

Einige Bemerkungen zu Sonnenfinsternissen

Messen der Lufttemperatur während Sonnenfinsternissen: Erfahrungen eines Amateurs

Robert Nufer

21. September 2017

Eine totale Sonnenfinsternis zu erleben ist eine wunderbare Erfahrung. Lange vor diesem magischen Moment werden Reisen geplant, Wetterstatistiken konsultiert und diskutiert, und Strategien für die Beobachtung oder Fotografie werden entwickelt. Der Datenverkehr in entsprechenden Internetforen steigt erheblich an, wenn das Ereignis seine Schatten vorauswirft – Monate bevor es der Mond tut.

Dann ist der grosse Moment da und eine lange Reise scheint sich gelohnt zu haben. Die partielle Phase steht kurz bevor und alles ist bereit. Das Wetter ist so schön, wie es ohne Finsternis gar nicht sein könnte. Es ist später Vormittag und die Sonne steht hoch am Himmel. Stativ, Kamera und Sonnenfilter sind bereit und auch die Notizen liegen jederzeit greifbar am Boden oder auf der Fototasche. Man wird mehr und mehr umringt von Freunden und – fernab von zuhause – Einheimischen, die sehr grosses Interesse an diesem einmaligen Ereignis bekunden. Freundlich lächelnd aber bestimmt bittet man Eltern, ihre kleinen Kinder etwas zur Seite zu nehmen, und auch der Rollerfahrer, den die Neugier zu einem Halt direkt vor dem Fotoapparat verleitet hat, möge etwas weiter und aus dem Bild fahren. „Erster Kontakt!“ ruft es aus der Richtung, wo die beste Ausrüstung steht.

Es ist 24 °C und im Laufe des Tages werden bis 28 °C erwartet. Schweiß perlt über das Gesicht und das Hemd wird feuchter und feuchter. Dabei geht es noch über eine Stunde bis zur Totalität. Mehr und mehr schiebt sich der Mond vor die Sonne. Keine Wolke weit und breit.

Drei Minuten vor der Totalität – die Umgebung ist längst in dieses unheimliche, fahle Licht getaucht, das jetzt mit jedem Augenblick dunkler und dunkler erscheint – ruft jemand „Mir ist kalt!“ Auch mich fröstelt es. Andererseits schwitze ich so stark, als befände ich mich in einem feucht-heissen Dschungel.

Schreie, dann Stille: Die weisse Korona steht vor dem dunklen Himmel, und vielleicht ist der eine oder andere Planet oder helle Stern zu erkennen. Nur schemenhaft sind die hin und her wogenden Palmenspitzen zu sehen. Alles klappt bestens mit den geplanten Foto-Aufnahmen. Wieder Schreie, dann ist der grosse Moment vorbei, geschafft! Schnell zerstreuen sich all jene, die nicht um die halbe Erde gereist sind. Dabei ist erst eine Minute seit dem Ende der Totalität vergangen, aber es kommt einem vor, als wäre es ein ganz normaler Tag. Erst nach über einer weiteren Stunde verlässt der letzte Teil der Mond-Silhouette die Sonne.

Wie war das mit dem „Mir ist kalt!“ bei 24 °C unter Palmen? Ich habe einmal an einem Vortrag von einer Abkühlung um 9 °C (16 °F) gehört. Da scheint jemand rekordhungrig gewesen zu sein oder das Sprichwort „Wer misst, misst Mist“ trifft besonders für Sonnenfinsternissen zu. Man stelle sich folgendes vor: Während einer durchschnittlichen Sonnenfinsternis fehlt etwa das Licht und die Energie einer Dreiviertelstunde vom Beginn der partiellen Phase bis kurz nach dem Finsternismaximum, wenn die Lufttemperatur wieder zu steigen beginnt. Wenn dadurch die Temperatur um 9 °C abfallen sollte, müsste es ja am nächsten Morgen, nachdem die Sonne wirklich zwölf Stunden ganz unter dem Horizont verschwunden war, gegen 100 °C kälter geworden sein!

Ob und wieviel kälter es geworden ist kann objektiv natürlich nur durch eine Messung bestimmt werden, aber wer schleppt schon eine Wetterstation mit in die Ferien?

Temperatur-Angaben verstehen und richtig messen

Für eine sinnvolle Messung der Lufttemperatur muss einiges - erstaunlich viel - berücksichtigt werden, damit Daten weltweit miteinander verglichen werden können und alle vom Gleichen reden.

Nehmen wir als Beispiel einen sonnigen Sommertag. Für jeden Standort gibt es natürlich nur eine „richtige“ Temperatur, die jemandem – der Allgemeinheit - mitzuteilen Sinn ergibt. Wir stehen - ausgerüstet mit einem schicken Thermometer in einer geschmiedeten Einfassung - barfuss vor unserem Haus und wollen die Temperatur messen. Schon bald beginnen wir zu schwitzen. Drinnen haben wir vorhin noch 24 °C abgelesen. Die Quecksilbersäule steigt und steigt und nach kurzer Zeit müssen wir das Thermometer in die andere Hand nehmen, weil das Metall in der Sonne inzwischen heiss geworden ist. Auch die Füße brennen, da wir auf dem schwarz geteerten Vorplatz stehen, also machen wir die paar Schritte auf den Rasen nebenan – eine kühlende Wohltat für die Füße. Das Thermometer in der Hand können wir bald nicht mehr halten, also begeben wir uns hinter das Haus in den Schatten, um uns abzukühlen. Das Thermometer legen wir auf einen Gartenstuhl und bemerken, dass die abgelesene Temperatur mit der Zeit zu fallen beginnt. Nach einer Stunde lesen wir 32°C ab und auch das Metall fühlt sich jetzt verglichen mit vorhin schon fast kühl an. Da wir wissenschaftlich neugierig sind, hängen wir das Thermometer noch auf Kopfhöhe an die schattige Nordseite unseres Kirschbaumes und lesen nach einer weiteren halben Stunde 30°C ab.

Was also ist nun die eigentliche Lufttemperatur?

Die Sonne strahlt Energie über ein breites Frequenzspektrum ab, vom Infrarot über den sichtbaren Bereich bis ins Ultraviolett und in Spuren sogar Röntgenstrahlung.

Ein Teil der Energie, welche die Erdoberfläche erreicht, wird vom Material der Erdoberfläche absorbiert, als Wärmestrahlung wieder abgestrahlt und von den bodennahen Luftmolekülen absorbiert. Die Luft erwärmt sich.

Höhere Luftschichten bekommen weniger von dieser Wärme zu spüren, da die Moleküle der unteren Luftschichten einen Teil der Wärmestrahlung absorbiert haben.

In der Meteorologie hat man sich u.a. darauf geeinigt, die Lufttemperatur wie folgt zu messen:

- **Gemessen wird in 2 Metern¹ über dem Boden**, denn je höher man steigt, desto kühler wird es im Allgemeinen.
- **Der Boden, auf dem gemessen wird, soll möglichst repräsentativ für die weitere Umgebung sein** (und nicht unser schwarz geteeter Garagenvorplatz).
- **Das Thermometer muss im Schatten sein** (damit es sich nicht durch direkte Bestrahlung aufheizt, wie das in Metall gefasste Beispiel oben)
- **Die Luft um das Thermometer soll frei zirkulieren können**, um einen Hitzestau zu vermeiden.
- **Von Gebäuden soll Abstand gehalten werden**, damit die Temperatur nicht durch Wärmeabstrahlung verfälscht wird.

Die bekannten Wetterhäuschen, die man auf der ganzen Welt antrifft, erfüllen diese Bedingungen so gut es geht: Die Häuschen stehen auf einem (relativ) freien Feld und bieten in ihrem Innern Schatten. Sie sind weiss gestrichen, um sich möglichst nicht unkontrolliert aufzuheizen. Sie haben allseitig vorgeschriebene Lamellen für die Luftzirkulation. Zwischen den vier Wänden und dem Dach ist ein Spalt, um einen Hitzestau zu vermeiden. Die Türchen, durch welche man zu den Geräten im Innern gelangt, befinden sich auf der sonnenabgewandten Seite, damit während dem Ablesen keine Sonnenstrahlung ins Innere fallen kann. Bei uns auf der Nordhalbkugel ist dies auf der Nordseite.

Anm. des Autors: Wer vorgibt, Meteorologe zu sein und bewusst diese Normen vernachlässigt, nur um mit möglichst hohen oder niedrigen Temperatur-„Rekorden“ zu prahlen, ist ein Scharlatan!

¹ In einigen Ländern wird die Lufttemperatur in Höhen zwischen 1.25 m und 2 m gemessen.

Temperatur-Messungen fernab von zuhause

So kompliziert sich das ganze anhört ist es zum Glück überhaupt nicht. Eine Wetterstation ist ja dafür vorgesehen, über viele Jahre konsistente Messwerte zu liefern. Da eine Sonnenfinsternis nur wenige Stunden dauert, genügt es zum Beispiel, ein Thermometer an einen Baum oder eine Palme zu fixieren. Liegt dann noch eine Holzkiste herum, kann sogar die 2-Meter-Regel eingehalten werden. Allerdings will kaum jemand während einen Sonnenfinsternis alle paar Minuten auf eine Kiste steigen und versuchen, unter immer lichtschwächeren Bedingungen eine Temperatur abzulesen und zu notieren. Digital-Thermometer mit einer grossen Anzeige können sehr hilfreich sein, wie in zwei Beispielen gezeigt wird. Perfekt eignen sich natürlich sogenannte Daten-Logger, welche im Voraus programmiert werden, und die viele Messpunkte speichern können. Damit ist das einzige Problem „nur“ noch das Finden eines möglichst optimalen Standortes während der Sonnenfinsternis. Das kann zum Beispiel auf einem Passagier-Schiff oder mitten in der Wüste schwierig sein. Trotzdem möchte ich Interessierte dazu ermuntern, Temperaturmessungen durchzuführen. Es ist dann nur wichtig, die Umstände der Messungen zu beschreiben, damit auch daraus etwas gelernt werden kann.

Meine Temperatur-Messgeräte

Die in den folgenden Beispielen beschriebenen Messungen wurden mit zwei verschiedenen Geräte-Typen gemacht: Mit einem einfachen Digital-Thermometer mit grosser Digitalanzeige, und mit programmierbaren Daten-Loggern mit einer Kapazität von mehrere tausend Werten.



Bild 1

Links: Digital-Thermometer Modell 0900.0530 der Firma Testo AG. Der Vorteil dieses einfachen Gerätes ist die sehr grosse Anzeige, die auch bei wenig Licht gut ablesbar ist. Die Temperatur wird am oberen Ende der Spitze gemessen. *Rechts:* Temperatur- und Feuchtelogger Modell testostor 171-3 der Firma Testo AG. Bei diesem Gerät werden die Messzeit und das Messintervall (vor der Reise) am Computer programmiert. Die Daten werden später (nach der Reise) am Computer ausgelesen. Die Temperatur wird auf eine Dezimalstelle genau abgespeichert.

Die totale Sonnenfinsternis am 26. Februar 1998 (Venezuela)

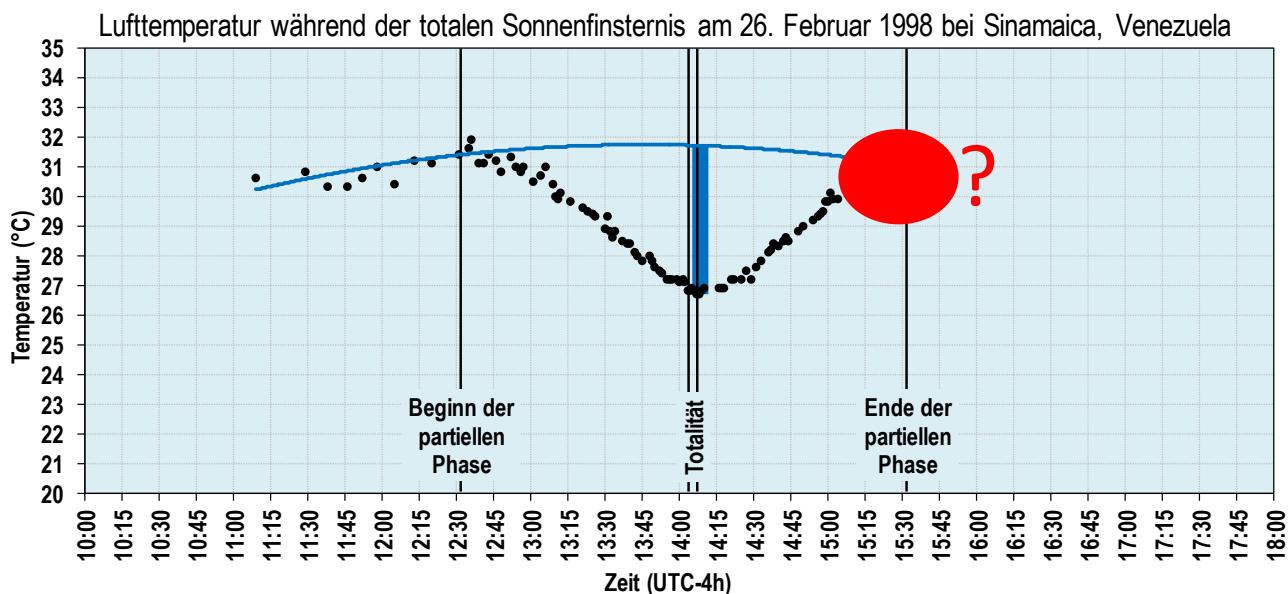


Bild 2

Beobachtungsort: 11°03'31" N; 71°49'46" W bei der Ortschaft Sinamaica, Zulia, Venezuela. Teilnehmer: Robert Nufer und Patrick Gfeller.

Bei diesem ersten Temperaturmessungs-Experiment verwendeten wir das Digital-Thermometer links in Bild 1. Das Thermometer war mit Klebeband etwa einem Meter (statt zwei) über dem Boden an einem kleinen Fernrohr befestigt, welches zum Fotografieren der Sonne verwendet wurde. Somit zeigte der Temperatur-Fühler praktisch immer genau in Richtung Sonne. Über die Spitze des Fühlers hatten wir ein kleines weisses Papiertütchen gestülpt, welches den Sensor ganz im Schatten hielt. Die Temperatur wurde jeweils zur vollen Minute abgelesen und notiert. Zwischen 13:30 und 14:30 wurde zusätzlich ein Kassettenrecorder verwendet. Die Temperatur wurde dann von Zeit zu Zeit abgelesen und in ein umgehängtes Mikrofon gesprochen.

Diskussion: Der geschätzte Temperaturabfall beträgt etwa 5 °C und die Verzögerung vielleicht fünf Minuten. Möglicherweise ist der Temperaturabfall etwas zu hoch, weil das Thermometer nur einen Meter über dem Boden platziert werden konnte. Ein Fragezeichen bleibt auch gegen Ende der Finsternis. Um 15:04 verliessen wir den Beobachtungsort und begaben uns zur Hauptstrasse, wo um 15:10 die nächste Ablesung erfolgte. Es kann sein, dass der Boden dort wärmer war oder das Gerät nicht mehr exakt zur Sonne ausgerichtet war, denn die „normale“ Temperatur ohne Finsternis sollte erst mit oder nach dem Ende der partiellen Phase erreicht werden und nicht schon davor.

Dieses Experiment wurde in [Ori1] beschrieben.

Die totale Sonnenfinsternis am 11. August 1999

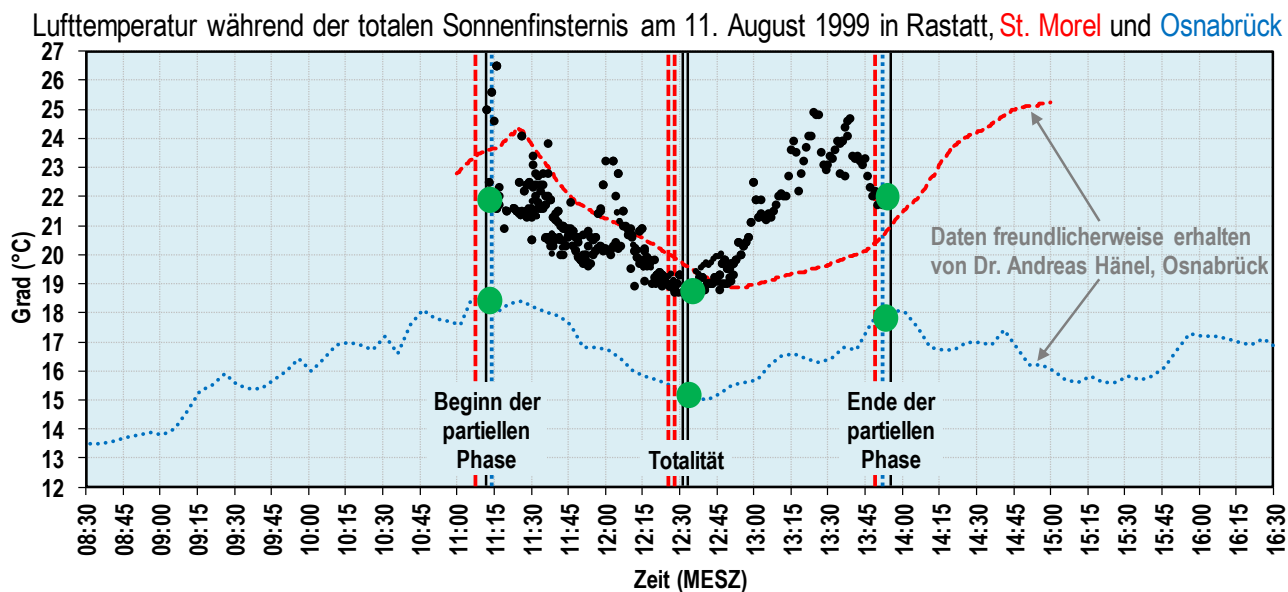


Bild 3

Beobachtungsorte:

schwarze Punkte: 48°51'37" N; 08°12'31" E in Rastatt (Schulklasse)

gestrichelte Messkurve: 49°20'16" N; 04°42'54" E bei St. Morel (Champagne, Frankreich)

gepunktete Messkurve: 52°16'16" N; 08°02'45" E in Osnabrück (Deutschland)

Nach der erfolgreichen Messung 1998 wurden die neunjährigen Kinder der Schulklasse unserer Tochter mit Finsternisbrillen und zwei Thermometern (links in Bild 1) ausgerüstet und gebeten, während der Finsternis in Rastatt ab und zu die Temperatur abzulesen und zu notieren. Die Finsternisdaten und die erhaltenen Messpunkte sind in Bild 3 schwarz dargestellt. Als Ergänzung zu diesen manuell erhaltenen Punkten hat Dr. Andreas Hänel seine elektronisch erfassten Messdaten zur Verfügung gestellt.

Diskussion: Das Wetter in Rastatt war ungünstig; Regen und Sonnenschein wechselten sich ab. Immerhin war es den Kindern vergönnt, die ganze Totalität durch eine Wolkenlücke optimal geniessen zu können. Dreizehn Kinder haben Daten geliefert, wobei ein Grossteil der Daten nach der Totalität von einem einzigen Mädchen stammt. Für die anderen Kinder war das grosse Erlebnis nach der Totalität schon vorbei. Wie erwartet, zeigen die Punkte grosse Sprünge. Das kann darauf zurückgeführt werden, dass die Fühler der Thermometer nicht immer im Schatten waren. Wie eingangs beschrieben, ist dies das typische Problem, denn zu tiefe Temperaturen können eigentlich nicht gemessen werden, sondern nur zu hohe. Vergleicht man also die untersten Punkte bei Finsternisanfang, -mitte und -ende, so passen die Punkte schön zu der in Osnabrück gemessenen Kurve, wo es einfach einige Grade kühler war als in Rastatt. (In Osnabrück, 475 km weiter nördlich als Rastatt und ausserhalb der Totalitätszone, dauerte die gesamte Finsternis einige Minuten weniger lang.). Die eingezeichneten grünen Kreise sollen grob die Temperaturen charakterisieren, und sie weisen auf einen Temperaturabfall von etwa 4 °C hin. Die rote Kurve wurde in der Totalitätszone im französischen St. Morel, etwa 260 km westlich von Rastatt von Dr. Andreas Hänel gemessen. Eigentlich fand dort die Finsternis früher als in Deutschland statt, aber die Temperaturkurve zeigt eine deutliche Verzögerung. Selbst NACH der Finsternis stieg die gemessene Temperatur um 4 °C an, was nur mit dem immer sonniger werden Wetter erklärt werden kann.

Diese Finsternis zeigt klar auf, dass es bei nicht reinem Sonnenwetter unmöglich, ist, die klimatischen und astronomischen Temperatureinflüsse voneinander zu trennen.

Die Experimente von Dr. Andreas Hänel wurden in [Hän] beschrieben und können als pdf heruntergeladen werden.

Die totale Sonnenfinsternis am 21. Juni 2001 (Sambia)

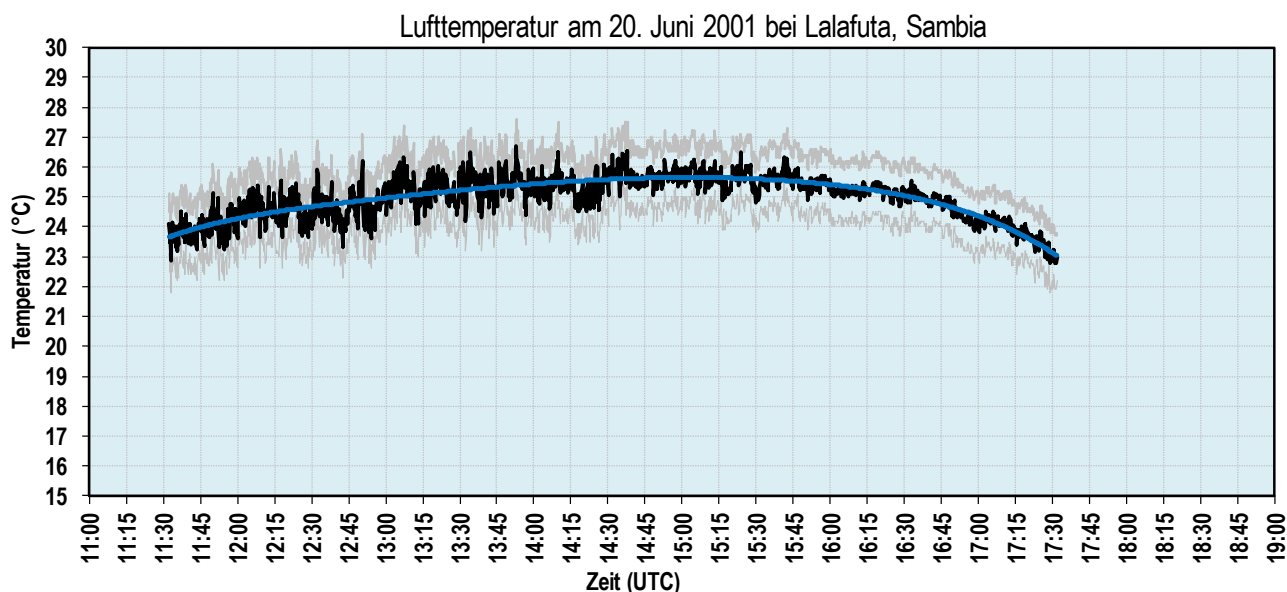


Bild 4a

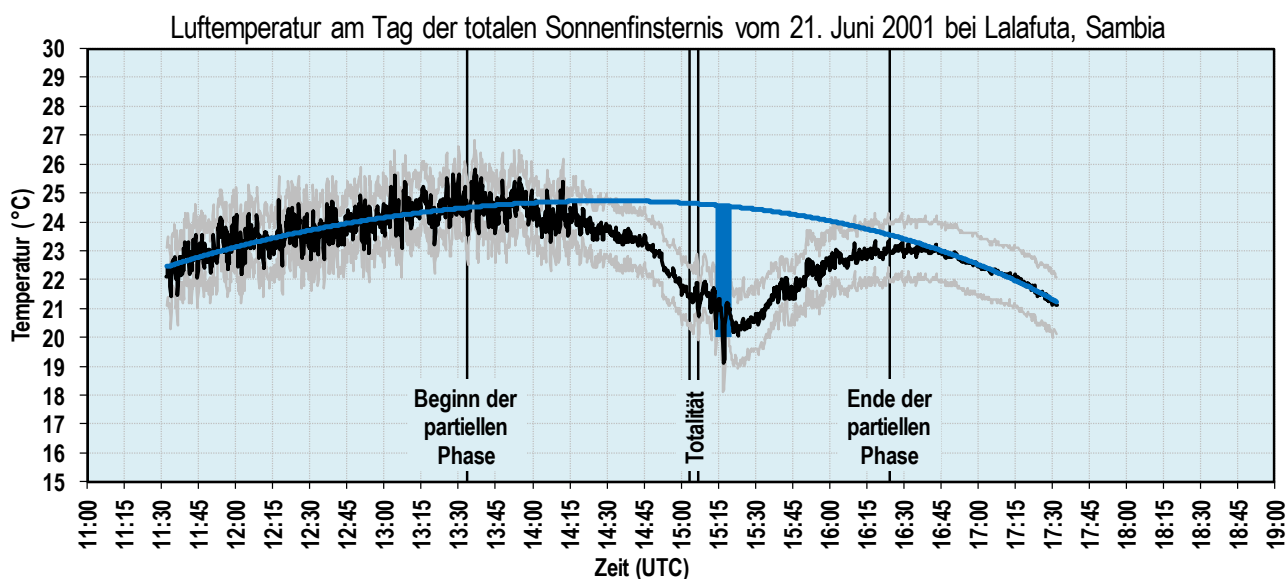


Bild 4b

Beobachtungsort: 14°11'51" S; 24°58'43" E bei der Ortschaft Lalafuta, Sambia.

Teilnehmer: Die SAG-Reisegruppe um Walter Staub (†).

Bei diesem ersten automatischen Temperaturmessungs-Experiment während der abenteuerlichen Reise durch Sambia verwendeten wir zwei Logger (rechts in Bild 1), die alle elf Sekunden unabhängig voneinander messen. Die Geräte wurden auf etwa zwei Metern Höhe auf dem Dach eines weißen Toyota HiLux, aber unter dem Dachaufbau für Dachzelte platziert, also ziemlich ideal. Da wir unseren Beobachtungsort bei Lalafuta im Westen Sambias schon knapp zwei Tage vor der Finsternis erreichten, konnte der Temperaturverlauf eines „normalen“ Tages (20. Juni 2001) mit demjenigen mit der Sonnenfinsternis (21. Juni 2001) verglichen werden. Um zu zeigen, wie identisch die Temperaturen gemessen wurden, sind die Werte des einen Loggers um 1 °C erhöht, und diejenigen des anderen Loggers um 1 °C verringert dargestellt (graue Kurven). Der Mittelwert ist jeweils die schwarze Kurve. Die gemessenen Temperatur-Ausschläge nach der Totalität sind darauf zurück zu führen, dass die Wagentüren des Autos, auf denen die Logger positioniert waren, mehrmals geöffnet und wieder geschlossen wurden.

Diskussion: An beiden Tagen war der Himmel praktisch wolkenlos. Die typischen Temperaturschwankungen infolge der Thermik waren wie erwartet vor Erreichen der Tageshöchsttemperatu-

ren an beiden Tagen viel stärker ausgeprägt. Ebenso ist gut zu sehen, wie schnell diese Logger auf Temperaturunterschiede reagieren können. Die blauen Kurven sind Polynome vierten Grades durch die Messpunkte ausserhalb der Finsternis. Damit kann für diese Finsternis eine Abkühlung um etwa 4.5 °C und einer Verzögerung von etwa zehn Minuten geschätzt werden.

Ein Reisebericht und dieses Experiment wurden in [Ori2] beschrieben.

Die totale Sonnenfinsternis am 29. März 2006 (Libyen)

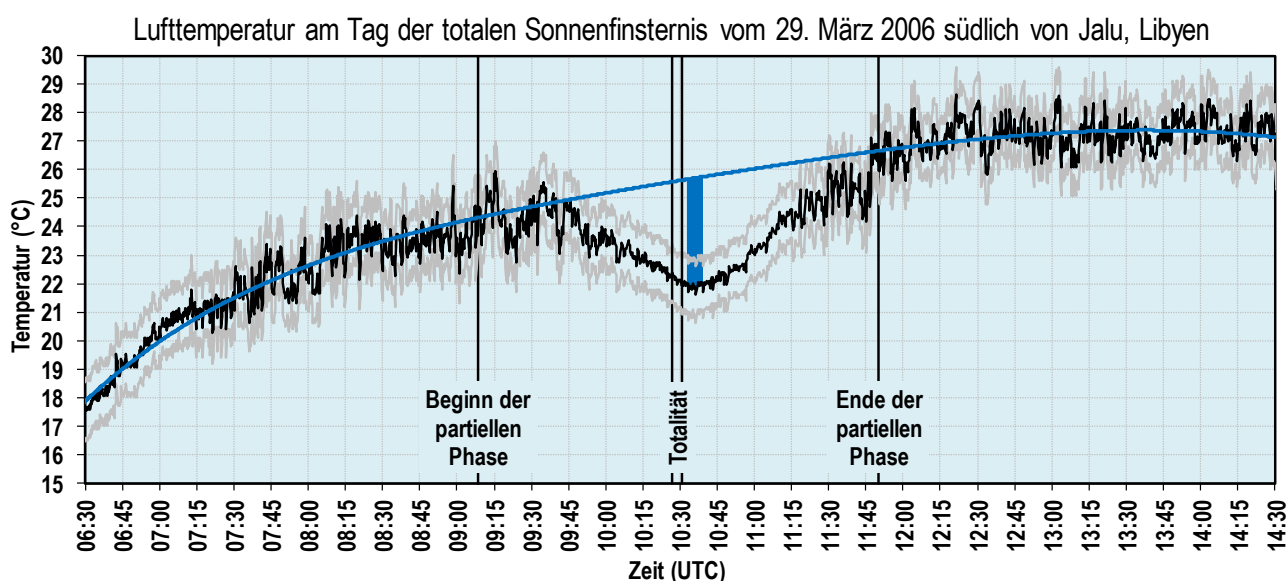


Bild 5

Beobachtungsort: 28°14'02" N; 21°30'04" E, 90 km südlich von Jalu, Libyen.

Teilnehmer: Eine Reisegruppe um Fritz Arm (Vista-Reisen.ch).

Bei diesem Temperaturmessungs-Experiment am Ostrand der Sahara in Libyen verwendeten wir zwei Logger (rechts in Bild 1), die alle fünfzehn Sekunden unabhängig voneinander messen. Die Geräte wurden auf etwa zwei Metern Höhe an der nördlichen Aussenseite eines Küchenzeltes in „Eclipse-City“ platziert, also wiederum ziemlich ideal. Um auch hier zu zeigen, wie identisch die Temperaturen gemessen wurden, sind die Werte des einen Loggers in den obigen Kurven um 1 °C erhöht, und diejenigen des anderen Loggers um 1 °C verringert dargestellt (graue Kurven). Der Mittelwert ist jeweils die schwarze Kurve.

Diskussion: Am Finsternistag war der Himmel praktisch wolkenlos. Da wir uns in einer schier unendlich weiten und flachen Wüste befanden, war keine sehr grosse Thermik vorhanden. Die blauen Kurven sind Polynome fünften Grades durch die Messpunkte ausserhalb der Finsternis. Damit kann für diese Finsternis eine Abkühlung um knapp 4 °C und einer Verzögerung von etwa sechs Minuten geschätzt werden. **Finsterniswind?** Dieser Ausdruck kursiert vielerorts. Er wird darauf zurückgeführt, dass die Abkühlung der Luft während einer Sonnenfinsternis einen „Fallwind“, den sogenannten Finsterniswind, erzeugt. Mir persönlich ist dieser Effekt noch nie aufgefallen, sondern das Gegenteil, wie besonders diese Messung - und andere auch - zeigen. Je mehr die Sonne bedeckt ist, desto geringer wird jegliche Thermik und Luftbewegung. Vielleicht wäre der Ausdruck **Finsternisflaute** eher angebracht.

Ein Reisebericht mit diesem Experiment kann auf der Webseite [RobertNufer.ch](http://robertnufer.ch) als pdf heruntergeladen werden: http://robertnufer.ch/02_finsternisse/2006_libyen/2006_libyen_tagebuch.pdf

Die totale Sonnenfinsternis am 1. August 2008 (Mongolei)

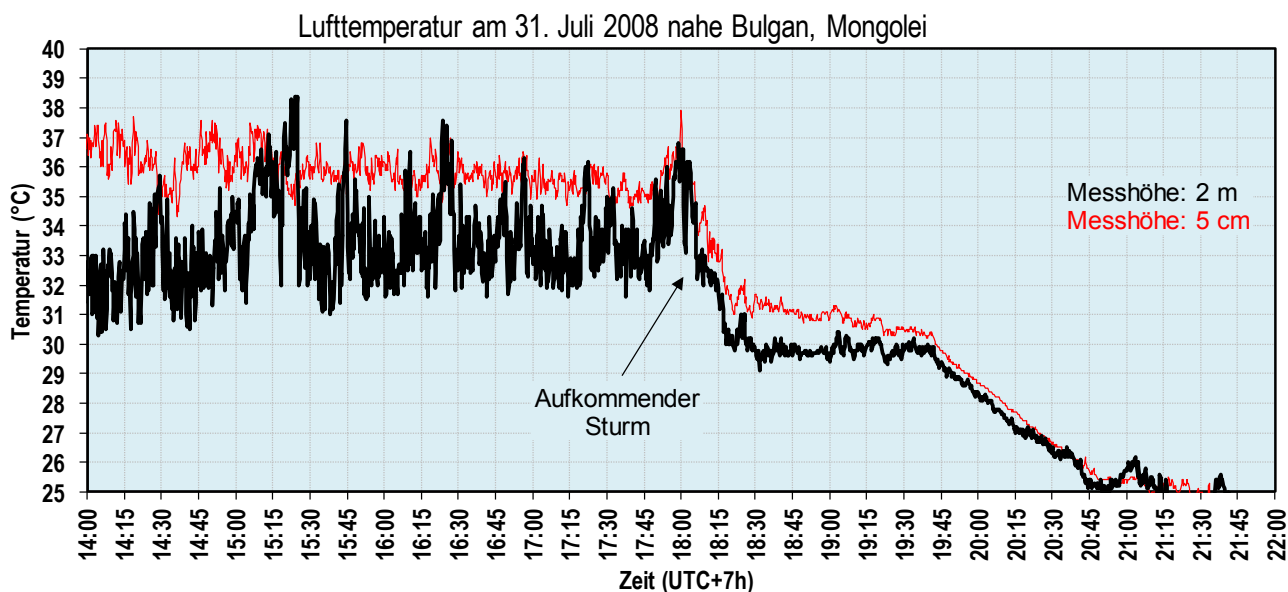


Bild 6a

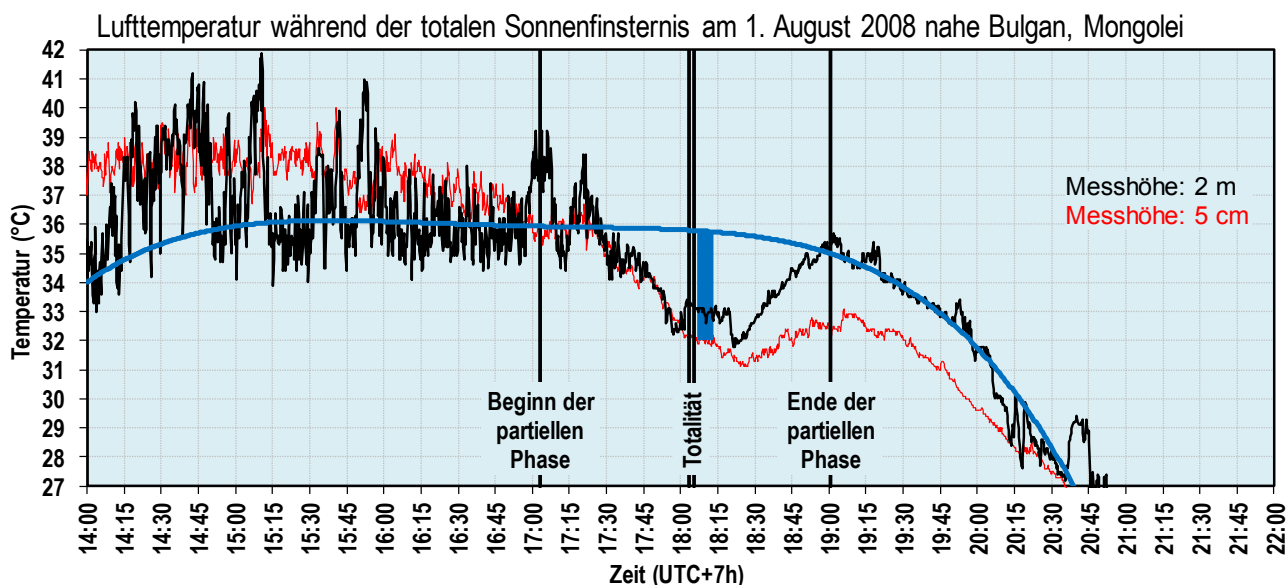


Bild 6b

Beobachtungsort: 45°57'32" N; 91°48'16" E, 23 km südöstlich von Bulgan, Mongolei.
Teilnehmer: Eine Reisegruppe um Fritz Arm (Vista-Reisen, Basel).

Bei diesem Temperaturmessungs-Experiment im Westen der Mongolei verwendeten wir zwei Logger (rechts in Bild 1), die alle fünfzehn Sekunden unabhängig voneinander messen. Da in dieser baumlosen Wüstenlandschaft ausser an den Koch- und Essjurten keine Möglichkeit bestand, die Geräte optimal zu platzieren, haben wir uns entschlossen, einen Sensor auf zwei Metern Höhe in eine gebastelte weisse horizontal ausgerichtete Papierröhre zu platzieren, und den anderen (ebenfalls in einer weissen Papierröhre) auf den Boden zu legen, so dass der Fühler etwa 5 cm über Grund war. Damit wollten wir zum ersten Mal den gemessenen Temperaturunterschied auf verschiedenen Messhöhen dokumentieren. Da wir mehr als einen Tag vor der Finsternis vor Ort waren, konnte der Temperaturverlauf eines „normalen“ Tages (31. Juli 2008) mit demjenigen mit der Sonnenfinsternis (1. August 2008) verglichen werden.

Diskussion: Die beiden Graphiken sehen fast so aus, als ob an beiden Tagen eine Finsternis stattgefunden hätte, aber der Temperaturabfall am 31. Juli 2008 war die Folge eines heftigen Sturmes, der um die gleiche Zeit wie die Sonnenfinsternis tags darauf aufzog. Das Beispiel zeigt somit, wie wenig sinnvoll meteorologische Langzeit-Voraussagen oder -statistiken sind („Climate is

what you expect, weather is what you get“). Der Boden am Beobachtungsort war relativ dunkel und wurde deshalb durch die Sonneneinstrahlung entsprechend aufgeheizt. Darum waren die Bodentemperaturen höher als die Zwei-Meter-Temperaturen, solange die Sonne hoch am Himmel stand. Auch der Einfluss der Thermik war sehr ausgeprägt mit starken Windböen, welche jeweils gegen Abend völlig zum Erliegen kamen. Auch waren die durch die Thermik bedingten Temperaturschwünge am Boden durchwegs viel kleiner als auf zwei Metern Höhe, eben weil am Boden viel eher dessen Temperatur(-Speichervermögen) und nicht diejenige der Luft gemessen wird.

Um die Finsterniszeit war der Himmel zum grössten Teil wolkenlos. Da wir uns in der Bergregion des Altai befanden, war grosse Thermik vorhanden. Ein Teil der Temperaturschwünge wurde durch die Jurte selbst bedingt, in der sich Wärme staute und dann wieder entwich, wenn die Türe längere Zeit offen stand. Die blaue Kurve ist ein Polynom fünften Grades durch einige manuell gesetzte Punkte, welche grob den vermuteten Verlauf ohne Finsternis approximieren soll. Damit kann für diese Finsternis eine Abkühlung um knapp 4 °C und einer Verzögerung von vielleicht zehn Minuten geschätzt werden.

Ein Reisebericht mit diesem Experiment kann auf der Webseite RobertNufer.ch als pdf heruntergeladen werden: http://RobertNufer.ch/02_finsternisse/2008_asien/mongolei_2008_rn.pdf

Die totale Sonnenfinsternis am 22. Juli 2009 (China)

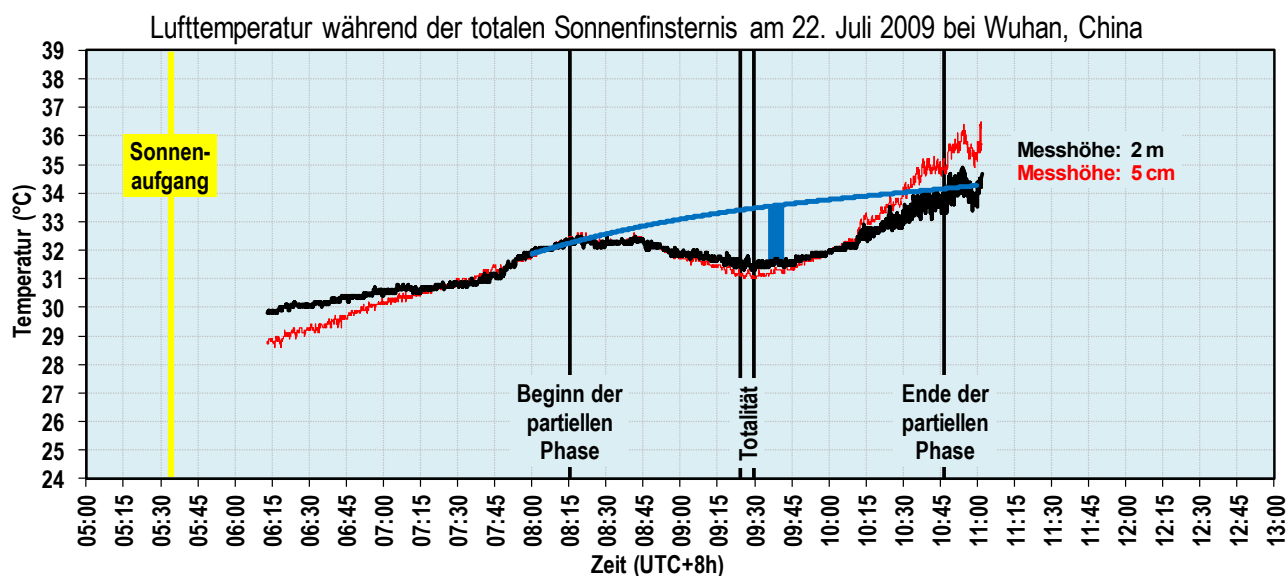


Bild 7

Beobachtungsort: 30°46'54" N; 114°28'54" E, am Lake Wuhu, Wuhan, China.
Teilnehmer: Drei Reisegruppen um Ralf Wittmann (Wittmann-Travel, Hamburg)

Bei diesem Temperaturmessungs-Experiment an einem kleinen See am Nordrand der Industrie-Metropole Wuhan verwendeten wir zwei Logger (rechts in Bild 1), die alle vier Sekunden unabhängig voneinander messen. Die Geräte wurden an der schattigen Westseite eines Strommastes aus Beton montiert, einer auf zwei Metern Höhe, der andere am Boden, so dass der Sensor fünf Zentimeter über Grund war.

Diskussion: Diese Finsternis zeigt sehr schön den „Bettdecken-Effekt“ bei bewölktem Himmel. Vor und während der meisten Zeit der Finsternis war der Himmel zu einem grossen Teil mit einer dünnen und für Finsternis-Fotografen lästigen Wolkenschicht bedeckt. Die Sonne war zwar nie ganz bedeckt, aber auch nie ganz sichtbar. Dadurch war die durch die Finsternis bedingte Abnahme der Sonnenbestrahlung viel kleiner als bei wolkenlosem Himmel, und zusätzlich konnte durch die Wolkendecke weniger Wärme in den Weltraum abgestrahlt werden. Erst gegen Ende der Finsternis begann sich die Wolkendecke deutlich zu lichten, und Thermik setzte ein.

Die blaue Kurve ist ein Polynom fünften Grades durch einige manuell gesetzte Punkte, welche grob den vermuteten Verlauf ohne Finsternis approximieren soll. Damit kann für diese Finsternis eine Abkühlung um 2 °C und einer Verzögerung von vielleicht zehn Minuten geschätzt werden.

Die feine rote Kurve der Messung in nur 5 cm Höhe zeigt wie der den Temperaturverlauf am Boden von der Atmosphäre abgekoppelt ist. Die Sonde wird in dieser Anordnung direkt vom Boden angestrahlt und entsprechend aufgeheizt.

Ein Reisebericht mit diesem Experiment kann auf der Webseite [RobertNufer.ch](http://robertnufer.ch) als pdf heruntergeladen werden: http://robertnufer.ch/02_finsternisse/2009_china/china_2009_rn.pdf

Die totale Sonnenfinsternis am 11. Juli 2010 (Französisch Polynesien)

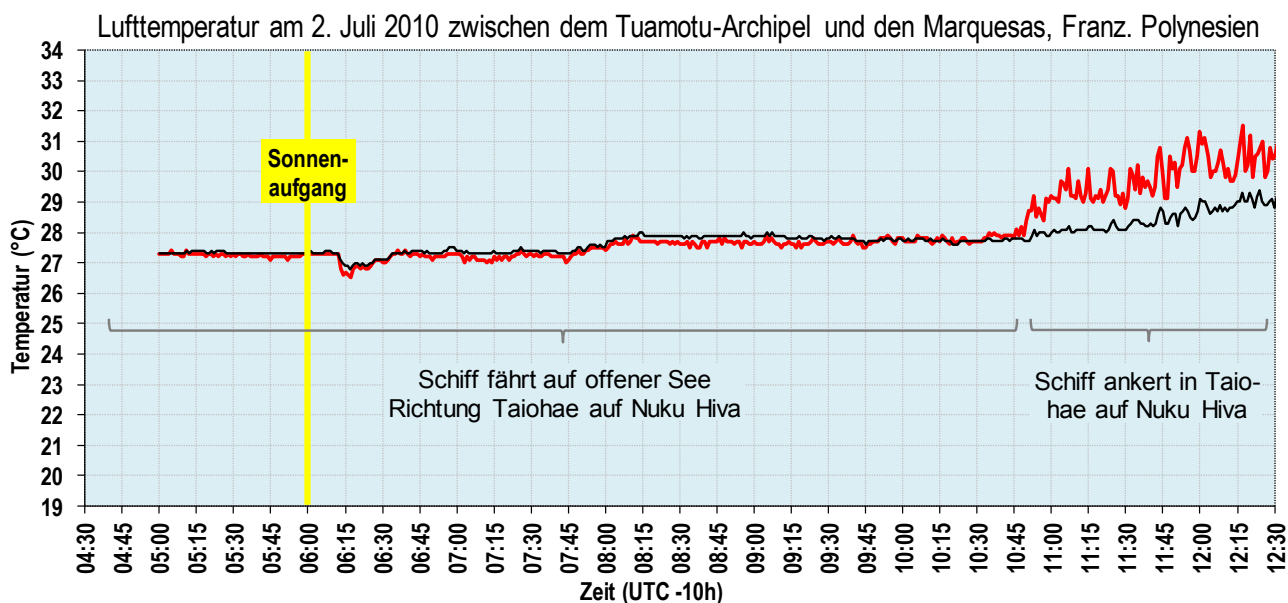


Bild 8a

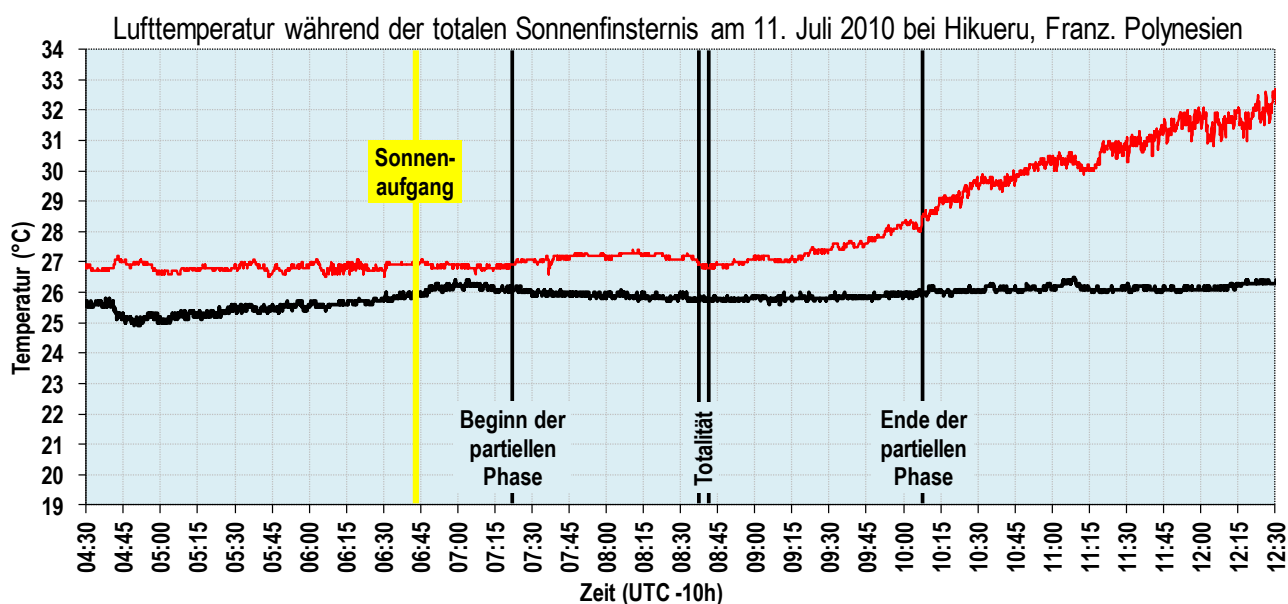


Bild 8b

Beobachtungsort: 17°55'55" S; 142°26'05" W, an Bord des Personenfrachters Aranui 3, zwischen den Atollen Hikueru und Marokau, Tuamotu Archipel, Französisch Polynesien. Teilnehmer: Passagiere der Aranui 3.

Möglichst optimale Standorte für die beiden Logger (rechts in Bild 1) zu finden war an Bord der Aranui 3 schwierig, denn je nach Lage der Sensoren machten Fahrtwind (Durchzug) und Gischt Test-Messungen völlig unbrauchbar. Als günstigste Stelle erwiesen sich schattige, waagerechte U-förmige Stahlprofile neben den Suiten (links und rechts) auf etwa zehn Metern Höhe über der Wasserlinie.

Diskussion: Der Pazifik ist ein gigantischer Wärmespeicher, dessen Oberflächen-Temperatur sich in dieser Region im Laufe eines Jahres allenfalls um 0.4 °C PRO MONAT ändert. Eine Sonnenfinsternis kann deshalb auf offener See kaum einen messbaren Einfluss haben.

Bild 8a bestätigt diese Annahme. Solange das Schiff am 2. Juli 2010 nach Nordosten fuhr, veränderte sich die Temperatur links und rechts am Schiff auch lange nach Sonnenaufgang kaum. Das knappe Grad kann auf die leichte Erwärmung des Schiffs zurückgeführt werden. Nachdem das Schiff im Hafen von Taiohae vor Anker lag und kein ausgleichender Fahrtwind mehr wirken konnte,

erwärmte sich die der Sonne zugewandte Seite (rote Kurve) mehr als die Schattenseite (schwarze Kurve).

Am Morgen der Finsternis am 11. Juli 2010 zeigte der Bug der Aranui 3 nach Südwesten bis Westen und die Aranui 3 fuhr nur sehr langsam. Gerade schnell genug, um die Orientierung halten zu können und die Gäste auf den Terrassen am Heck des Schiffs optimale Sicht zur Sonne hatten. Die "richtige" schwarze Kurve wurde an der linken schattigeren Schiffsseite gemessen und zeigte während und auch nach der Finsternis kaum eine Temperaturänderung. Auf der rechten Seite war die Temperatur immer ein Grad höher und driftete mehr und mehr nach oben, je höher die Sonne stand. Nach der Finsternis nahm das Schiff denn auch Kurs auf Tahiti (274°), wodurch die Sonne noch mehr an die rechte Schiffsseite schien. Deshalb war die gemessene Temperatur gegen Ende der Messung dort auch 6 °C höher.

Ein Reisebericht mit diesem Experiment kann auf der Webseite [RobertNufer.ch](http://robertnufer.ch) heruntergeladen werden:

http://robertnufer.ch/02_finsternisse/2010_tahiti/2010_tahiti_tagebuch/tahiti_2010_tagebuch.htm

Die totale Sonnenfinsternis am 14. November 2012 (Australien)

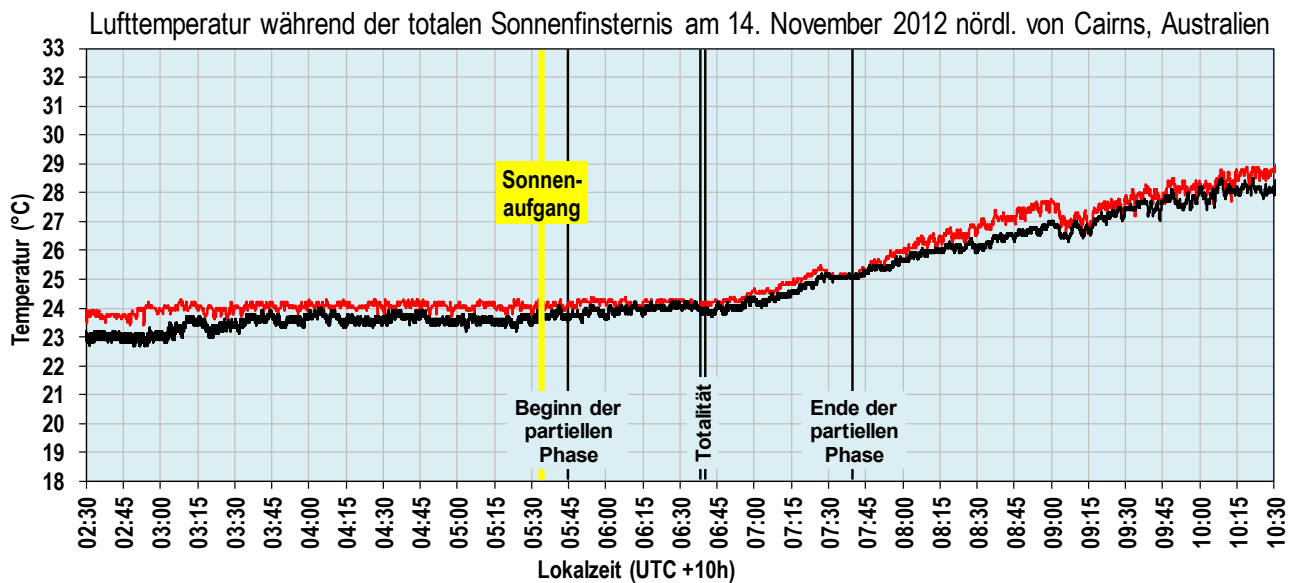


Bild 9

Beobachtungsort: 16°43'38" S; 145°38'53" E, Campground „Ellis Beach“ bei Cairns, Queensland, Australien. Teilnehmer: Robert und Susanne Nufer, Patrick Gfeller.

Bei diesem Temperaturmessungs-Experiment verwendeten wir zwei Logger (rechts in Bild 1), die alle zwei (am Baum), resp. vier Sekunden (bei der Dusche) unabhängig voneinander messen. Ein Gerät wurde auf zwei Metern Höhe an der Schattenseite eines grossen, dicken Baumes montiert (schwarze Kurve). Das andere hing auch auf etwa zwei Metern Höhe an der Aussenwand des Duschens- und Toilettengebäudes.

Diskussion: Die beim Duschengebäude gemessene Temperatur war unabhängig von allen anderen Einflüssen ganz wenig höher, was wohl durch die Wärmekapazität des Baumaterials erklärt werden kann. Der Effekt der Sonnenfinsternis war in diesem Fall einfach der um eine Stunde verspätete Anstieg der Tagestemperatur. Wird die ansteigende Kurve ab dem Zeitpunkt der Totalität in Gedanken eine Stunde nach links verschoben, kann um die Totalitätszeit ein Effekt von etwa 1 °C abgeschätzt werden.

Ein Reisebericht mit diesem Experiment kann auf der Webseite [RobertNufer.ch](http://robertnufer.ch) heruntergeladen werden:

http://robertnufer.ch/02_finsternisse/2012_australien/2012_australien_tagebuch/2012_australien_tagebuch_page.htm

Die totale Sonnenfinsternis am 9. März 2016 (Indonesien)

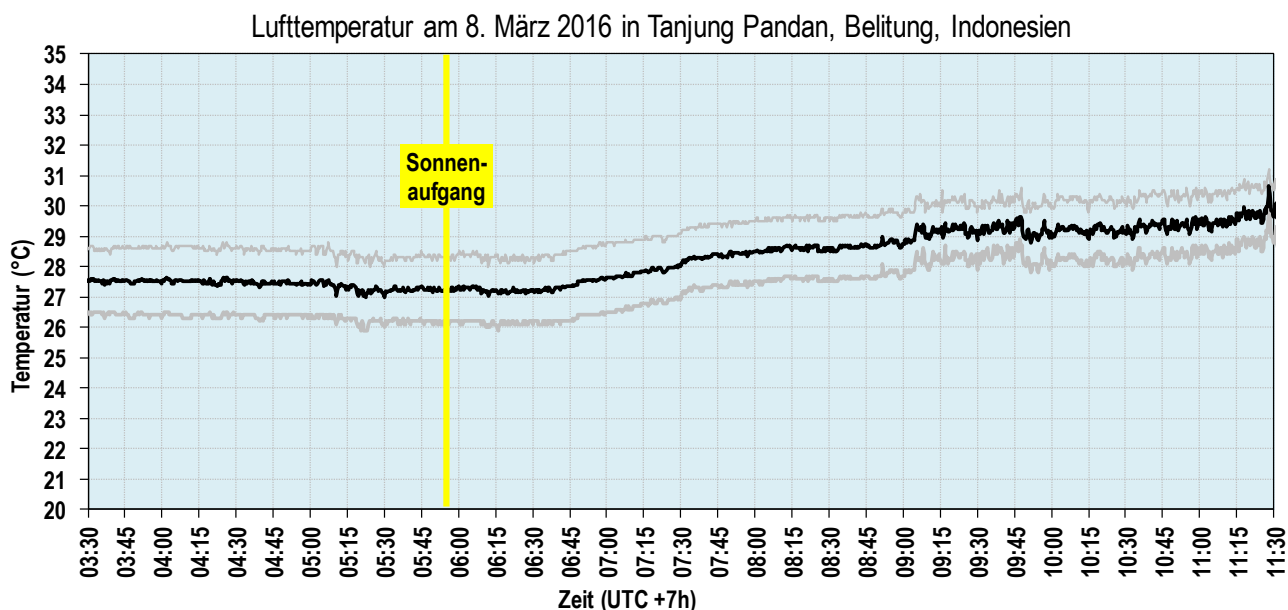


Bild 10a

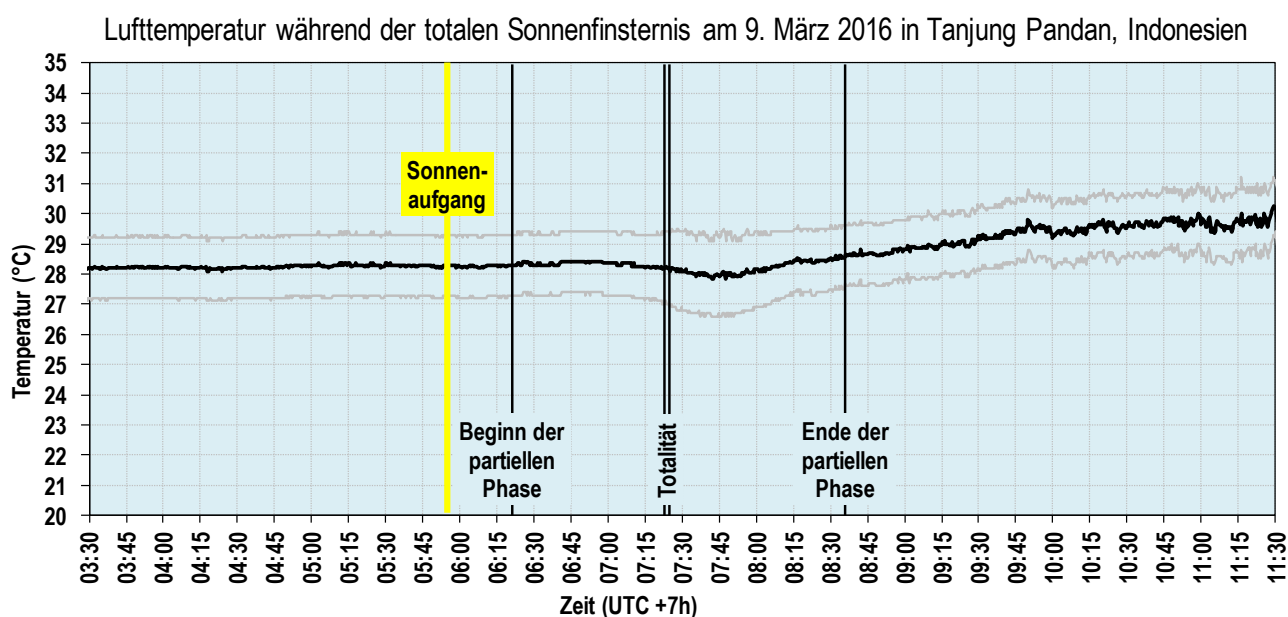


Bild 10b

Beobachtungsort: 2°44'35" S; 107°37'28" E, am Strand von Tanjung Pandan, Belitung, Indonesien. Teilnehmer: Robert Nufer und Patrick Gfeller.

Bei diesem Temperaturmessungs-Experiment verwendeten wir zwei Logger (rechts in Bild 1), die alle während drei Tagen alle zwanzig Sekunden unabhängig voneinander messen. Die Geräte wurden auf etwa zwei Metern Höhe mit drei Metern Abstand voneinander an der überdachten schattigen Nordseite unseres Hotels an Kühlwasserschläuchen von Klimageräten montiert; eine bessere Montagemöglichkeit hatten wir nicht gefunden. Um zu zeigen, wie identisch die Temperaturen gemessen wurden, sind die Werte des einen Loggers in den obigen Kurven um 1 °C erhöht, und diejenigen des anderen Loggers um 1 °C verringert dargestellt (graue Kurven). Der Mittelwert ist jeweils die schwarze Kurve. Belitung ist eine kleine Insel zwischen Sumatra und Borneo, nur dreimal so gross wie der Kanton Luzern. Deshalb sind am Strand auch nicht allzu grosse Temperatureauschläge zu erwarten.

Diskussion: Bild 10a zeigt den „normalen“ Temperaturverlauf an einem teils bewölkten Morgen. Eine praktisch identische Kurve (nicht gezeigt) wurde am 10. März 2016, dem Tag nach der Sonnenfinsternis gemessen. Etwa dreissig Minuten nach Sonnenaufgang begann die Temperatur line-

ar anzusteigen. Die Tageshöchsttemperatur war jeweils etwa 31 °C. Ab neun Uhr nahmen die durch Thermik bedingten Amplituden leicht zu.

Während der Finsternis zeigte einer der Sensoren (obere graue Kurve in Bild 10b) praktisch keinen Temperaturabfall. Der andere Sensor mass einen Abfall von einem Grad. Ausserhalb der Finsternis waren die gemessenen Werte beider Logger jedoch praktisch bis auf ein Zehntelgrad identisch. Für diese Diskrepanz fanden wir bislang keine Erklärung, ausser den Klimageräten in unmittelbarer Nähe der Sensoren. Nur die untere graue Kurve zu benutzen wäre eine Beschönigung der Daten. Selbst dann müsste eine Erklärung gefunden werden, warum es nach Sonnenaufgang kühler geworden sein sollte, hingegen die Temperatur vor Sonnenaufgang über Stunden konstant gewesen war.

Ein Reisebericht kann auf der Webseite [RobertNufer.ch](http://robertnufer.ch) heruntergeladen werden:

http://robertnufer.ch/02_finsternisse/2016_indonesien/2016_indonesien_tagebuch/2016_indonesien_tagebuch.htm

Die totale Sonnenfinsternis am 21. August 2017 (USA)

Lufttemperatur während der totalen Sonnenfinsternis am 21. August 2017 bei Stapleton, NE, USA

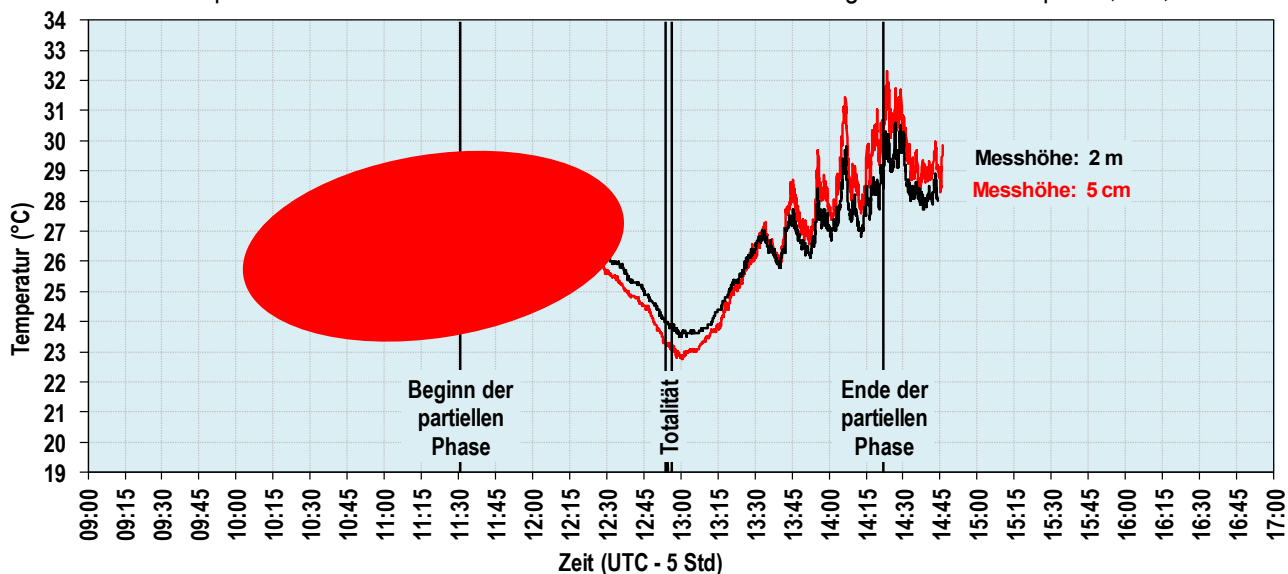


Bild 11

Beobachtungsort: 41°25'59" N; 100°30'11" W, auf einem Feld nahe Stapleton, NE, USA. Teilnehmer: Robert und Susanne Nufer, sowie Manfred und Verena Grünig.

Bei diesem Temperaturmessungs-Experiment verwendeten wir fünf Logger (rechts in Bild 1), die alle zwei resp. drei Sekunden unabhängig voneinander messen. Eine detailliertere Datenanalyse aller fünf Geräte folgt weiter unten. Die Geräte wurden auf einem Feld auf 2 m Höhe und auf 5 cm (am Boden) platziert.

Diskussion: Bild 11 zeigt den Temperaturverlauf auf 2 m Höhe (schwarze Kurve) sowie auf 5 cm, also praktisch die Bodentemperatur (rote Kurve). Vor der Totalität war die Abschattung auf 2 m nicht optimal (rotes Oval). Das ist daran ersichtlich, dass die Temperatur dort höher ist als am Boden.

Die Minimaltemperatur wird etwa fünf Minuten nach der Totalität erreicht. Sie ist am Boden etwa 1 °C tiefer als auf 2 m. Der Anstieg der Temperatur am Boden ist nach der Totalität steiler als auf 2 m, ebenso sind Temperaturschwankungen durch vorbeiziehende Wolkenbänder ab 13:30 am Boden stärker als auf 2 m. Je höher gemessen wird, desto gedämpfter fallen Temperaturunterschiede aus.

Ein Reisebericht kann auf der Webseite [RobertNufer.ch](http://robertnufer.ch) heruntergeladen werden:

http://robertnufer.ch/02_finsternisse/2017_usa/2017_usa_tagebuch/2017_usa_tagebuch.htm

Einige technische Details zu den Messungen:

Es wurden folgende fünf Temperatur-Logger Modell testostor 171 der Firma Testo AG, Schweiz eingesetzt (Bild 1 rechts):

Messhöhe	Name	Typ	Serial number	Firmware	Messpunkte	Herkunft
3.30 m	Sonde A	171-2	502 5025 00062	T171 V2.30	28668	Sandoz AG
2.00 m	Sonde B	171-2	502 5025 00034	T171 V2.30	28668	Sandoz AG
1.12 m	Sonde C	171-2	502 5025 00044	T171 V2.61	28668	Sandoz AG
0.05 m	Sonde D	171-3	803 8803 00070	T171 V2.74	10008	Sandoz AG
0.05 m	Sonde E	171-3	803 8803 00086	T171 V2.74	10008	Sandoz AG

Die Temperatur wird über einen NTC-Widerstand gemessen, der sich zusammen mit dem Feuchte-Sensor unter dem lamellierten Aluminium-Deckel (Bild 1 rechts) befindet. Durch die Kleinheit des Widerstandes ist die Reaktionszeit sehr kurz. Im Vergleich zu einer Sonnenfinsternis, wo Temperaturänderungen von vielleicht fünf Grad Celsius innerhalb einer Stunde auftreten, können mit den Loggern Temperaturänderungen von fünf Grad Celsius in einer Sekunde gemessen werden, wie in einem Experiment festgestellt wurde.

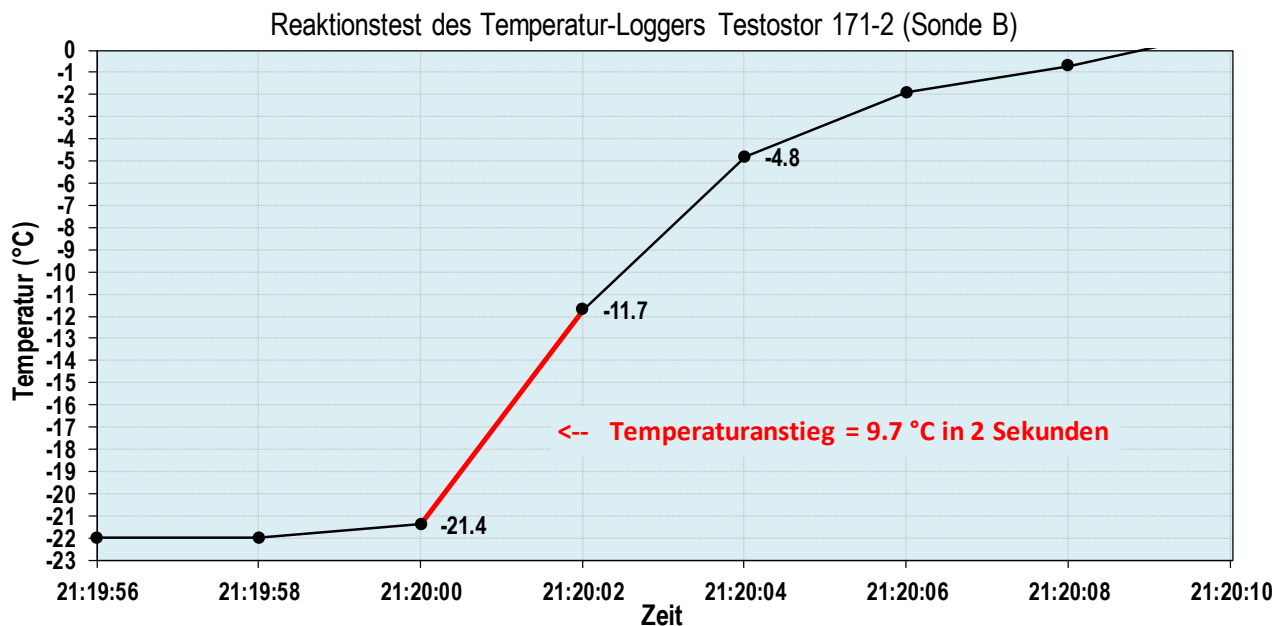


Bild 12

Messung der Temperaturänderung: Ein Gerät wurde bei -20 °C in einem Tiefkühlschrank gelagert und dann herausgenommen. Alle zwei Sekunden wurde gemessen. Der Temperaturanstieg zu Beginn war 9.7 °C in 2 Sekunden oder etwa 5 °C pro Sekunde. Dass die Kurve dann abflacht liegt daran, dass sich am Sensor Kondenswasser bildete.

Die Genauigkeit der internen Uhr der testostor 171 ist nicht besonders gut, die Präzision hingegen schon. Um die Zeitpunkte der Messungen möglichst genau zu kennen, müssen die Uhren der Sensoren möglichst kurz vor Messbeginn mit einer offiziellen Internetzeit synchronisiert werden. Möglichst kurz nach der Messung muss dann die Abweichung bestimmt werden. Es kann dann angenommen werden, dass sich die zeitliche Abweichung gleichmässig aufgebaut hat. Bei diesem Experiment wurden die Sensoren etwa drei Wochen vor der Sonnenfinsternis synchronisiert und vier Tage nach der Finsternis – als wir nach der USA-Reise wieder zuhause waren – ausgelesen.

Messhöhe	Name	Typ	Synchronisiert (UTC)	Ausgelesen (UTC)	Angezeigte Zeit	Fehler (Sek.)
3.30 m	Sonde A	171-2	29.07.2017 05:49:41	25.08.2017 20:24:07	25.08.2017 20:23:19	-48
2.00 m	Sonde B	171-2	29.07.2017 05:52:07	25.08.2017 19:34:36	25.08.2017 19:33:47	-49
1.12 m	Sonde C	171-2	29.07.2017 05:52:54	25.08.2017 20:14:47	25.08.2017 20:14:00	-47
0.05 m	Sonde D	171-3	29.07.2017 06:12:51	25.08.2017 20:10:37	25.08.2017 20:09:17	-80
0.05 m	Sonde E	171-3	29.07.2017 06:02:46	25.08.2017 20:05:19	25.08.2017 20:03:58	-81

Die Tabelle zeigt die gute Präzision der internen testostor Uhren. Die Modelle 171-2 weisen nach drei Wochen alle eine Abweichung von 48 ± 1 Sekunden auf, die Modelle eine Abweichung von je etwa 80 Sekunden. Zum Zeitpunkt der Sonnenfinsternis am 21. August 2017 kann für die Modelle 171-2 eine Abweichung von 40-41 Sekunden angenommen werden und für die Modelle 171-3 eine Abweichung von 60-61 Sekunden. Diese Abweichungen sind in den Analysen der Finsternis berücksichtigt. Den Gesamtfehler (Unsicherheit) in den Zeitpunkten schätze ich auf kleiner als fünf Sekunden.

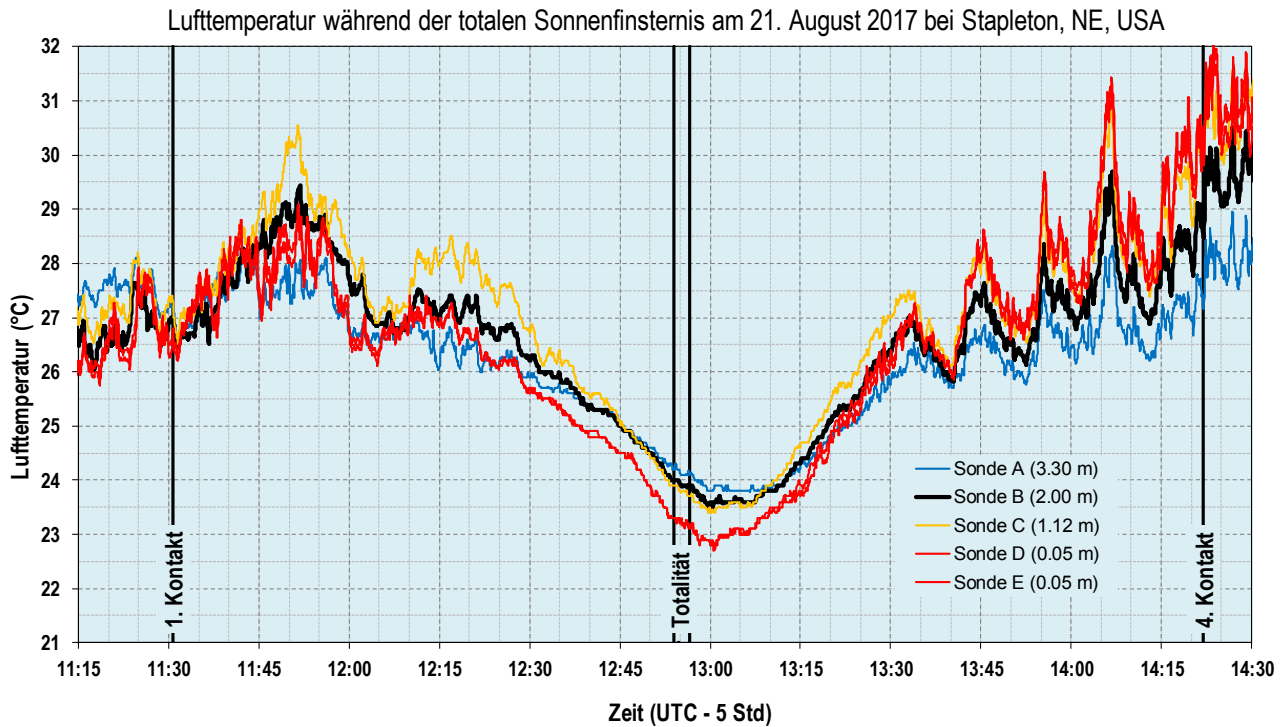


Bild 13

Die Temperatur wurde auch auf 3.3 m (blaue Kurve) und 1.12 m (orange Kurve) über dem Boden gemessen. Leider war die Abschattung des Sensors auf 1.12 m vor 13:35 nicht optimal. Das gleiche gilt für die Messung auf 2 m (schwarze Kurve) bis kurz vor der Totalität.

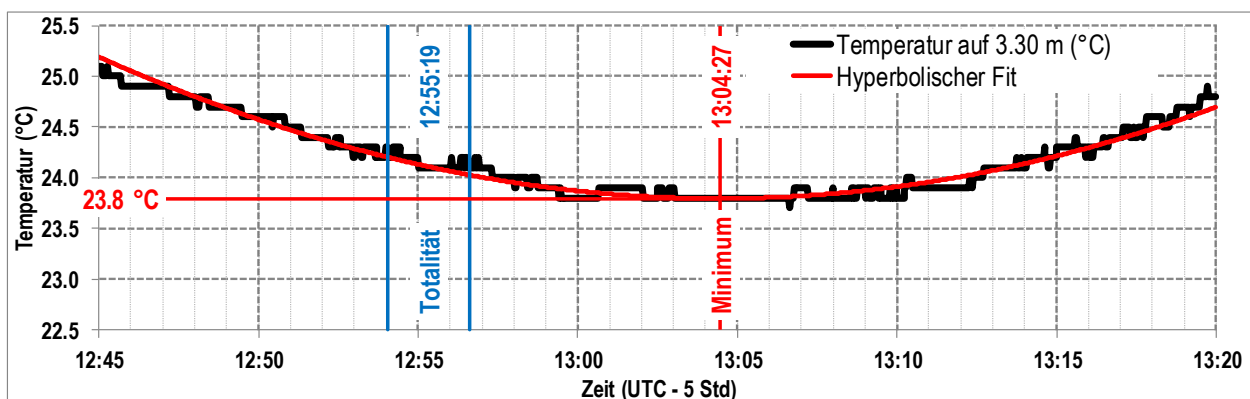
Je höher gemessen wird, desto geringer ist die erwartete Lufttemperatur unter normalen Bedingungen. Deshalb sollte die blaue Kurve die unterste sein und die rote Kurve die oberste. Etwa ab 13:35, als die Sonne wieder zur Hälfte frei ist, ist dieses Verhältnis wieder hergestellt.

Aber mit fortschreitender Bedeckung der Sonne durch den Mond in der partiellen Phase vor der Totalität wird der Boden nicht mehr durch Sonneneinstrahlung erwärmt. Der Boden kühlt deshalb ab. Je näher Luftmoleküle dem Boden sind, desto weniger Wärme bekommen sie nun von unten zugeführt. Je höher sich Luftschichten befinden, desto gedämpfter ist dieser Temperatur-Rückgang und es kommt kurzfristig zu einer Umkehr der Temperaturverläufe. Dazu kommt eine kleine zeitliche Verzögerung, je höher gemessen wird.

Um den Zeitpunkt des Temperatur-Minimums zu bestimmen, wurden die Werte zwischen 12:45 (UTC – 5 Std) und 13:20 verwendet. Es hat sich gezeigt, dass sich diese Werte sehr gut mit einer Hyperbelfunktion beschreiben lassen, wie in Bild 14 ersichtlich ist.

Für den Fit wurden die Messungen tieferer Temperaturen (um das Temperatur-Minimum herum) etwas mehr gewichtet als die höheren Temperaturen an den Rändern des Zeitfensters.

Gewichtung = $1/(\text{Temperatur} - 22.5 \text{ °C})$.



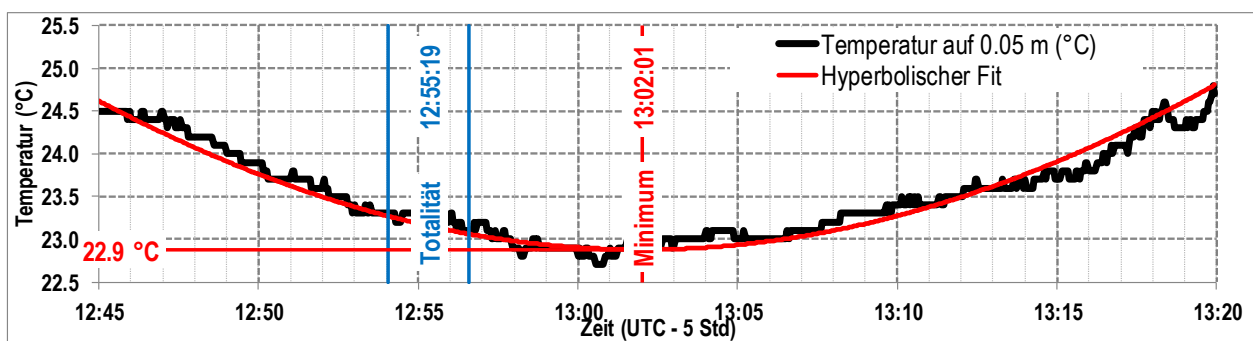
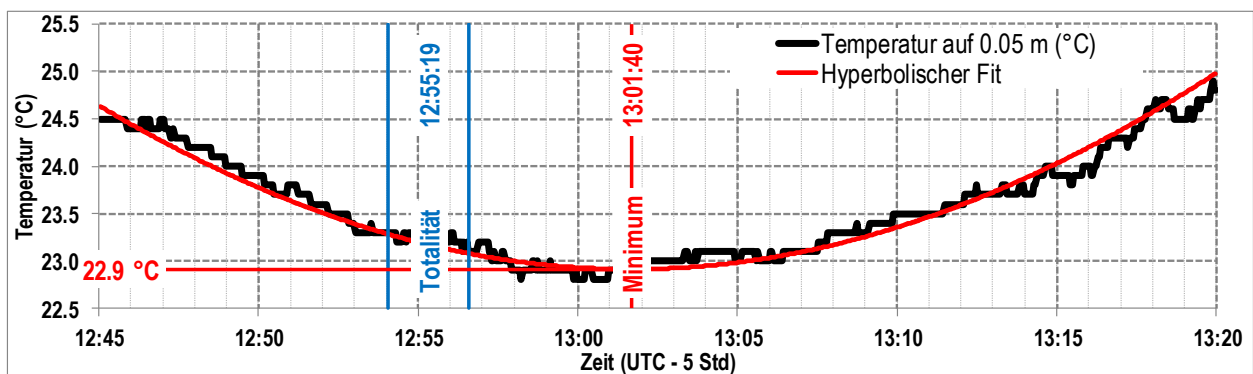
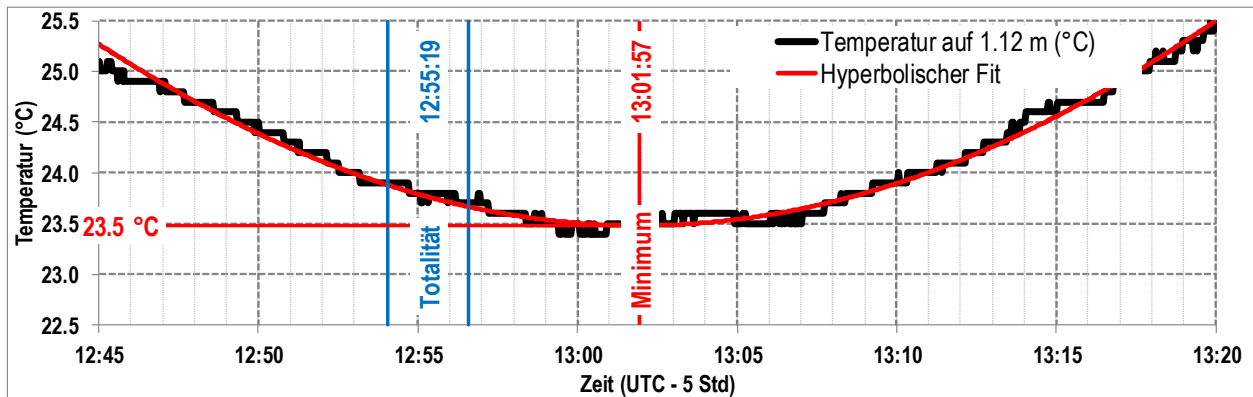
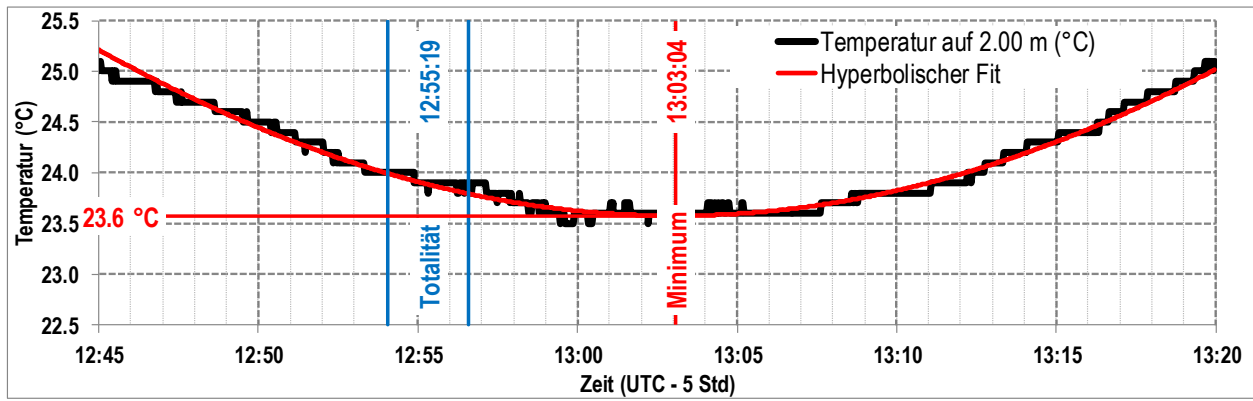


Bild 14

Bestimmung des Temperatur-Minimums auf verschiedenen Messhöhen. Die zeitliche Verzögerung auf 3.3 m zur Mitte der Totalität beträgt $9^{\text{min}}07^{\text{sek}}$, während sie am Boden (auf 0.05 m) nur $6^{\text{min}}31^{\text{sek}}$ beträgt (gemessen: $6^{\text{min}}21^{\text{sek}}$ und $6^{\text{min}}41^{\text{sek}}$).

Schlussfolgerung

Ich bin der Meinung, dass diese Temperaturmessungen erstaunlich viele interessante Aspekte aufzeigen, die es in jedem Fall rechtfertigen, weitere Messungen durchzuführen, obschon Temperaturmessungen natürlich nicht der Hauptgrund sind, Sonnenfinsternissen nachzureisen. Falls möglich, sollten mehrere unabhängig voneinander messende Geräte am gleichen Beobachtungsort benutzt werden. Das Betrachten aller hier präsentierten elektronisch gemessenen Temperaturkurven hat in mir das Interesse für das Thema Finsterniswind oder Finsternisflaute geweckt. Ich werde nach Möglichkeit versuchen, in Zukunft Windstärke und –richtung aufzuzeichnen.

Danksagung

Ich danke Herrn Dr. Andreas Hänel für die Daten seiner Messungen am 11. August bei St. Morel (Frankreich) und in Osnabrück.

Weiterführende Links

- [Hän] Andreas Hänel, Die Sonnenfinsternis vom 11. 8. 1999, Osnabrücker Naturwissenschaftliche Mitteilungen, Band 26, S. 7–14, 2000
- [Ori1] ORION, Die Fachzeitschrift für Astronomie der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft (SAG) Heft 286; Ausgabe 3 (1998)
- [Ori2] ORION, Die Fachzeitschrift für Astronomie der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft (SAG) Heft 306; Ausgabe 5 (2001)