

Kinetische Temperatur

geschrieben von Chris Frey | 18. August 2026

[Andy May](#)

In meinem letzten [Beitrag](#) „Definition von Temperatur“ [in deutscher Übersetzung [hier](#)] haben wir gesehen, dass Temperatur eine einfache Messgröße ist, die ohne Kontext kaum Aussagekraft hat. Bezieht man sich auf die Zustandsgröße eines Systems im Gleichgewicht oder die „thermodynamische Gleichgewichtstemperatur“, sollte man dies zur Klarstellung ausdrücklich angeben, da es viele Arten von Temperaturmessungen mit jeweils unterschiedliche Bedeutungen gibt. Die thermodynamische Gleichgewichtstemperatur wurde im vorherigen Beitrag definiert. Es gibt viele Definitionen von Temperatur; ich werde in diesem Beitrag und möglicherweise in nachfolgenden Beiträgen auf die gängigsten eingehen, die in der Physik und im Alltag verwendet werden. Die grundlegende Bedeutung der thermodynamischen Gleichgewichtstemperatur und der mit einem Thermometer gemessenen Temperatur unterscheiden sich stark voneinander und sollten nicht verwechselt werden.

Messung der kinetischen Temperatur

Während die thermodynamische Temperatur als Zustandsgröße eines Systems im Gleichgewicht proportional zur gesamten inneren Energie des Systems ist, ist die kinetische Temperatur die Temperatur, die proportional zur durchschnittlichen translatorischen kinetischen Energie im System ist. Sie kann mithilfe der thermischen Ausdehnung (Flüssigkeit in Glaskthermometern), des elektrischen Widerstands (Thermistoren usw.) oder der Infrarotstrahlung (Pyrometer) gemessen werden. Herkömmliche Thermometer reagieren auf die gesamte innere Energie und nicht nur auf die translatorische kinetische Energie. In Gasen korrelieren sie mit der kinetischen Temperatur, in Feststoffen und Flüssigkeiten reagieren sie jedoch auf Schwingungsenergie, die nicht rein kinetischer Natur ist. Herkömmliche Thermometer messen die translatorische kinetische Energie nicht direkt (außer in Gasen); sie messen eine Materialeigenschaft, die unter bestimmten Bedingungen mit ihr korreliert (Reif, 2009).

Kinetische Temperatur in Gasen

Die kinetische Temperatur lässt sich in Gasen, Flüssigkeiten und Feststoffen messen. In Flüssigkeiten und Feststoffen wird der Zusammenhang zwischen kinetischer Energie und Temperatur jedoch komplizierter, da die Molekülbewegung durch Bindungen und intermolekulare Kräfte eingeschränkt wird. In Gasen ist der direkte Zusammenhang zwischen kinetischer Energie und Temperatur eindeutiger, daher beginnen wir dort.

Die Gleichung für ideale Gase lautet [Gleichung 1]: $PV = N \cdot k_B \cdot T$

In dieser Gleichung steht P für den Druck, V für das Volumen, N für die Anzahl der Moleküle in dem betrachteten Volumen, k_B für die [Boltzmann-Konstante](#) und T für die Temperatur. Teilt man nun beide Seiten durch das Volumen (V), so erhält man...

...Die kinetische Theorie als Version des Gesetzes für ideale Gase: [Eq. 2] $P = n \cdot k_B \cdot T$

Nun ist „ n “ die Zahlendichte, also die Anzahl der Moleküle pro Volumeneinheit. Schreibt man das ideale Gasgesetz wie in Gl. 2 auf, so zeigt sich, dass der Druck nur von der Zahlendichte (n) und der kinetischen Temperatur abhängt. Diese Beziehung gilt für Gase im lokalen thermodynamischen Gleichgewicht. Bei Gasen im Nichtgleichgewicht muss die Temperatur stattdessen aus Verteilung der Teilchengeschwindigkeit abgeleitet werden, nicht aus dem Druck.

In Festkörpern dominieren Schwingungs-Zustände. In den meisten Festkörpern sind die Atome in einem sich wiederholenden Gitter angeordnet und verhalten sich so, als wären sie durch winzige Federn miteinander verbunden. Wenn sie gemeinsam schwingen, erzeugen sie Wellen, die sich durch das Material ausbreiten. Die Bewegung nimmt zu, wenn sich der Festkörper erwärmt. In der Quantenmechanik treten diese Schwingungswellen in diskreten Energiepaketen auf, die als Phononen bezeichnet werden. Ein Phonon ist eine quantisierte Einheit schallähnlicher mechanischer Energie in einem Festkörper.

Sowohl in Feststoffen als auch in Flüssigkeiten macht der kinetische Anteil der Wärmeenergie oft weniger als die Hälfte der gesamten Wärmeenergie aus. Der größte Teil der Energie ist in intermolekularen Potentialmulden gespeichert. Intermolekulare Potentialmulden sind Energietäler, die durch Anziehungskräfte zwischen Molekülen entstehen. Das Tal wird je nach der dem System zugeführten Energie tiefer oder flacher. Die Moleküle von Flüssigkeiten und Feststoffen sind in diesen Mulden gefangen. Der größte Teil der thermischen Energie ist als Schwingungsenergie gespeichert, nicht nur als kinetische Energie. Die Temperatur des Festkörpers oder der Flüssigkeit gibt Auskunft darüber, wie stark die Moleküle innerhalb des Potenzials schwingen. Aus diesem Grund funktioniert die einfache Vorstellung „Temperatur – durchschnittliche kinetische Energie“ zwar gut für Gase, versagt jedoch bei kondensierten Phasen.

Die Tiefe der intermolekularen Potentialmulde bestimmt den Siedepunkt und den Schmelzpunkt des Stoffes. Sie legt auch die Oberflächenspannung und die Viskosität des Materials fest. Dieses Konzept ist nicht rein theoretisch, sondern erklärt alltägliche physikalische Eigenschaften.

Wenn man also versuchen würde, die Temperatur in kondensierten Phasen ausschließlich anhand der kinetischen Energie zu definieren, würde man

manchmal einen falschen Wert erhalten. Die Temperatur ist nur bei idealen Gasen proportional zur mittleren kinetischen Energie. In noch komplexeren Situationen, wie beispielsweise bei Plasmen oder in der Astrophysik, wird die kinetische Temperatur aus der Doppler-Verbreiterung von Spektrallinien und Flugzeitmessungen abgeleitet.

Doppler-Verbreiterung

Atome, die sich auf einen zu bewegen, senden Licht aus, dessen Frequenz durch den **Doppler-Effekt** leicht nach oben verschoben ist. Atome, die sich von einem wegbewegen, senden Licht aus, dessen Frequenz leicht nach unten verschoben ist.

An dieser Stelle müssen wir die Maxwell-Boltzmann-Geschwindigkeitsverteilung („Maxwellsche Verteilung“) definieren. Sie gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit der ein Gasmolekül eine bestimmte Geschwindigkeit aufweist. Bei jeder Temperatur bewegen sich einige Moleküle langsam, andere extrem schnell, und die meisten gruppieren sich um eine charakteristische Geschwindigkeit. Die Form der Verteilung hängt ausschließlich von der Temperatur und der Molekülmasse ab. Ist also die Masse bekannt, lässt sich die Temperatur aus der Verteilung bestimmen – allerdings nur, wenn die Atome oder Moleküle diese charakteristische Maxwellsche Verteilung aufweisen. Maxwellsche Verteilungen sind in Abbildung 1 für $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ dargestellt.

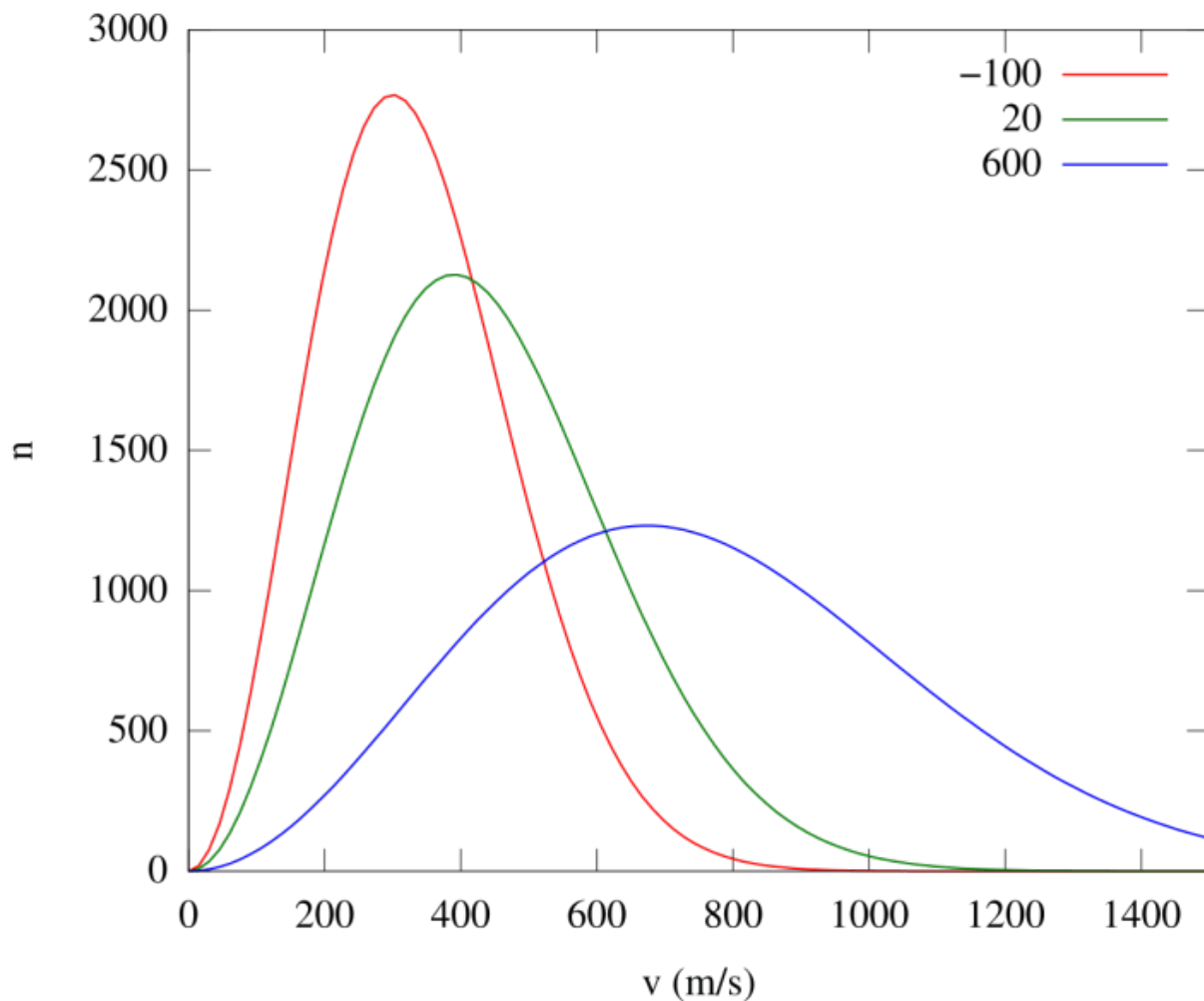


Abbildung 1. Maxwell'sche Verteilungen für eine Molmasse Sauerstoff bei -100 °C, 20 °C und 600 °C. Aus Wikimedia, von Superborsuk, CC BY-SA 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>

Wenn die Atome eine Maxwell'sche Verteilung aufweisen, befinden sie sich wahrscheinlich im lokalen thermodynamischen Gleichgewicht (LTE), was jedoch nicht garantiert ist. Befindet sich ein Gas im LTE, sorgen Kollisionen für eine Maxwell'sche Verteilung. Die Sichtlinienkomponente dieser Verteilung ist Gauß-förmig, auch wenn die gesamte dreidimensionale Verteilung dies nicht ist. Da Dopplerverschiebungen linear von der Geschwindigkeit abhängen, ist auch das resultierende Spektrallinienprofil Gauß-förmig. Dies ist der Ursprung der thermischen Doppler-Verbreiterung. Die Breite der Gauß'schen Verteilung ist proportional zur kinetischen Temperatur, und in anisotropen Systemen hängt die Breite vom Betrachtungswinkel ab, wodurch richtungsabhängige Temperaturen gemessen werden können.

Laufzeit

Die Laufzeit ist die kinetische Temperatur in ihrer reinsten Form. Lässt man die Teilchen frei fliegen, lässt sich beobachten, wie lange sie benötigen, um den Detektor zu erreichen. Die schnelleren kommen zuerst

an. Die Streuung der Ankunftszeiten gibt Aufschluss über die Geschwindigkeitsverteilung. Die Geschwindigkeitsverteilung wiederum liefert die Temperatur.

Bei Laufzeitmessungen wird die Zeit gemessen, die Moleküle benötigen, um einen Detektor zu erreichen, nachdem sie aus einem Plasma, einer kleinen Öffnung in einem Gasbehälter oder von einer Oberfläche desorbiert wurden. Moleküle oder Teilchen treffen zu unterschiedlichen Zeitpunkten ein und bilden eine Verteilung, die in ein Laufzeit-Geschwindigkeitsspektrum umgewandelt werden kann. Passt man diese Geschwindigkeitsverteilung an eine Maxwell'sche Verteilung an, lässt sich die kinetische Temperatur berechnen. Die Laufzeitmessung liefert die vollständige Geschwindigkeitsverteilung, nicht nur einen Mittelwert. In anisotropen Systemen können damit die verschiedenen Temperaturen in allen Richtungen gemessen werden. Sie eignet sich auch gut zur Bestimmung artspezifischer Temperaturen, beispielsweise der Elektronen-, Ionen- und Neutralteilchentemperaturen in Plasmen und Gasen.

Diskussion

Fast täglich sprechen wir über die Außen- und Innentemperatur sowie über unsere Körpertemperatur. Bei allen handelt es sich um kinetische Temperaturen, wie in diesem Beitrag erläutert, und bei allen können Probleme auftreten, insbesondere wenn man von einem stationären Zustand (LTE) ausgeht. Die Innentemperatur befindet sich meist nicht im stationären Zustand, da die meisten Häuser entweder beheizt oder klimatisiert sind. Die Außentemperatur ist es ganz sicher nicht, da sie lokal variiert, je nach Standort, je nachdem, auf welcher Seite der Wetterhütte sich die Sonne befindet und in welche Richtung der Wind weht. Unsere Körpertemperatur wird in der Regel gemessen, indem wir ein Thermometer in den Mund nehmen, wo Speichel und Körpergewebe unterschiedliche Temperaturen aufweisen. Die Beispiele lassen sich endlos fortsetzen.

Die kinetische Temperatur eines Systems ist praktisch, da es viele relativ einfache Möglichkeiten gibt, sie zu bestimmen und kein vollständiges Gleichgewicht des Systems erforderlich ist. Leider eignet sie sich als Temperaturmaß nicht immer (Bormashenko, 2020). Die im vorherigen Beitrag definierte thermodynamische Gleichgewichtstemperatur steht in keinem Zusammenhang mit der durchschnittlichen kinetischen Bewegung der Teilchen im System. Somit hat die sehr gebräuchliche kinetische Temperatur weder konzeptionell noch inhaltlich etwas mit der thermodynamischen Definition zu tun (Bormashenko, 2020).

Was ist Temperatur?

Bormashenko räumt in seinem Aufsatz „Was ist Temperatur?“ in Entropy ein:

„Die operationelle Definition von Temperatur lautet wie folgt:

Temperatur ist das, was wir mit einem Thermometer messen.“ (Schröder, 2000)

Dies ist eine akzeptable und durchaus logische Alltagsdefinition; sie beschreibt zweifellos, wie der Begriff „Temperatur“ normalerweise verwendet wird. Gängige Thermometer reagieren auf Volumeneigenschaften (Ausdehnung, Widerstand, Strahlung), die mit der inneren Energie korrelieren. Bei Gasen korreliert dies direkt mit der translatorischen kinetischen Energie, bei Feststoffen und Flüssigkeiten stammt das Signal jedoch in erster Linie aus der Schwingungsenergie. Ich empfehle, dass der Autor in technischen Texten präziser sein und von „kinetischer Temperatur“ sprechen sollte, wenn er oder sie dies meint.

Bormashenko zeigt weiter auf, dass die kinetische Temperatur eine sehr enge Definition von Temperatur ist und nicht immer zutrifft. Das ist richtig, und ich führe in diesem Beitrag einige Probleme damit auf. Das bedeutet jedoch nicht, dass die in meinem vorherigen Beitrag diskutierte Definition der „thermodynamischen Gleichgewichtstemperatur“ eine angemessene Definition von „Temperatur“ ist oder dass die beiden Begriffe in irgendeiner Weise synonym sind. Das sind sie nicht, und eine solche Gleichsetzung ist unaufrichtig, weil der Leser von der kinetischen Temperatur ausgehen wird, also der Thermometertemperatur.

In der Twitter- (oder X-)Diskussion, auf die ich in meinem vorherigen Beitrag Bezug genommen habe (siehe den Link am Ende dieses Beitrags), wollten viele Kommentatoren die gängige Definition von „Temperatur“ dahingehend ändern, dass sie die sehr ungewöhnliche thermodynamische Gleichgewichtstemperatur bezeichnet, aber das ist Unsinn. Diese Temperatur kann nur in einem Labor verwendet werden, in dem es möglich ist, die innere Energie und die Entropie eines Systems, das sich im Gleichgewicht befinden muss, genau zu bestimmen. Dies ist eindeutig nicht die Thermometertemperatur, und es ist eine umständliche Definition. Niemand würde wissen, wovon man spricht, denn die thermodynamische Temperatur bedeutet etwas völlig anderes als die alltägliche Definition.

Zukunft

Die in meinem vorherigen Beitrag erörterte Anforderung an die thermodynamische Gleichgewichtstemperatur wird bei der kinetischen Temperatur gelockert, da diese kein Gleichgewicht voraussetzt, obwohl wir bei der Verwendung von Thermometern häufig von thermodynamischem Gleichgewicht (LTE) ausgehen. Um die Gleichgewichtsanforderung vollständig aufzuheben, müssen wir berücksichtigen, dass die Verteilung der Teilchengeschwindigkeit möglicherweise nicht Maxwell folgt und das System möglicherweise nicht isotrop ist. Es ist auch möglich, dass verschiedene Systemkomponenten unterschiedliche Temperaturen aufweisen; so kann beispielsweise ein poröses Gestein eine andere Temperatur haben als die durch es hindurchströmende Flüssigkeit. In manchen Systemen ist der Druck möglicherweise nicht isotrop. Unter diesen Umständen kann man

die oben beschriebene kinetische Gleichung oft nicht anwenden, und die thermodynamische Gleichgewichtstemperatur kommt sicherlich nicht in Frage. Die Nicht-Gleichgewichtstemperatur wird im nächsten Beitrag behandelt.

Einige weitere Referenzen zum Thema Nicht-Gleichgewichtstemperatur werden [hier](#) angeführt und erörtert.

Den ursprünglichen X-Thread, mit dem alles begann, findet man hier.

Referenzen

Bormashenko, E. (2020). What Is Temperature? Modern Outlook on the Concept of Temperature. *Entropy*, 22(12).
<https://doi.org/10.3390/e22121366>

Reif, F. (2009). *Fundamentals of Statistical and Thermal Physics*. Waveland Press, Inc.

Schroeder, D. V. (2000). *Thermal Physics*. San Francisco: Addison Wesley Longman.

Link: <https://andymaypetrophysicist.com/2026/08/12/kinetic-temperature/>

Übersetzt von Christian Freuer für das EIKE