlag in der letzten Eiszeit ergibt das 3775 mm Niederschlag. Das sind Mengen, die heute in den niederschlagsreichsten Gebieten fallen!



- 1: Wüsten und Halbwüsten
 - 2: wenige als 25 cm Niederschlag pro Jahr
 - 3: zwischen 25 cm und 50 cm Niederschlag pro Jahr
 - 4: zwischen 50 cm und 100 cm Niederschlag pro Jahr
 - 5: zwischen 100 cm und 200 cm Niederschlag pro Jahr
 - 6: mehr als 200 cm Niederschlag pro Jahr
2. Der Aaregletscher ist heute ganz zurückgezogen und hat sich in zwei Gletscher aufgeteilt, der Oberaar- und der Unteraargletscher. Das Gletscherwasser beider Gletscher wird im Grimselstausee gefasst.
 3. Wir befinden uns ganz rechts in der Grafik. Die Temperatur entspricht einem Interglazial, also einer Warmzeit. Sie wird *Holozaen* genannt.
 4. In den vergangenen 650'000 Jahren war das Klima bei uns die meiste Zeit im kalten Modus. Vorherrschend waren also vor allem die Eiszeiten.
 5. Die Periodendauer liegt zwischen 90 und 130 Tausend Jahren.