

Fahrenheit und die Thermometrie

Zum 300. Geburtstag von D. G. Fahrenheit

Ulrich Grigull, München

Fahrenheit, der wegen des frühen Todes seiner Eltern weder ein Gymnasium noch eine Universität besuchen konnte, fand als Autodidakt mit 20 oder 21 Jahren das einzig mögliche Verfahren, um gewerbsmäßig korrespondierende Thermometer herzustellen, deren absolute Anzeigen überall und jederzeit nachprüfbar waren. Damit wurde eine wissenschaftliche Thermometrie möglich, aus der sich die Kalorimetrie und später die Thermodynamik entwickeln konnten. Die Aufnahme Fahrenheit's in die Royal Society bewirkte, daß seine Thermometer und damit seine Skala besonders in England und später in Nordamerika und im British Empire bekannt wurden. Die charakteristischen Zahlenwerte seiner Skala, 32 für den Eispunkt und 212 für den Dampfunkt, beruhen auf reinem Zufall.

Thermometrie Ende des 17. Jahrhunderts

Wer um das Jahr 1700 Temperaturen messen wollte, hatte dazu entweder Gasthermometer zur Verfügung, die etwa 100 Jahre früher erfunden worden waren,

TOM. IV. XIV. LEÇON. pl. 3.

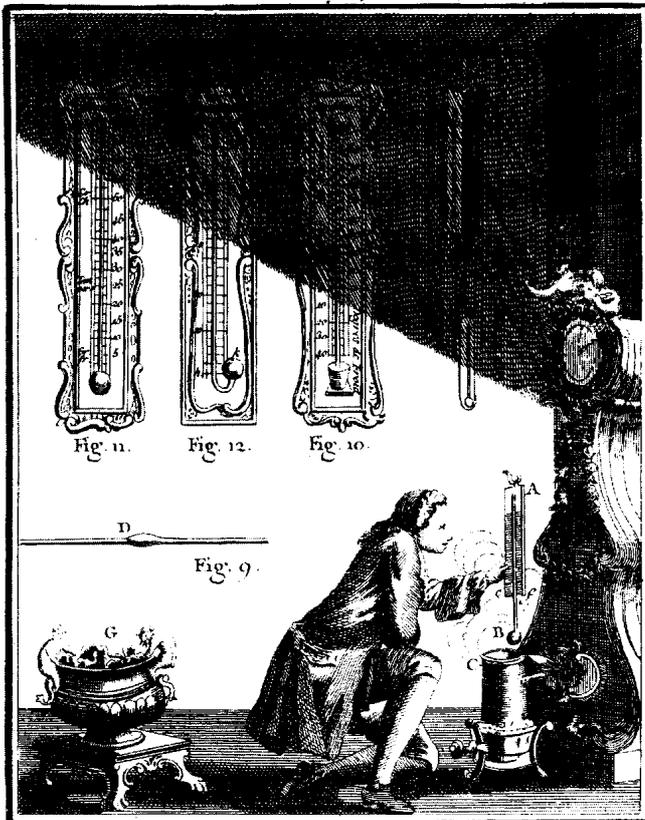


Abb. 1. Thermometrie zur Zeit Fahrenheit's. Fig. 10: Luftthermometer nach Drebbel. — Fig. 12: Luftthermometer nach Amontons. — Fig. 11: Florentiner Thermometer mit Weingeist. Unten: Kalibrierung am Dampfunkt und am Eispunkt. Nach [1]. [Photo Deutsches Museum München]

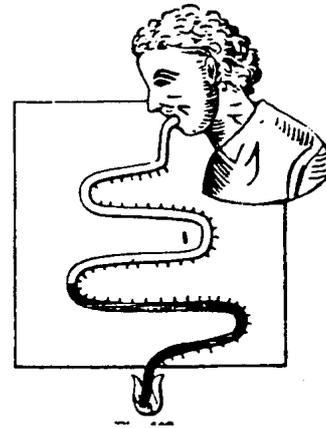


Abb. 2. Fiebermessen mit einem Luftthermometer nach Sanctorius [2].

oder Flüssigkeitsthermometer „nach Florentiner Art“, die auf die „Accademia del Cimento“ in Florenz zurückgingen. Die Erfindung der Gasthermometer schreiben die einen Galileo Galilei (1564—1642) zu, die anderen dem Holländer Cornelius Drebbel aus Alkmar (1572—1634). Auch Guillaume Amontons (1663—1705) verwendete ein Gasthermometer (mit stehender Flüssigkeitssäule), an dem er feststellte, daß bei konstantem Gasvolumen der Gasdruck der Temperatur direkt proportional sei. So ließ sich eine „natürliche“ Temperaturskala aufstellen, deren Nullpunkt mit dem Druck Null zusammenfallen würde. Die Abbildung 1 zeigt die Luftthermometer nach Drebbel und Amontons und ein Flüssigkeitsthermometer nach Florentiner Art. Der Arzt und Anatom Sanctorius aus Padua (1561—1634) verwendete zur Fiebermessung ein Luftthermometer, an dem eine Marke die normale Körpertemperatur kennzeichnete (Abb. 2).

Wegen ihrer schwierigen Handhabung konnten sich damals wie heute Gasthermometer in der Praxis nicht durchsetzen. Auch Amontons [3] schlug vor, seine Gasthermometer zur Kalibrierung von Flüssigkeitsthermometern zu verwenden. So war es nicht überraschend, daß die von der Accademia del Cimento her-

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Ulrich Grigull (geb. 12. März 1912) ist emeritierter ordentlicher Professor für Thermodynamik der Techn. Universität München. Er war von 1972 bis 1980 Rektor, später Präsident seiner Universität. Seit 1975 ist er ordentliches Mitglied der Bayerischen Akademie der Wissenschaften und erhielt 1984 den Bayerischen Maximiliansorden für Wissenschaft und Kunst.

Lehrstuhl A für Thermodynamik der Technischen Universität, Arcisstraße 21, 8000 München 2.

gestellten Weingeist-in-Glas-Thermometer weite Verbreitung fanden. Ihre Erfindung schreibt man Ferdinand II, dem Großherzog der Toskana (1610—1670) zu, der 1657 die Accademia del Cimento als einen Zusammenschluß ehemaliger Galilei-Schüler gründete [4]. Patron der Akademie wurde der Bruder des Großherzogs, Leopold de' Medici, der spätere Kardinal (1617—1675). Entsprechend ihrem Wahlspruch hatte sich die Akademie der experimentellen Physik und der Entwicklung von Meßgeräten verschrieben. Unter den Geräten, die die Akademie in den 10 Jahren ihres Bestehens verwendete, sind die „Florentiner Thermometer“ die wichtigsten, da sie die ältesten Flüssigkeitsthermometer darstellen, die serienmäßig hergestellt wurden. Sie waren unter diesem Namen, wenn auch in veränderter Form, bis ins 18. Jahrhundert im Handel.

Die Florentiner Thermometer (Abb. 3) bestanden aus einer oben zugeschmolzenen Kapillare, an die unten eine Glaskugel angeblasen war. Die Skalenpunkte

waren Emailperlen, die auf die Kapillare aufgeschmolzen waren: schwarz für die Einer, weiß für die Zehner und blau für die Hunderter. Es gab Thermometer mit 50, 100 und 300 Skalenteilen. Die Abbildung 3 zeigt noch ein Spiralthermometer mit hoher Empfindlichkeit (Durchmesser der unteren Kugel 6,8 cm), das die Fertigkeit der Florentiner Apparatebauer eindrucksvoll demonstriert. Die Thermometer waren mit Weingeist (Äthylalkohol) gefüllt. Dieser besitzt den größten thermischen Ausdehnungskoeffizienten unter den damals leicht zugänglichen Flüssigkeiten.

Zur Kalibrierung der Thermometer nahm man als äußerste Punkte die größte Sommerwärme und die starke Winterkälte in Florenz an. Diese Fixpunkte waren zwar nicht eindeutig definiert und lagen bei den einzelnen Typen der Thermometer an verschiedenen Skalenwerten, aber durch die Erfahrung der Glasbläser gelang es trotzdem, wenigstens innerhalb einer Serie eine leidliche Übereinstimmung zu erzielen.

Die Florentiner Thermometer verbreiteten sich rasch in alle Länder. Sie wurden, erst recht nach Auflösung der Akademie, auch von anderen Instrumentenmachern hergestellt, vorwiegend Italienern, und auch von fliegenden Händlern angeboten. Dabei machten sie manche Veränderungen durch. Die Skalenpunkte wurden nicht mehr auf die Kapillare aufgeschmolzen, sondern in eine Messingskala eingraviert. Auch begann man, die Skalenteile mit Zahlen zu versehen. Es setzte sich eine Skalierung durch, deren Nullpunkt bei mäßigen Temperaturen lag (etwa bei 8° C bis 12° C) und die von 90 Grad Wärme bis 90 Grad Kälte reichte, allerdings meist mit einer höchst unsicheren Zuordnung zu etwaigen Fixpunkten. Nach damaliger Auffassung waren Wärme und Kälte zwei gegeneinander wirkende Naturkräfte, die im Nullpunkt ausgeglichen, eben „temperiert“ waren. Die Temperatur eines tiefen Kellers, etwa der Pariser Sternwarte, wurde häufig als Nullpunkt verwendet. Es gab zwar auch Vorschläge für eindeutig definierte und überall reproduzierbare Fixpunkte, etwa von Newton [6] und Amontons [3], aber diese fanden keine Verbreitung. Die handelsüblichen Thermometer erfüllten in aller Regel nicht die Voraussetzungen für eine wissenschaftliche Thermometrie; man beklagte allgemein, daß es keine „korrespondierenden Thermometer“ (thermometra correspondentia oder concordantia) gab.

So findet man in Zedlers Universal-Lexikon [7] von 1748 unter „Florentinische Wettergläser“:

Weil die Grade der Wärme und Kälte ein willkürliches Maaß sind; so hat ein jedes Thermometer Grade von verschiedener Größe, und stimmt also keines mit dem anderen überein. Derowegen ist es auch unverständlich, wenn man saget: die Wärme oder Kälte habe so viel Grade zu- oder abgenommen. Es weiß niemand, was es zu sagen hat, außer derjenige, dem die Beschaffenheit des Thermometers bekannt ist: jedoch hat auch dieser nur einen undeutlichen Begriff von der ab- und zunehmenden Wärme und Kälte.

Noch deutlicher drückt sich Lambert [8] (1779) aus, wenn er den zunehmenden Verfall an Zuverlässigkeit beklagt:

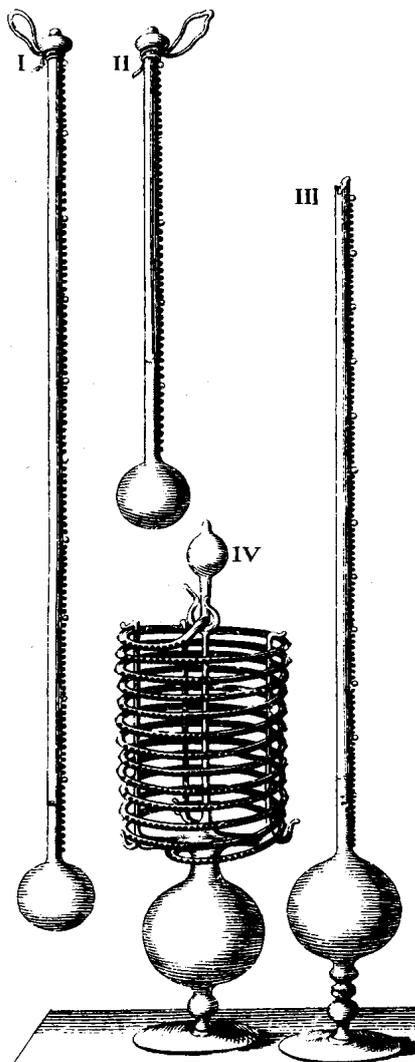


Abb. 3. Florentiner Thermometer [5]. I: 100 Grad. — II: 50 Grad. — III: 300 bis 400 Grad. — IV: Spiralthermometer.

[Photo Istituto e Museo di Storia della Scienza di Firenze]

Diese Leute giengen von der Sorgfalt, die die Florentinische Akademie bey der Eintheilung ihrer Thermometer beobachtet hatten, sehr ab. Und eben daher entstund die Klage überall, daß die Thermometer keine verständliche Sprache haben und ihre Eintheilungen gar nicht miteinander übereinstimmen. Man warf sogar die Schuld auf die Thermometer selbst, und brachte Versuche vor, die mit neben einander gehängten Thermometern aufgestellt worden, und woraus man beweisen wollte, daß ihre Veränderungen nicht nur nicht gleich, sondern auch nicht proportional seyen.

Die letzte Bemerkung deutet darauf hin, daß auch Kapillaren mit nicht einheitlichem Durchmesser, also mit Kaliberfehlern, verwendet wurden.

Es bleibt noch die Frage, welches Interesse an Temperaturmessungen zu jener Zeit bestand, in der man zwischen Wärmemenge und Temperatur noch nicht unterschied (und beides Wärme nannte) und die Größe „Wärmekapazität“ noch nicht eindeutig definiert war. Die Akademien und wissenschaftlichen Gesellschaften sowie zahlreiche Einzelpersonen begannen mit systematischen Wetterbeobachtungen. Es wurden Beobachtungsnetze eingerichtet, die einheitlich instrumentiert wurden. Diese frühen Daten sind heute kaum noch auswertbar, da man die Skalendefinitionen nicht kennt. Einer Zusammenstellung von Temperaturskalen durch Lambert [8] kann man beispielhaft entnehmen, daß noch weitere Temperaturmessungen zu jener Zeit durchgeführt wurden. So wurde die Temperaturverteilung im Erdboden in verschiedener Tiefe gemessen, die günstigste Temperatur im Gewächshaus für verschiedene Pflanzenarten, Brutwärme der Vögel für künstliches Brüten, Temperaturen von Blut und Ausscheidungen der Haustiere. Mehrere Disziplinen der Naturwissenschaft begannen, sich für die neue Dimension „Temperatur“ zu interessieren. Die mangelhaften Thermometer jener Zeit waren diesen Bestrebungen hinderlich. So ist es verständlich, daß ein Thermometermacher, der korrespondierende Thermometer anbot, rasch zu Ansehen gelangen konnte.

Bevor wir auf Fahrenheits Thermometer eingehen, wollen wir kurz seinen Lebenslauf schildern.

Fahrenheits Leben

Daniel Gabriel Fahrenheit wurde am 24. Mai 1686 in Danzig als Sohn eines wohlhabenden Kaufmanns geboren [9]. Da beide Eltern 1701 durch einen Unglücksfall ums Leben kamen, ließen sich Pläne für einen weiterführenden Schulbesuch und späteres Studium nicht verwirklichen. Die von der Stadt Danzig eingesetzten Vormünder entschieden, daß Fahrenheit Kaufmann werden sollte und schickten den Sechzehnjährigen in die kaufmännische Lehre nach Amsterdam. Er hat aber den Kaufmannsberuf nicht ausgeübt, sondern begann, seinen Neigungen folgend, um 1706 oder 1707 mit der Herstellung meteorologischer Instrumente, vor allem von Thermometern und Barometern. Im Jahrzehnt von 1707 bis 1717 war er fast ständig auf Reisen, nach Deutschland, Skandinavien und in die baltischen Länder. Berufliche Bedeutung für ihn haben beson-

ders ein Besuch bei dem Astronomen Olav Roemer 1708 in Kopenhagen und ein Treffen mit Christian Wolff 1714 in Halle.

Im Jahre 1717, mit fast 31 Jahren, läßt sich Fahrenheit in Amsterdam nieder. Er pflegt hier Beziehungen zu berühmten holländischen Gelehrten, die auch seine Thermometer verwendeten, so zu Herman Boerhave in Leiden, s'Gravesande in Den Haag und van Musschenbroek in Utrecht. Der Briefwechsel mit Boerhave [10] ist heute eine wichtige Quelle über Fahrenheits Tätigkeiten. Seit 1718 hält er private Vorlesungen über Optik, Hydrostatik und Chemie. 1724 reist er nach London, weil er zum „Fellow of the Royal Society“ berufen wurde. Er veröffentlicht bei der Gelegenheit fünf Arbeiten in den Philosophical Transactions [11], neben den Briefen die einzigen überlieferten Aufzeichnungen.

Auf einer Reise nach Den Haag, die Fahrenheit wegen einer Patentsache unternahm, erkrankte er schwer. Er starb dortselbst am 16. September 1736 im Alter von 50 Jahren. Er wurde in der Klosterkirche beigesetzt; es war ein Begräbnis vierter Klasse. Sein Nachlaß wurde wenig später in seiner Amsterdamer Werkstatt versteigert und dadurch in alle Winde zerstreut. Ein Portrait Fahrenheits ist nicht überliefert.

Sollte ein Leser im Besitz eines Bildes von Fahrenheit sein oder Kenntnis von der Existenz eines Portraits haben, wäre ich für Hinweise sehr dankbar. Meine weltweite Suche danach war leider bisher ohne Erfolg.

Fahrenheits Thermometer

Weingeistthermometer. Die letzten Lehrjahre in Amsterdam hat Fahrenheit offenbar dazu benutzt, sich im Selbststudium die physikalischen Grundlagen des Instrumentenbaus und die notwendigen Fertigkeiten anzueignen. Die ersten Thermometer, die er seit 1706 oder 1707 anfertigte, entsprachen äußerlich den Florentiner Weingeist-Thermometern. Er hat später die Kugel durch einen kurzen Zylinder ersetzt, um die Oberfläche zu vergrößern und dadurch die Ansprechzeit zu verkürzen. Auch die Skala von 90 Grad Wärme bis 90 Grad Kälte übernahm er, allerdings mit einem grundlegenden Unterschied: Fahrenheits Skalen waren von Anfang an durch reproduzierbare Fixpunkte definiert. So stimmten seine Thermometer von Anfang an überein, wodurch er seinen Konkurrenten überlegen war.

Nach dem Besuch bei Olav Roemer 1708 in Kopenhagen führte er eine neue Skala ein, deren Nullpunkt bei 90 Grad Kälte der Florentiner Skala lag. Bei der von Roemer verwendeten Skala lag der Eispunkt bei $7\frac{1}{2}$ Grad. Diese unbequeme Zahl änderte Fahrenheit in 8 und führte außerdem viermal kleinere Grade ein. So entstand aus $4 \times 8 = 32$ sein Zahlenwert für die Eispunkttemperatur, der bis heute beibehalten wurde.

Es sei allerdings bemerkt, daß die Bezifferung von Skalenstrichen zwar für den Benutzer wichtig ist, aber

keine wissenschaftliche Bedeutung hat. „Diese Temperaturzahl hat lediglich die Eigenschaft einer Inventarnummer, . . .“ wie es Ernst Mach [12] ausdrückte. Wissenschaftliche Bedeutung hat allein die Definition der Skala durch reproduzierbare Fixpunkte.

Auf einer Reise nach Berlin, Thüringen und Sachsen traf Fahrenheit 1714 mit Christian Wolff, Professor der Mathematik in Halle, zusammen, dem er zwei seiner Weingeist-Thermometer mit der neuen Skala zur Prüfung auf Korrespondenz übergab. Diese beiden Thermometer hatten Skalen gleicher Länge, aber verschieden große Thermometergefäße. Nach Wolffs Messungen zeigten sie im ganzen von ihm untersuchten Bereich praktisch gleiche Temperaturen an und reagierten auch gleich schnell auf Temperaturveränderungen. Von dieser Koinzidenz war Wolff offenbar so beeindruckt, daß er noch im selben Jahr im Augustheft 1714 der „Acta Eruditorum“, der ältesten naturwissenschaftlichen Zeitschrift in deutscher Sprache, seine Ergebnisse mitteilte [13] und dabei auch auf die desolante Situation der Thermometrie jener Zeit einging. Wir lesen darin [9]:

Solche Instrumente, deren Übereinstimmung bis jetzt nur ein frommer Wunsch gewesen ist, hat mit außerordentlichem Fleiße ein Danziger, namens Daniel Gabriel Fahrenheit, hergestellt; derselbe hält sich seit einiger Zeit bei uns auf und zeichnet sich in der Verfertigung von Thermometern und Barometern besonders aus. Die Kunstgriffe, durch welche er die Übereinstimmung erhält, macht er aus gewissen Gründen privater Art nicht bekannt; den Effect haben aber viele Leute beobachtet, die seine Thermometer und Barometer verglichen haben.

Den Kunstgriff, das „artificium“, hat Fahrenheit erst 10 Jahre später in seiner zweiten Arbeit in den Philosophical Transactions [11] bekannt gemacht. Auch der Experte Wolff hat den eigentlichen Grund für die Übereinstimmung der beiden Thermometer nicht bemerkt, wie Lambert [8] später berichtet:

Wolff errieth auch das Kunststück nicht, weil er es in den Salzen suchte, womit der Gang des sich stärker ausdehnenden Weingeistes, seiner Meynung nach, mußte geschwächt werden.

Aus Fahrenheits Briefen und Publikationen sowie aus Wolffs Bericht können wir die zweite Skala seiner Weingeistthermometer von 1714 rekonstruieren und zusammen mit der ersten von 1707 darstellen (Tab. I). Fahrenheit benutzte 3 Fixpunkte. Der Nullpunkt lag bei der eutektischen Temperatur des Systems Eis-Natriumchlorid ($-21,2^{\circ}\text{C}$). Nach seiner Skala war die Körpertemperatur dreimal so groß wie die Eispunkttemperatur.

Für ein Thermometer ohne Korrekturen (etwa für Kaliberfehler, für den herausragenden Faden usw.) gilt die elementare Thermometergleichung

$$\frac{V_t - V_0}{V_0} = \frac{q L_t}{V_0} \quad (1)$$

Es bedeuten V_t und V_0 die Volumina der Thermometerflüssigkeit bei den Temperaturen t und Null, q den Querschnitt der Kapillare und L_t die Skalenlänge zwischen den Marken t und Null. Die linke Seite von Gl. (1) ist eine Stoffgröße und wird vom Thermome-

t_F $^{\circ}\text{F}$ (1707)	t_F $^{\circ}\text{F}$ (1714)	t $^{\circ}\text{C}$	Wolff (1714)	Fahrenheit (1724)
90	96	37	aestus intolerabilis	Extream Hott
60	80		calor ingens	
30	64		aer calidus	
0	48		aer temperatus	Temperate
-30	32	0	aer frigidus	
-60	16		frigus ingens	
-90	0	≈ -20	frigus vehementissimum	Extream Cold

Tab. I. Bezifferung und Benennung der Skalen der Weingeistthermometer Fahrenheits von 1707 und 1714. Temperaturen der Fixpunkte sind kursiv gesetzt.

termacher gemessen. So ist zum Beispiel für 80,5%igen Weingeist $(V_{37} - V_0)/V_0 = 1/28,1 \approx 37/1040$, wenn die Indizes Celsiusstemperaturen bedeuten. Der Querschnitt q wird durch die Wahl der Kapillare festgelegt. Fahrenheit bezog seine Kapillaren (nach eigenen Worten) von Glashütten. Die Skalenlänge L_t liegt bei Serienfabrikation fest, da die Messingskalen vorher graviert sind. Der Thermometermacher muß dann das Volumen V_0 (also den Inhalt des Gefäßes und des Teils der Kapillare bis zur Marke Null) den gegebenen Werten anpassen, um Gl. (1) zu erfüllen und damit übereinstimmende Thermometer herzustellen.

Da Fahrenheits Weingeistkala mit drei Fixpunkten überbestimmt ist, können wir die Celsiusstemperatur seines Nullpunkts ermitteln, die insoweit unsicher ist, als Fahrenheit die Systeme Eis-Meersalz ($-21,2^{\circ}\text{C}$) oder Eis-Salmiak ($-15,8^{\circ}\text{C}$) erwähnt [11]. Die hierzu notwendige Volumen-Temperatur-Funktion für Weingeist haben wir bis -30°C bei 4 verschiedenen Massegehalten gemessen, da sie in der Literatur nicht zu finden war [14]. Fahrenheit setzte, wie auch seine Zeitgenossen, die Temperatur proportional dem Volumen

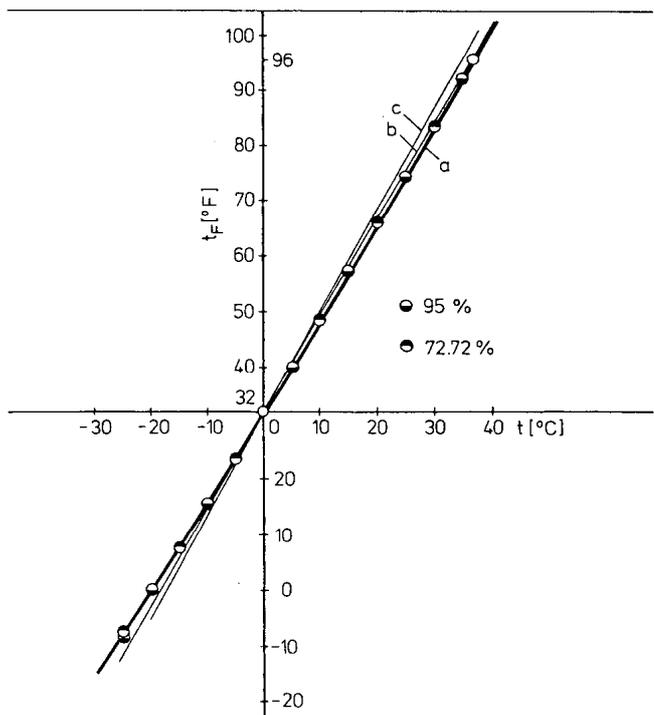


Abb. 4. Fahrenheittemperatur der Weingeistthermometer als Funktion der Celsiusstemperatur. Kurve a: für Weingeist von 95% und 72,72% Alkohol. Gerade b: linearer Verlauf. Gerade c: für Siedetemperatur $t'_F = 212^{\circ}\text{F}$.

der Thermometersubstanz. In der Abbildung 4 ist die so ermittelte Fahrenheittemperatur über der Celsius-temperatur aufgetragen und zwar derart, daß beide Temperaturen bei den Fixpunkten

$$32^{\circ} \text{ F} \triangleq 0^{\circ} \text{ C} \text{ und } 96^{\circ} \text{ F} \triangleq 37^{\circ} \text{ C}$$

übereinstimmen. Der leicht gekrümmte Kurvenzug trifft den Punkt $0^{\circ} \text{ F} \triangleq -20^{\circ} \text{ C}$. Daraus schließen wir, daß das System Eis-Salmiak (mit $-15,8^{\circ} \text{ C}$) jedenfalls nicht gemeint sein konnte und daß die eutektische Temperatur des Systems Eis-Meersalz (mit $-21,2^{\circ} \text{ C}$, da zwischen Meersalz und Kochsalz kein meßbarer Unterschied besteht) auf rund 1 K erreicht wurde. Fahrenheit sagt dazu: „Dieser Versuch gelingt im Winter besser als im Sommer.“ Die Abbildung 4 zeigt außerdem, daß in gewissen Bereichen der Alkoholgehalt des Weingeistes keine entscheidende Rolle spielt: Die Punkte für 95% und für 75,72% liegen praktisch auf derselben Kurve.

Nach übereinstimmender Meinung aller Biographen, vor allem nach Lambert [8] und Momber [9], hat Fahrenheit auch für seine erste Skala „nach Florentiner Art“ von 1707 die gleichen Fixpunkte wie 1714 verwendet, wie es auch die Tabelle I zeigt. Lambert schreibt dazu: „... wiewohl er übrigens die zum Grunde gelegten Grade bey diesen Veränderungen beybehält.“ Das bedeutet, daß er schon mit 20 oder 21 Jahren das Verfahren gefunden hat, nach dem man übereinstimmende Thermometer herstellen kann. Zwar waren sowohl seine Fixpunkte als auch die Kalibrierung an Fixpunkten schon früher bekannt, aber Fahrenheit scheint als erster Thermometer dieser Art gewerbsmäßig hergestellt und so zu ihrer Verbreitung beigetragen zu haben. Das führt zu einigen interessanten Feststellungen, seine Person betreffend.

Die Vorstudien, die Herstellung und Kalibrierung der Thermometer und die Darstellung der Fixpunkte müssen Fahrenheit so in Anspruch genommen haben, daß er seine kaufmännische Ausbildung darüber vernachlässigte. Auch dürfte er eine Werkstatt betrieben haben, zu deren Einrichtung er Geld brauchte und ein Darlehen zu Lasten seines späteren Erbteils aufnahm. Als die Klagen seines Lehrherrn bei den Vormündern nicht aufhörten und sie auch noch für die Bezahlung seiner Schulden sein Erbteil angreifen mußten, war ihre Geduld offensichtlich am Ende: Sie beantragten und erhielten vom Rat der Stadt Danzig am 21. Januar 1707 eine Vollmacht [15] für einen Vertrauensmann in Amsterdam, Fahrenheit durch die Polizei festnehmen und ihn durch die Ostindische Kompanie nach Holländisch-Indien deportieren zu lassen. Zum Glück für die Thermometrie hatte diese Maßnahme keine ernstesten Folgen, weil Fahrenheit auf Reisen war.

Das Verhalten Fahrenheits wird durch sein Selbstverständnis erklärbar. Seine Vorstudien hatten ihm das Elend der Thermometrie, aber auch den steigenden Bedarf an Thermometern gezeigt. Durch seine Entdeckung — oder Wiederentdeckung — sah er sich im Besitz eines zuverlässigen Verfahrens, korrespondie-

rende Wettergläser herzustellen, dessen Bedeutung ihm völlig klar war. Er erkannte auch sofort den Vorsprung gegenüber der Konkurrenz und hielt daher das „artificium“ zehn Jahre lang geheim. Die praktische Verwertung seiner Erkenntnisse duldeten keinen Aufschub, der Vorsprung mußte wahrgenommen werden. So handelte er aus dem Verständnis seiner Lage folgerichtig, wenn er sofort ans Werk ging und den massiven Konflikt mit den Vormündern und dem Rat seiner Heimatstadt Danzig in Kauf nahm. Dieser Konflikt erledigte sich übrigens von selbst, als Fahrenheit mit Vollendung des 24. Lebensjahrs (am 24. Mai 1710) volljährig wurde. Im Herbst 1710, nach Beendigung der großen Pest, besuchte er seine Geschwister in Danzig. Seine Einstellung wird auch durch seine Reisen deutlich, die sowohl der Akquisition als auch der Information dienten. Um sich Anregungen zu holen, besucht er berühmte Zeitgenossen, so Olav Roemer in Kopenhagen und Christian Wolff in Halle. Die Reaktion Wolffs (der Aufsatz in den „Acta Eruditorum“) zeigt, daß Wolff Fahrenheits Entdeckung, obwohl er sie nicht eigentlich durchschaute, für genauso bedeutend hielt wie Fahrenheit selbst.

Quecksilberthermometer. Fahrenheit hatte den Berichten [3] von Amontons entnommen, daß die Höhe der Quecksilbersäule im Barometer bei gleichem Luftdruck im Sommer um etwa 3 Pariser Linien höher stand als im Winter (1 ligne = $\frac{1}{12}$ pouce = 2,256 mm). Das veranlaßte ihn, Quecksilber als Thermometerflüssigkeit zu verwenden, zumal dadurch höhere Temperaturen erreichbar wurden, was er zum Studium von Siedephänomenen anstrebte. In Berlin, um 1713/14, hatte er Vorversuche unternommen und begann in Amsterdam ab 1717 mit der gewerbsmäßigen Herstellung von Quecksilberthermometern.

Aus der ersten Serie schickte er je ein Quecksilberthermometer zusammen mit einem Weingeistthermo-

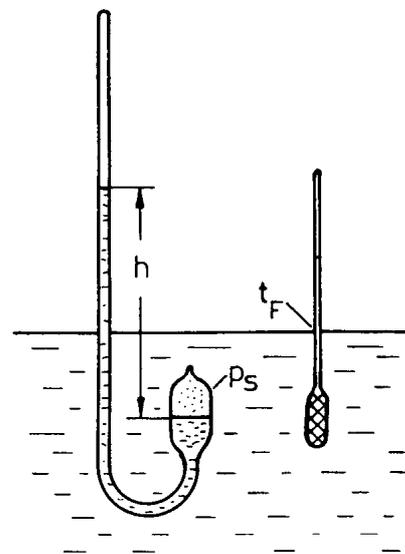


Abb. 5. Glasapparatur zur Dampfdruckmessung, 1723. Linkes Glasrohr 1,3 m lang. h : Höhe der Quecksilbersäule. — p_s : Sättigungsdruck des Wassers. — t_F : Fahrenheittemperatur.

t_F	h	p_s	t_s	$p_s^{1/4}$
° F (206)	lignes	mbar	° C	mbar ^{1/4}
128	49½	148,5	55,2	3,49
144	80¼	240,7	64,4	3,94
152	97½	292,9	68,9	4,14
160	119	356,9	73,6	4,35
168	145¼	434,9	78,2	4,57
176	176	527,9	82,8	4,79
184	210½	631,4	87,4	5,01
192	249⅓	747,9	91,9	5,23
200	292⅓	876,5	96,6	5,44
207	333⅓	999,8	100,6	5,62

1 ligne = 1/2 pouce = 2,256 mm

Tab. II. Fahrenheits Dampf tafel von 1723.

meter an die drei Freunde Boerhave, s'Gravesande und Lambert ten Kate, um den gleichen Gang der beiden Instrumente zu demonstrieren. Diese Demonstration mißlang vollständig. Die drei Empfänger stellten Abweichungen bis zu 6° F fest. Dieses Ergebnis war für Fahrenheit überraschend. Er hat sich große Mühe gegeben, die Ursachen aufzuklären. An Boerhave [10] schreibt er: „Was mir das für Ärger verursacht hat, können sich Euer Wohlgeboren leicht denken.“ Er findet vermutlich nicht die wahre Ursache, aber er entdeckt bei der Suche zwei grundlegende Phänomene, den Einfluß der Glasausdehnung auf die Anzeige von Quecksilberthermometern und die Druckabhängigkeit der Siedetemperatur von Flüssigkeiten.

Die von Fahrenheit 1723 hergestellte Glasapparatur zur Untersuchung der Dampfdruckkurve von Wasser (Abb. 5) besteht aus einem Quecksilberbarometer, in dessen rechtem Zylinder sich eine kleine Wassermenge befindet, die vor dem Zuschmelzen längere Zeit zum Sieden gebracht wurde, um die Luft auszutreiben. Die zehn Meßwerte Fahrenheits sind in der Tabelle II wie-

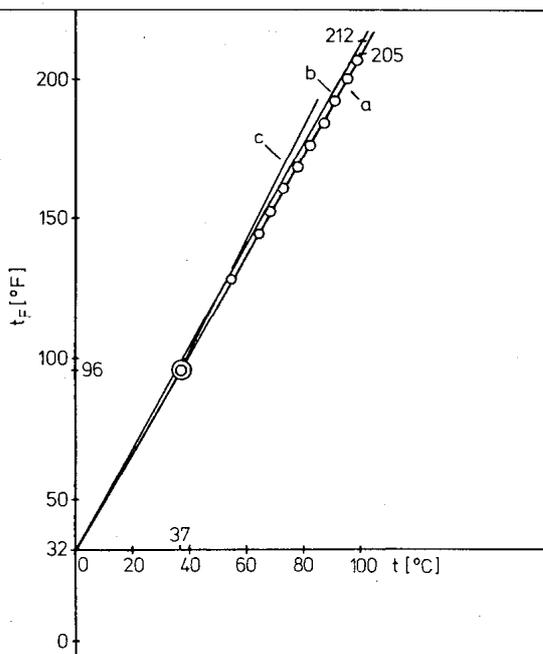


Abb. 6. t_F - t -Diagramm mit den Dampfdruckmessungen Fahrenheits (Kreise). Gerade a: für $t_F = 205^\circ F$. — Gerade b: für $t_F = 212^\circ F$. — Kurve c: extrapolierte Weingeistkala.

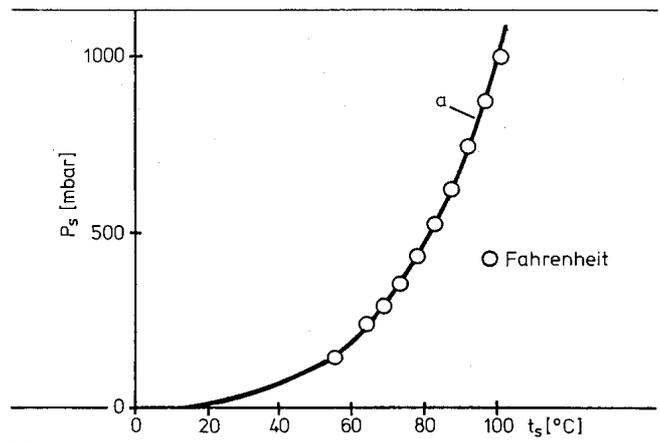


Abb. 7. Fahrenheits Dampfdruckwerte (Kreise) und heutige Dampfdruckkurve a im p_s , t_s -Diagramm.

dergegeben, die Höhe h ist in Pariser Linien gemessen. Es besteht die Möglichkeit, daß Fahrenheit 1723 zwei verschiedene Skalen für seine Quecksilberthermometer verwendet hat, die eine mit der Siedetemperatur des Wassers $t_F \approx 205^\circ F$, die andere mit $t_F \approx 212^\circ F$, dem heutigen Wert. Um die Frage zu prüfen, wurden in der Abbildung 6 Fahrenheits Meßwerte in ein t_F , t -Diagramm eingetragen, wobei als Ordinate die gemessenen Fahrenheittemperaturen und als Abszisse die zu den gemessenen Dampfdrücken nach heutiger Kenntnis gehörenden Celsius temperaturen verwendet wurden. Wie man sieht, liegen die Meßpunkte näher an der Geraden a; die beste Wiedergabe war mit $t_F \approx 206^\circ F$ zu erzielen. Die entsprechende Einheit ist in der Tabelle II mit ° F (206) bezeichnet. Die Tabelle zeigt noch die so berechneten Dampfdrücke und -temperaturen, wobei die Säulenhöhe h eine Dichtekorrektur erhielt. Die Übereinstimmung zwischen den von Fahrenheit gemessenen und den heutigen Werten ist bemerkenswert gut (Abb. 7). Auch läßt sich nach Fah-

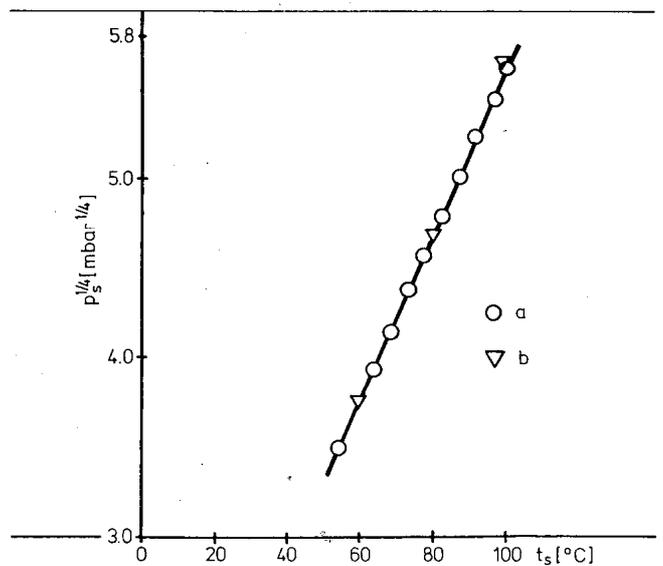


Abb. 8. $p_s^{1/4}$ als Funktion der Sättigungstemperatur t_s . a: Fahrenheits Werte. — b: heutige Werte.

renheits Vorschlag der Wert $p_s^{1/4}$ im Meßbereich als brauchbare Näherung bei linearer Abhängigkeit von t_s verwenden (Abb. 8). Die Tabelle II könnte die älteste Dampf tafel sein [16].

Bei Quecksilberthermometern darf die Ausdehnung des Glases nicht mehr vernachlässigt werden. So ist beispielsweise für Quecksilber $(V_{37}/V_0)_{Hg} - 1 = 1/148,4$, für das häufig verwendete Jenaer Thermometerglas 16^{III} gilt $(V_{37}/V_0)_{Gl} - 1 = 1/1141,6$, woraus sich die relative Ausdehnung zu $(V_{37}/V_0)_{rel} - 1 = 1/170,7 = 37/6316$ errechnet. Gl. (1) bleibt gültig, wenn man auf der linken Seite diese relative Ausdehnung von Quecksilber in Glas einsetzt.

Bei der Kalibrierung der Quecksilberthermometer ging Fahrenheit von seiner Weingeistkala aus, also den Fixpunkten „Eispunkt“ ($32^\circ F \triangleq 0^\circ C$) und „Körpertemperatur“ ($96^\circ F \triangleq 37^\circ C$). Der „Nullpunkt“ ($0^\circ F \triangleq -20^\circ C$) wurde zu dieser Zeit nicht mehr als Fixpunkt verwendet. Die Extrapolation auf den Wassersiedepunkt ergibt $t'_F \approx 205^\circ F$, da die Quecksilberskala praktisch linear verläuft. Wie Fahrenheit am 12. Dezember 1718 in einem Brief an Boerhave [10] mitteilt, hat er damals $t'_F \approx 212,5^\circ F$ gemessen. Das war kurz nach seiner Übersiedlung nach Amsterdam, wo er seine Kapillaren aus Amersfoort bezog. Bei den früher genannten Vorversuchen in Berlin hatte er Glas aus Potsdam verwendet. Um den Unterschied zwischen den beiden Siedetemperaturen aufzuklären, sind in der Tabelle III die aus Fahrenheits Briefen [10] ablesbaren Ergebnisse für die relative Ausdehnung von Quecksilber in Glas $(V_{37} - V_0)/V_0$ und die gemessenen Wassersiedepunkte t'_F in chronologischer Reihenfolge zusammengestellt. Fahrenheit gibt in seinen Briefen die Werte $(V(96^\circ F) - V(0^\circ F))/V(0^\circ F)$ an. Da er aber seinen Skalennullpunkt um jene Zeit nicht mehr als Fixpunkt verwendete, hat er mit großer Wahrscheinlichkeit den Wert $(V(96^\circ F) - V(32^\circ F))/V(32^\circ F) = (V_{37} - V_0)/V_0$ gemessen, den auch wir in der Tabelle III aufgeführt haben (die Indizes sind wieder Celsius temperaturen).

Die Durchmusterung von Tabelle III zeigt, daß er den am 12. Dezember 1718 in Amsterdam mitgeteilten Wert $t'_F = 212,5^\circ F$ bereits am 23. Januar 1719 durch die Schreibweise (212)205,5 widerruft, ebenso den Wert für die relative Ausdehnung. Da er den Wert $t'_F = 212,5^\circ F$ mit einem durch die Weingeistkala kalibrierten Quecksilberthermometer gar nicht gemessen haben kann, bleibt folgende Erklärung: Fahrenheit hat in Amsterdam für eine Glassorte A die relative Ausdehnung $1/180,5$ gemessen, um daraus Thermometer herzustellen. Da weder er noch sonst jemand den Einfluß der Glassorte kannte, hatte er keine Bedenken, diese Thermometer auch aus der Glassorte B (die vielleicht noch von früher in seinem Besitz war) nach den Maßen für Glas A herzustellen. Damit hat er dann den Wert

$$t'_F = 32^\circ F + \frac{180,5}{174,3} (205,5 - 32)^\circ F = 211,7^\circ F \approx 212^\circ F$$

gemessen. Da diese Thermometer für die Körpertemperatur den Wert $\approx 98,6^\circ F$ statt der erwarteten $96^\circ F$

anzeigten, hat er die Unstimmigkeit bald bemerkt, die Ausdehnung von Glas B richtig mit $1/174,3$ und die Wassersiedetemperatur mit $t'_F = 205,5^\circ F$ gemessen und am 23. Januar 1719 die alten Werte berichtigt. Trotzdem hat er (Tabelle III) den Wert $t'_F \approx 212^\circ F$ spätestens ab 1724 beibehalten [17]. Vermutlich hatte er von den ersten Serien der Quecksilberthermometer bereits eine größere Zahl abgesetzt, nicht nur an die drei Freunde, sondern auch an seine übrige Kundschaft, die er nun nicht verunsichern wollte. Das Problem löste sich von selbst, da Fahrenheit in diesen Jahren die Körpertemperatur als Fixpunkt aufgab und seine Thermometer am Eispunkt und am Dampf punkt kalibrierte. Nur für Thermometer für meteorologische und medizinische Zwecke dürfte er noch eine Zeitlang die Körpertemperatur als Fixpunkt beibehalten haben. Wir können feststellen, daß auch der Zahlenwert 212 der Fahrenheitskala ebenso wie der Zahlenwert 32 durch Zufall zustande gekommen ist.

Fahrenheit hat wohl neben der Glassorte auch den wechselnden Barometerstand für die Differenz zwischen den beiden Zahlenwerten 205 und 212 der Wassersiedetemperatur verantwortlich gemacht.

Für Wasser gilt bei $100^\circ C$

$$\left(\frac{dp}{dT}\right)_{100} = 26,69 \frac{\text{mmHg}}{K} = 35,58 \frac{\text{mbar}}{K}$$

Für einen mittleren Barometerstand für Amsterdam und einen angemessenen Bereich ergibt sich

$$b = (761,1 \pm 25) \text{ mmHg} = (1014,7 \pm 33) \text{ mbar}$$

und daraus für die Siedetemperatur von Wasser

$$t_s = (100,04 \pm 0,9)^\circ C$$

Dem würden die beiden Fahrenheittemperaturen

$$t'_F = (205 \pm 1,6)^\circ F \text{ oder } t'_F = (212 \pm 1,6)^\circ F$$

entsprechen. So kann man die Differenz der Siedetemperaturen nach Fahrenheit nicht durch den schwankenden Barometerstand erklären, wie er es in dem Brief vom 17. April 1729 (Tab. III) andeutet. Fahrenheits Skala wurde 1777 durch die Royal Society derart normiert [10], daß die Siedetemperatur von Wasser

Datum	Herkunft des Glases	$(V_{37} - V_0)/V_0$	t'_F ($^\circ F$)
5. III. 1715	Potsdam?	1/174	
12. XII. 1718	Glas A	1/180,5	212,5
23. I. 1719	Glas B	1/174,3	212—213 (212) 205,5
Phil. Trans. 30 (1724) 1—3			212
20. III. 1729	Amsterdam	1/179,1	
	Böhmen	1/166,4	211
	England	1/175,3	
30. III. 1729	Böhmen oder Potsdam	1/170	
	Thüringen	1/170,1	
	England	1/175,1	
	Amersfoort	1/179,1	
	Amsterdam	1/181,9	
17. IV. 1729			205—212
	Jena 16 ^{III}	1/170,7	

Tab. III. Relative Ausdehnung von Quecksilber in Glas. Wassersiedepunkt t'_F .

beim Druck von 29,8 inches = 756,9 mmHg genau 212° F betragen sollte. Als später der Druck von 760 mmHg = 1013,25 mbar zum Standardwert des Druckes wurde, paßte man die Fahrenheitskala an, indem man 212° F als die normale Siedetemperatur des Wassers definierte.

Schlußbetrachtung

1. Fahrenheit's Verdienst um die Thermometrie besteht darin, von Anfang an korrespondierende Thermometer hergestellt und damit einer langdauernden Konfusion in der Temperaturmessung ein Ende bereitet zu haben.
2. Sein Arbeitsprinzip, das „artificium“, bestand darin, seine Skalen durch reproduzierbare Fixpunkte zu definieren. Obwohl andere dieses Prinzip vor ihm verwendet hatten (wie Newton oder Amontons), war es wenig verbreitet. Wahrscheinlich war Fahrenheit der erste professionelle Thermometermacher, der es konsequent anwendete.
3. Seine Thermometer, die denen seiner Konkurrenten überlegen waren, verbreiteten sich rasch und mit ihnen seine Skala als deren Nebenprodukt. Die beiden charakteristischen Zahlenwerte seiner Skala, 32 für den Eispunkt und 212 für den Dampfunkt, sind durch reinen Zufall zustande gekommen. Die Ernennung zum Fellow of the Royal Society 1724 bewirkte, daß seine Thermometer und damit seine Skala besonders in England und später in Nordamerika und im British Empire bekannt wurden.
4. Seine genauen Thermometer erlaubten ihm die Messung thermodynamischer Zustandsgrößen von Flüssigkeiten und festen Stoffen, so die Dichte, die Siedetemperatur, die thermische Ausdehnung (auch von Quecksilber relativ zu Gläsern). Wichtige Entdeckungen sind die Unterkühlung gefrierenden Wassers und die Druckabhängigkeit der Siedetemperatur. Einige seiner Ergebnisse fanden Aufnahme in das Lehrbuch „Elementa Chemiae“ seines Freundes Herman Boerhave (1668—1738), Professor der Medizin, Botanik und Chemie in Leiden.

5. Die Thermodynamik konnte sich als eigenständige Wissenschaft erst entwickeln, nachdem man Temperaturen eindeutig und genau messen konnte. Hierzu hat Fahrenheit maßgebend beigetragen, so daß wir ihn mit Recht als einen Wegbereiter der wissenschaftlichen Thermometrie bezeichnen können.

LITERATUR

- [1] J. A. Nolle: *Leçons de Physique Expérimentale*. Amsterdam ab 1745. Deutsche Ausgabe Erfurt 1751. — [2] E. Gerland, F. Traumüller: *Geschichte der physikalischen Experimentierkunst*. 442 Seiten. Leipzig 1899. Nachdruck Hildesheim 1965. — [3] G. Amontons: *Discours sur quelques propriétés de l'air, et sur le moyen d'en connoître la température dans tous les climats de la terre*. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, Année 1702. S. 155—180. Paris 1704. — [4] C. Cantù, L. R. Bonelli: *The Accademia del Cimento (1657—1667)*. 16 Seiten. Nardini Ed., Centro Intern. del Libro, ohne Jahreszahl (Cimento heißt Wagnis, Probe, auch Läutern, Prüfen des Goldgehalts). — [5] *Saggi di Naturali Esperienze fatte nell' Accademia del Cimento*. Firenze 1667. Reprint Pisa: Domus Galilaeana 1957. — [6] I. Newton: *Scala Graduum Caloris*. *Phil. Trans.* 22, 824—829 (1701). Vgl. U. Grigull: *Newton's Temperature Scale and the Law of Cooling*. *Wärme-Stoffübertragung* 18, 195—199 (1984). — [7] J. H. Zedler: *Großes vollständiges Lexikon aller Wiss. u. Künste*. Leipzig u. Halle ab 1732. Nachdruck Graz ab 1961. Hier Bd. 55, 1748, Nachdruck 1962. — [8] J. H. Lambert: *Pyrometrie oder vom Maaße des Feuers und der Wärme*. Berlin 1779. — [9] A. Mombert: *Daniel Gabriel Fahrenheit. Sein Leben und Wirken*. *Schriften Naturforsch. Ges. Danzig N. F.* 7, 108—139 (1890). — [10] P. van der Staar: *Fahrenheit's Letters to Leibniz and Boerhave*. 195 Seiten. Leiden u. Amsterdam 1983. — [11] In deutscher Übersetzung in: *Abhg. über Thermometrie von Fahrenheit, Réaumur, Celsius*. Hrsg. A. J. von Oettingen. Leipzig 1894. — [12] Ernst Mach: *Die Prinzipien der Wärmelehre*. 2. Aufl. J. A. Barth. Leipzig 1900, S. 56. — [13] (Christian Wolff): *Relatio de novo barometrorum et thermometrorum concordantium genere*. (Bericht über eine neue Art übereinstimmender Barometer und Thermometer). *Acta Eruditorum Leipzig*, August 1714, 380—381 (deutsche Übersetzung in [9]). — [14] Verfasser dankt Herrn Udo Glückert für die sorgfältige Durchführung dieser Messungen. Spätere Veröffentlichung bleibt vorbehalten. — [15] Ernst Cohen, W. A. T. Cohen-de Meester: *Daniel Gabriel Fahrenheit*. *Verh. Kon. Akademie Wetenschappen Amsterdam*, 1. Sect. 16, No. 2, 1—37 (1936). Zweite Mitt. ebenda 40, No. 8, 682—689 (1937) (hier und in [10] ist der Antrag der Vormünder wiedergegeben). — [16] U. Grigull: *Fahrenheit's Dampf-tafel von 1723*. *Brennstoff — Wärme — Kraft* 38 (1986) in Vorbereitung. — [17] Für die Dampfdruckmessungen von 1723 verwendete Fahrenheit jedenfalls ein Quecksilberthermometer mit $t_F \approx 206^\circ \text{F}$.