

Zeitschrift: Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaften beider Basel
Herausgeber: Naturforschende Gesellschaft Basel ; Naturforschende Gesellschaft Baselland
Band: 8 (2005)

Artikel: Welchen Einfluss hat die Höhe über Meer auf den Siedepunkt von Wasser?
Autor: Schäfer, Franz
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-676815>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 04.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Welchen Einfluss hat die Höhe über Meer auf den Siedepunkt von Wasser?

FRANZ SCHÄFER

Einleitung

In der Literatur und in Tabellen findet man für den Siedepunkt von Wasser eine Temperatur von 100.00°C. Dieser Wert gilt aber nur für einen mittleren Luftdruck auf Meereshöhe. Dieser ist international auf 1013.25 hPa respektive mbar festgelegt, in älterer Literatur ist dieser Wert noch in 760 Torr respektive mmHg angegeben. Mit steigender Höhe nimmt der Luftdruck ab, wie verhält sich dazu der Siedepunkt von Wasser? In Tabellen kann man den Siedepunkt für Höhen über Meer nachsehen und interpolieren. So findet man für die Bahnstation des Jungfrauojchs (3454 m ü. M.) einen Siedepunkt von 88.5°C.

Nun taucht vermutlich die Frage auf, ob man auf dem Jungfrauojch noch Eier kochen kann. Im Ei wird das Eiweiss über 63°C geléeartig, das Eigelb aber erst bei Temperaturen über 70°C fest. Wie lange muss ein Ei auf dem Jungfrauojch gekocht werden, damit es die gleiche Konsistenz wie auf 300 m über Meer erreicht? In den Handbüchern der Thermodynamik findet man

für den Wärmeübergang die Formel $Q = k \times A \times \Delta T$. Q ist die Leistung in W, k die Wärmedurchgangszahl in $W/m^2 K$, A die Austauschfläche in m^2 und ΔT die Temperaturdifferenz an der Austauschfläche in K. In unserem Fall ist A konstant und der Wert für k ist unbekannt, kann aber für eine unbewegte Masse als konstant angenommen werden. Somit muss für unsere Frage nur noch ΔT berücksichtigt werden, damit ist Q proportional zu ΔT . Die Temperaturdifferenz ΔT entspricht $T_1 - T_2$, wobei T_1 die Siedetemperatur des Wassers ist und T_2 die Temperatur im Ei, vom Anfang bis das Eigelb fest wird (ca. 70°C). Die benötigte Dauer zum Eierkochen ist in der Abb. 1 graphisch dargestellt.

Fragestellung

Wann siedet Wasser auf dem Jungfrauojch (3454 m ü. M.), dem Gipfel des Mont Blanc (4807 m ü. M.), dem Gipfel des Kilimanjaro (5898 m ü. M.) oder dem Gipfel des Mount Everest (8848 m ü. M.)? Wie gelangt man zu diesen Daten, wenn die entsprechende Literatur fehlt? Der Siedepunkt lässt sich aber auch berechnen, sofern man den Siedepunkt des Wassers als Funktion von Luftdruck respektive Höhe über Meer kennt. Dieser Zusammenhang soll in diesem Artikel aus einer der bekannten Funktionen $T_s = f(p)$ und den Tabellenwerten für Luftdruck und Höhe über Meer erarbeitet werden.

Warum kommt man überhaupt auf die Idee, dieses Problem anzugehen? In der chemischen Industrie werden vielfach Reaktionen bei der Siedetemperatur eines Lösungsmittels durchgeführt. Die Siedepunkte von Flüssigkeiten findet man in der chemisch-physikalischen Literatur. Die aufgeführten Werte gelten, wo nichts anderes vermerkt, für den Normaldruck von 1013.25 mbar. Diese sind vom Systemdruck abhängig

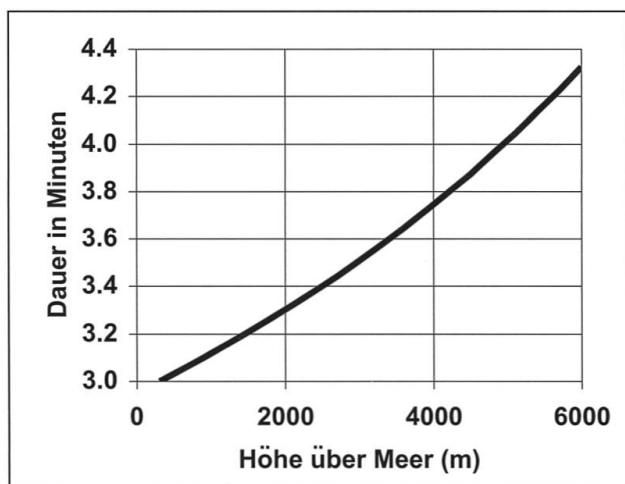


Abb. 1: Dauer des Eierkochens in Abhängigkeit der topographischen Höhe.

und sinken mit abnehmendem Druck auf tiefere Werte.

Eine Reaktion, die siedend in Alkohol (Ethanol) durchgeführt wird, verläuft in einem topographisch höher gelegenen Werk nur noch schleppend. Nehmen wir als Beispiel eine Produktionsstätte in Puebla/Mexiko an, das auf 2160 m ü. M. liegt: Hier siedet Ethanol statt bei 78.15°C schon bei 71.6°C, und somit um 6.5 K tiefer. Dieses Problem führte zur Herleitung einer einfachen Funktion von Luftdruck und Siedetemperatur einer Flüssigkeit. Als Faustregel rechnet der Chemiker, dass eine Reaktion bei 10 K tieferer Temperatur etwa halb so schnell abläuft, falls nicht die Temperatur, bei der die Reaktion anspringt, unterschritten wird.

Herleitung der Berechnung von Luftdruck und Siedepunkt von Wasser

Für den Dampfdruck eines Stoffes sind in der Literatur diverse Gleichungen zur Berechnung des Siedepunktes bei verschiedenen Drucken zu finden. Eine einfache Formel, die meist verwendet wird, ist die Dampfdruckgleichung nach Antoine. Sie lautet:

$$\log p = A - \frac{B}{T + C} \quad (1).$$

darin ist p der absolute Druck in hPa. Nach SI-Norm wird der Druck in Pascal (Pa) angegeben, da aber dies eine kleine Einheit ist, rechnet man mit hPa oder mbar. In der Industrie und Technik wird die Einheit mbar = 100 Pa oder bar = 100 000 Pa verwendet. T ist die Temperatur in °C und A , B und C sind die Antoine-Konstanten. Für Wasser findet man folgende Werte für den Bereich von 200 – 1430 hPa und 60 – 110°C: $A = 8.05675$ hPa, $B = 1646.580$ hPa°C und $C = 225.987$ °C. Durch Umformen der Gleichung erhält man

$$T_s = \frac{B}{A - \log p} - C \quad (2).$$

Für die Funktion Luftdruck und Höhe über Meer können die Werte aus der Tabelle Normalatmosphäre ICAO verwendet werden. Mittels mathematischer Methoden werden die Tabellenwerte in eine Funktion übergeführt, die die Tabellenwerte am besten wiedergibt. Die besten Resultate ergeben in unserem Fall die Methode von J. R. Brosens, die nach einer hyperbolischen Funktion rechnet.

$$\log p = a + \frac{b}{h - c} \quad (3).$$

darin sind p der Luftdruck in hPa und h die Höhe in m über Meer. Die erhaltenen Faktoren sind $a = 7.518207$ hPa, $b = 395\,559.4$ hPa m und $c = 87\,658.97$ m, die Differenz zwischen Gleichung 3 und den Tabellenwerten beträgt für den Bereich von

–1000 bis 6000 m ü. M. ± 0.07 hPa, bis 14 000 m ü. M. steigt die Abweichung auf ± 1 hPa. Die Abweichungen von den Literaturwerten sind in Tab. 1 ersichtlich. Um die zu einem gegebenen Luftdruck entsprechende Höhe zu erhalten, wird die Formel mathematisch umgeformt und lautet dann wie folgt:

$$h = c + \frac{b}{\log p - a} \quad (4).$$

Aus den beiden obigen Gleichungen 2 und 3 ergibt sich, zusammengefasst die Gleichung für die Siedetemperatur von Flüssigkeiten in Funktion der Höhe über Meer.

Höhe	Luftdruck		
über Meer	aus Tabelle entnommen	nach Formel 3 berechnet	Differenz: Tabellenwert - Wert nach Formel 3
m	p in hPa	p in hPa	Δp in hPa
0	1013.250	1013.273	-0.023
500	954.612	954.641	-0.029
1000	898.762	898.783	-0.021
1500	845.596	845.601	-0.005
2000	795.014	795.000	0.014
2500	746.917	746.886	0.031
3000	701.211	701.166	0.045
3500	657.803	657.751	0.052
4000	616.604	616.553	0.051
4500	577.525	577.486	0.039
5000	540.482	540.466	0.016
5500	505.393	505.412	-0.019
6000	472.176	472.243	-0.067
6500	440.754	440.883	-0.129
7000	411.052	411.254	-0.202
7500	382.996	383.284	-0.288
8000	356.516	356.900	-0.384
8500	331.541	332.033	-0.492
9000	308.007	308.615	-0.608

Tab. 1: Luftdruck in Abhängigkeit der topographischen Höhe. Bezugswerte aus Manual of the ICAO Standard Atmosphere (Montreal 1964).

Darin sind h die Höhe in m über Meer und T_s die Siedetemperatur in °C.

$$T_s = \frac{B(h-c) - C((A-a)(h-c) - b)}{(A-a)(h-c) - b} \quad (5).$$

Setzt man nun die Antoine-Konstanten für Wasser und die Faktoren der Gleichung 3 ein, ergibt sich folgende Formel:

$$T_s = \frac{2831.485h - 82217765.7}{h - 822158.165} \quad (6).$$

Diese Formel ergibt eine Differenz zu den tabellarischen Werten von ± 0.01 K bis 6000 m ü. M. und < 0.1 K bis 10000 m ü. M.

Der Siedepunkt von Wasser als Funktion der Höhe über Meer kann auch direkt aus den Tabellenwerten gelesen werden. Eine solche Tabelle ist in den Wissenschaftlichen Tabellen Geigy (1968, S. 246–248) veröffentlicht. Hier sind die gesuchten Daten in Höhenintervallen von 50 m aufgezeichnet, der Siedepunkt von Wasser wurde als interpolierte Werte aus den Smithsonian Meteorological Tables (1946) eingesetzt. Durch lineare Regression dieser Daten kann man direkt zu einer Gleichung der Abhängigkeit des Siedepunktes von Wasser von der Meereshöhe gelangen. Im vorliegenden Fall wird aber eine Gleichung gesucht, die für verschiedene Stoffe, wie in obigem Beispiel Ethanol, angewendet werden kann. Dazu ist die Dampfdruckgleichung von Antoine am besten geeignet, de-

Druck in hPa	Luftdruck	Siedetemperatur von Wasser in °C	Abweichung in K
974.84	normal	98.92	
930	minimales Tief	97.62	-1.31
960	normales Minimum	98.50	-0.43
990	normales Maximum	99.35	0.43
1010	maximales Hoch	99.91	0.99

Tab. 2: Einfluss der Luftdruckschwankungen auf die Siedetemperatur von Wasser für den Standort Liestal (325 m ü. M.).

Höhe in m	Siedetemperatur aus Tabelle in °C	Siedetemperatur berechnet nach Formel 7, in °C	Differenz Tabellen- wert - Wert nach Formel 7, in K
0	100.00	100.00	0.00
500	98.33	98.33	0.00
1000	96.68	96.67	0.01
1500	95.01	95.00	0.01
2000	93.34	93.33	0.01
2500	91.67	91.67	0.00
3000	90.01	90.00	0.01
3500	88.33	88.33	0.00
4000	86.65	86.67	-0.02
4500	84.98	85.00	-0.02
5000	83.29	83.33	-0.04
5500	81.61	81.67	-0.06
6000	79.92	80.00	-0.08
6500	78.24	78.33	-0.09
7000	76.55	76.67	-0.12
7500	74.84	75.00	-0.16
8000	73.15	73.33	-0.18
8500	71.44	71.67	-0.23
9000	69.73	70.00	-0.27

Tab. 3: Siedetemperatur von Wasser in Abhängigkeit der topographischen Höhe, Bezugswerte aus Normalatmosphäre ICAO, Manual of the ICAO Standard Atmosphere (Montreal 1964).

ren Konstanten in die Gleichung 5 eingesetzt werden können. In der chemisch-physikalischen Literatur sind die Antoine-Konstanten A, B und C für viele Stoffe vorhanden.

Schlussfolgerung

Die Genauigkeit der Formel 6 wird durch den auf gleicher Meereshöhe veränderlichen Barometerstand verfälscht. Für Höhenlagen von 0 bis 1000 m sind im Extremfall Druckabweichungen von bis zu ± 40 hPa zu erwarten. Für den Standort Liestal (325 m ü. M.) sind die möglichen Abweichungen in der Tab. 2 dargestellt.

Da der variable Luftdruck grössere Abweichungen des Siedepunktes ergibt als die Genauigkeit der Gleichung 5 angibt, können die kleinen Glieder aus der Gleichung eliminiert und die verwendeten Zahlenwerte gerundet werden. Die nach dieser Vereinfachung erhaltene Formel lautet nun:

$$T_s = 100 - \frac{h}{300} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (7).$$

Auch die mit dieser Formel berechneten Siedepunkte von Wasser sind genauer, als dies die Luftdruckschwankungen zulassen. Die Abweichungen sind bis 6500 m ü. M. kleiner als 0.1 K, durch den jeweiligen Barometerstand ergeben sich Abweichungen bis ± 1 K. Die berechneten

Werte können mit den Tabellenwerten verglichen werden, siehe Tab. 3, die Differenz ist jeweils gering. Für einen beliebigen Ort zwischen 0 und 9000 m ü.M. kann daher der Siedepunkt von Wasser mit der Formel 7 auch rasch im Kopf berechnet werden.

Nun zu den am Anfang gestellten Fragen nach den Siedepunkten an verschiedenen Orten lautet die Antwort nach Formel 7 wie folgt:

• Jungfrauoch	88.5°C,
• Mont Blanc	84.0°C,
• Kilimanjaro	80.4°C,
• Mount Everest	70.5°C.

Es darf aber nicht vergessen werden, dass diese Werte nur für den mittleren Luftdruck auf dieser Höhe gelten.

Literatur

- Manual of the ICAO Standard Atmosphere, 2. Auflage; International Civil Aviation Organization, Montreal, 1964.
- Schäfer, F. (unpubliziert): Pascalprogramm PARHYPDF.PAS / PARHYPDF.EXE, erstellt nach den Angaben von Volk, W. (1979): C.E. (Nov. 19, 1979) 149–153 und Brosens, J.R. (1980): C.E. (April 7, 1980) 97–98.
- Thomson, G.W. (1946): The Antoine Equation for Vapor Pressure Data. – Chemical Reviews 38, 1–39.

*Franz Schäfer
Rehhagstrasse 11
CH-4410 Liestal*

