

BAYERISCHE AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN
MATHEMATISCH-NATURWISSENSCHAFTLICHE KLASSE

SITZUNGSBERICHTE

JAHRGANG

1987

MÜNCHEN 1988

VERLAG DER BAYERISCHEN AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN
In Kommission bei der C. H. Beck'schen Verlagsbuchhandlung München

Daniel Gabriel Fahrenheit Leben und Werk

Von Ulrich Grigull

Sitzung vom 14. November 1986

Im Jahre 1986 jährt sich Fahrenheits Geburtstag zum dreihundertsten Male, Grund genug, sich erneut mit Leben und Werk dieses Mannes zu beschäftigen, dessen Temperaturskala trotz Metrisierung auch heute noch in englischsprachenden Ländern im Gebrauch ist.

Dabei sollen uns zwei Fragen beschäftigen: Worin liegt Fahrenheits Leistung, die zu einer derartigen Verbreitung seiner Skala führen konnte? Woher stammen die auffälligen Gradzahlen seiner Skala (32 für den Eispunkt und 212 für den Dampfunkt), die weder zu einem metrischen noch zu einem foot-pound-second-System passen?

Bevor wir uns mit seinen Thermometern beschäftigen, soll kurz Fahrenheits Leben geschildert werden.

1. Fahrenheits Leben

1.1 *Herkunft und Jugend*

Daniel Gabriel Fahrenheit wurde am 24. Mai 1686 in Danzig als Sohn des Kaufmanns Daniel Fahrenheit und seiner Ehefrau Concordia geboren, die aus der in Danzig sehr bekannten Familie Schumann stammte. Daniel Fahrenheit, der das Danziger Bürgerrecht 1684 erworben hatte, betrieb mit seinem Sozium Ulrich Isenhut ein gutgehendes Handelsgeschäft, das durch eine Niederlassung auch in Amsterdam vertreten war. Die Eltern Fahrenheit besaßen mehrere Grundstücke in Danzigs Innenstadt, darunter das Geburtshaus Daniel Gabriels, Hundegasse 94, ferner ein Gartenhaus in Schidlitz bei Danzig, am „Alten Weinberg“ gelegen.¹

¹ Albert Momber: Daniel Gabriel Fahrenheit. Sein Leben und Wirken. Schriften Naturforsch. Ges. Danzig N. F. 7 (1890) 108–139.

Der Großvater Reinhold Fahrenheit war 1650 vom Kneiphof in Königsberg² nach Danzig zugewandert. Wie neuere Untersuchungen³ zeigen, geht der Stammbaum der Familie auf Hildesheim zurück. Ein Vorfahr unseres Daniel Gabriel, Hans Fahrenheit, ist von Hildesheim über Rostock nach Königsberg gezogen und hat 1512 das Bürgerrecht auf dem Kneiphof erworben.

Daniel Gabriel war das älteste von fünf Geschwistern, er hatte zwei Brüder und zwei Schwestern.⁴ Bis zu seinem zwölften Lebensjahr wurde er durch Hauslehrer unterrichtet und kam 1698 auf die Danziger Marienschule. Er sollte 1701 das dortige Gymnasium besuchen, „da man an ihm besondere Lust zum Studiren bemerkete“.⁵ Dieser Plan ließ sich nicht erfüllen, da am 14. August 1701 beide Eltern im Schidlitzer Gartenhaus starben. Die einen sagen, sie hätten aus Unvorsichtigkeit Gift statt Arznei genommen,¹ andere erwähnen eine Pilzvergiftung.⁶ Für die fünf unmündigen Kinder (der Älteste war 15 Jahre) setzte der Rat der Stadt drei Danziger Bürger als Vormünder ein, die entschieden, Daniel Gabriel sollte als Ältester den väterlichen Beruf fortsetzen und zu diesem Zweck eine kaufmännische Lehre durchmachen. Er wurde zunächst im eigenen Hause in Buchhaltung unterrichtet und 1702 als Sechszehnjähriger nach Amsterdam zum Kaufmann Herman von Beuningen in die Lehre geschickt.

Die vier Lehrjahre von 1702 bis 1706 hat er wohl durchgestanden, wenn auch nicht immer zur Zufriedenheit der Vormünder und des Patrons. Vermutlich hat Fahrenheit schon sehr früh mit naturwissenschaftlichen Studien begonnen und darüber seine kaufmännische Ausbildung vernachlässigt, vielleicht auch schon Reisen zur eigenen

² Königsberg, die Hauptstadt Ostpreußens, entstand durch den Zusammenschluß der drei Städte Altstadt, Löbenicht und Kneiphof.

³ Friedrich Albert Meyer: Daniel Gabriel Fahrenheits Ahnenreihe geht auf Hildesheim zurück. *Alt-Hildesheim* 24 (1953) 8–13.

⁴ Fünf Kinder sind im Alter von 1 bis 2 Jahren vor dem Tode der Eltern gestorben (vgl. 1).

⁵ Ernst Strehle: Kurzer Lebensabriß von Daniel Gabriel Fahrenheit. *Altpreuß. Monatsschriften N.F.* 11 (1874) 87–88. Handschriftlicher Zusatz zu einem Sammelband über berühmte Danziger, 1740 von einem unbekannten Autor geschrieben (älteste biographische Quelle über Fahrenheit).

⁶ Friedrich Albert Meyer: Daniel Gabriel Fahrenheit. Sein letztes Werk, Testament und Nachlaß. *Technikgeschichte* 33 (1966) 2, 160–181.

Fortbildung unternommen. In jenen Amsterdamer Jahren muß sich bei ihm der Entschluß gebildet haben, nicht Kaufmann zu werden, sondern physikalische und meteorologische Instrumente, vor allem Thermometer und Barometer, herzustellen, an denen damals ein großer Bedarf bestand. Diesem neuen Beruf hat er sich während der letzten Lehrjahre mindestens teilweise, danach offenbar vollständig, gewidmet. Als er hierfür Geld geliehen hatte und die Vormünder sein Erbteil⁷ angreifen mußten, um seine Schulden zu bezahlen, beantragten^{8,9} und erhielten sie am 21. Januar 1707 vom Rat der Stadt Danzig eine Vollmacht für einen Amsterdamer Kaufmann, Fahrenheit durch die Polizei festnehmen und durch die Ostindische Compagnie nach Holländisch-Ostindien deportieren zu lassen. Zum Glück für die Thermometrie kam es nicht zu Festnahme und Abschiebung, weil Daniel Gabriel nicht greifbar war: er befand sich auf Reisen.

1.2 *Wanderjahre*

Im Jahrzehnt von 1707 bis 1717 war Fahrenheit fast ständig unterwegs. Der unbekannte Biograph von 1740 schreibt darüber:⁵

Zu dem Ende tat er viele beschwerliche Reisen zu Wasser und zu Lande, conferirte mit den berühmtesten Mathematicis in Dennemarck und Schweden, verschückte seine Instrumenten nach Ysland, Lapland und andere Öhrter, von wannen ihm die von curieusen Leuten gemachte Observationes nach Amsterdam überschücket wurden, wie den notorisch, daß er bereits Ao. 1709 in den harten Winter sehr merkwürdige Remarques vermittels seiner Wetter-Gläser gemachet hat, wovon bey Gelegenheit der in diesen 1740ten Jahre eingefallenen starcken Kälte in verschiedenen Nachrichten Erwähnung geschiehet.

⁷ Der Sozjus Ulrich Isenhut mußte beim Ableben von Daniel Fahrenheit an die Erben 21.000 Gulden sowie eine beträchtliche Summe für Immobilien auszahlen (vgl. 8).

⁸ Ernst Cohen u. W. A. T. Cohen-de Meester: Daniel Gabriel Fahrenheit. Verh. Kon. Akademie Wetenschappen Amsterdam, 1. Sect. 16 (1936) No. 2, 1–37. Zweite Mitteilung ebenda 40 (1937) No. 8, 682–689 (hier ist der Antrag wiedergegeben). Vgl. auch Chemisch Weekblad 33 (1936) No. 24, 374–393 und 34 (1937) No. 45, 727–730.

⁹ Pieter van der Star: Fahrenheit's Letters to Leibniz and Boerhave. 195 Seiten. Leiden u. Amsterdam 1983.

Die erste dieser Reisen, die durch Deutschland, Schweden und Dänemark führte, brachte ihn 1708 mit dem dänischen Astronom Olav Roemer¹⁰ in Kopenhagen zusammen, der sich damals mit meteorologischen Messungen befaßte und hierzu eigene Thermometer mit einer eigenen Skala verwendete. Die Begegnung mit Roemer wurde später von Fahrenheit ausführlich beschrieben,⁹ worauf im zweiten Teil dieser Arbeit eingegangen wird. Hier sei nur angemerkt, daß Fahrenheit 1708 bereits eigene Thermometer besessen hat, da ihn nach eigenen Angaben die Gespräche mit Roemer zur Verbesserung seiner Thermometer angeregt haben. Ob Fahrenheit im Januar 1709, also im „harten Winter“ dieses Jahres, in Danzig gewesen ist, kann nicht einwandfrei nachgewiesen werden. Nach Momber¹ wird von dem „in Danzig wegen seiner Richtigkeit berühmten Fahrenheitischen Wetterglase“ berichtet, „welches schon im Jahre 1709 gebraucht worden“, allerdings nicht unbedingt von Fahrenheit selbst. In jenem Winter machte auch Roemer Reihenmessungen der Temperatur, die in seinen „Adversaria“¹¹ wiedergegeben sind, die sich aber eindeutig auf Kopenhagen beziehen. Daß gar Fahrenheit und Roemer 1709 in Danzig gemeinsam Lufttemperaturen gemessen haben sollen, worauf Momber¹ vorsichtig hindeutet, ist mehr als unwahrscheinlich.

Mit Vollendung des 24. Lebensjahres, also am 24. Mai 1710, wird Fahrenheit volljährig, womit die Grundlage für den früher beantragten Haftbefehl weggefallen ist. Da keine Urkunde über eine Mündigkeitserklärung vorliegt, ist er um diese Zeit nicht in Danzig gewesen, dagegen hat er noch im selben Jahre, nach Beendigung der großen Pest, seine Geschwister in Danzig besucht und blieb dort bis zum folgenden Jahre. Am 20. Januar 1711 wurde sein jüngerer Bruder Ephraim vor der Zeit für mündig erklärt. Beide Brüder quittieren vor dem Schöffengericht, daß sie von den Vormündern ihr Erteil

¹⁰ Olav (Ole) Roemer (1644–1710) hatte in Paris aus den von ihm und G. D. Cassini beobachteten Ungleichheiten der Wiederkehr der Jupitermonde auf eine endliche Lichtgeschwindigkeit geschlossen und dafür den Wert 231.500 km/s berechnet (vgl. Rolf Krähling: Die astronomische Methode nach Olaf Römer anno 1676 zur Bestimmung der endlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes. Diss. TU München, 1978). Roemer wurde 1707 Staatsrat und Erster Bürgermeister von Kopenhagen.

¹¹ Ole Roemers Adversaria. Hrg. von Thyra Eibe u. Kirstine Meyer. 271 Seiten. Kopenhagen 1910.

richtig erhalten haben.¹ Danach geht Fahrenheit wieder auf Reisen nach Kurland und Livland,¹² wie wir aus Vollmachten wissen, die in Königsberg und Mitau ausgestellt wurden.^{1,13} In den Jahren 1712/13 ist er wieder in Danzig, wo er mit dem ihm befreundeten Gymnasialprofessor Paul Pater zusammenarbeitet.¹⁴ 1713/14 ist er in Berlin, wo er der Akademie der Wissenschaften ein langes und vier kurze Thermometer liefert,¹⁵ und setzt seine Reise nach Dresden, Halle und Leipzig fort. Dabei besucht er auch die dortigen Glashütten, um sich über die Herstellung der Kapillaren für seine Thermometer zu informieren und seine Fähigkeiten im Glasblasen zu vervollkommen.

Bei dieser Gelegenheit trifft er 1714 in Halle Christian Wolff,¹⁶ damals (noch) Professor für Mathematik dortselbst, dem er zwei Weingeistthermometer übergibt, die gleiche Skalen, aber verschiedenen große Thermometergefäße haben und trotzdem im ganzen Bereich (praktisch) gleiche Anzeigen liefern. Wolff erkennt sofort die grundsätzliche Bedeutung dieser Entwicklung und berichtet in den „Acta Eruditorum“¹⁷ ausführlich über sein Prüfungsergebnis. Für

¹² Die baltischen Länder Kurland und Livland gehörten seit dem frühen 13. Jahrhundert zum Deutsch-Ordensstaat. Nach dessen Auflösung wurde Kurland 1561 Herzogtum unter polnischer Lehnshoheit, Livland wurde 1561 polnisch, 1629 schwedisch, 1721 russisch.

¹³ In der Mitauer Urkunde wird D. G. Fahrenheit als „Kaufgeselle in der Kgl. Stadt Danzig“ bezeichnet. Wir können daraus schließen, daß er seine Amsterdamer Lehrzeit ordentlich mit einer Gesellenprüfung abgeschlossen hat.

¹⁴ Paul Pater (1656–1724), gebürtiger Ungar, als Protestant vertrieben und nach Breslau geflohen, später Studium in Leipzig und Jena als Stipendiat der Stadt Breslau, Magisterwürde in Jena, Bibliothekar in Wolfenbüttel, 1688 Gymnasialprofessor für Mathematik in Thorn, seit 1709 (wegen Belagerung der Stadt Thorn durch die Schweden) in Danzig.

¹⁵ Horst Kant: Gabriel Daniel Fahrenheit, René-Antoine Ferchault de Réaumur, Anders Celsius. 133 Seiten. Leipzig: Teubner 1984.

¹⁶ Christian Freiherr (seit 1745) von Wolff (auch Wolf) (1679–1754), Philosoph der Spätaufklärung, Mathematiker und Universalgelehrter. 1707 Professor in Halle, 1723 durch pietistische Einflüsse auf Friedrich Wilhelm I. als Religionsfeind und Determinist des Amtes enthoben, 1740 durch Friedrich den Großen zurückberufen auf einen Lehrstuhl für Natur- und Völkerrecht, später zum Kanzler der Universität Halle ernannt.

¹⁷ (Christian Wolff): *Relatio de novo barometrorum et thermometrorum concordantium genere*. *Acta Eruditorum*, Leipzig, August 1714, 380–381. – *Acta Eruditorum* war die älteste naturwissenschaftliche Zeitschrift in Deutschland, seit 1682 von O. Mencke geleitet; sie hat bis 1782 bestanden.

Fahrenheit, der sich seines Erfolges offenbar bewußt ist, bedeutet diese lobende Beurteilung eine willkommene Empfehlung.

Fahrenheit beschäftigte sich aber trotz seiner intensiven Reisetätigkeit nicht nur mit Thermometern und Barometern. So schrieb er am 5. März 1715 aus Leipzig⁹ an Leibniz¹⁸ und bat ihn um ein Urteil über eine von ihm vorgeschlagene Quecksilber-Uhr, die er in Verbindung mit einer Preisaufgabe einer Kommission des Britischen Parlaments entworfen hat. Leibniz schlägt in seiner Antwort vor, den Entwurf besser auszuarbeiten, um den Erwartungen der Kommission zu entsprechen. Vorher hatte sich Leibniz bei Wolff über Fahrenheit erkundigt. In seiner Antwort berichtet Wolff über ein Perpetuum mobile,¹⁹ über das Fahrenheit von ihm ein Urteil erbeten hat. Dazu schreibt er weiter: „Er hat sich sehr löblich bisher für die Anfertigung von Thermometern und Barometern viel Mühe gegeben; er ist aber noch zu wenig mit den mathematischen Wissenschaften bewandert und läßt beim Erfinden mehr den Zufall als die Überlegung walten.“¹⁸ Dieses Urteil bezieht sich jedenfalls nicht auf die korrespondierenden Thermometer Fahrenheits, die von Wolff 1714 sehr gelobt wurden.

In einem weiteren Schreiben Fahrenheits an Leibniz (vom 1. Juni 1716 aus Dresden⁹) berichtet er über ein Spiegelteleskop, dessen Anfertigung durch Geldmangel verzögert wird und bittet um Empfehlungen bei der Beschaffung einer festen Anstellung, ein Zeichen, daß seine wirtschaftliche Lage nicht allzu rosig ist. Leibniz' Tod 1716 verhindert eine Beantwortung und etwaige Hilfeleistung. 1717 trifft Fahrenheit, im Alter von fast 31 Jahren, in Amsterdam ein, um sich dort endgültig niederzulassen. Die Wanderjahre sind beendet.

¹⁸ Gottfried Wilhelm Leibniz (1646–1716), Philosoph der Aufklärung, Mathematiker und Universalgelehrter. 1673 Mitglied der Royal Society, 1700 unter seiner Mitwirkung Gründung der Societät der Wissenschaften in Berlin (später Preußische Akademie der Wissenschaften), erster Präsident. Entwicklung der Infinitesimalrechnung, Konstruktion der ersten Rechenmaschine.

¹⁹ In dieser Antwort findet sich ein Satz, der für jeden Erfinder eines Perpetuum mobile paßt: „Es bleibt nur noch übrig, das Gleichgewicht, durch das die Maschine zur Ruhe gebracht wurde, aufzuheben (sed id unicum adhuc restare, ut equilibrium, quo machina ad quietem redigitur tollatur).“

1.3 *Fahrenheit in Amsterdam*

In Amsterdam richtet sich Fahrenheit Wohnung und Werkstatt im Hause des Kupferschmiedes Roemer an der Ecke Leidsche Straat und Keizersgracht ein. Er beginnt hier mit der Herstellung von Quecksilberthermometern, über die er bereits in Berlin Anfang des Jahres 1713 Vorversuche angestellt hatte. Besondere Bedeutung für die Amsterdamer Zeit haben zwei Bereiche: seine Beziehungen zu maßgebenden holländischen Wissenschaftlern und seine naturwissenschaftlichen Vorlesungen.

Seinen Beziehungen zu dem Mediziner und Chemiker Herman Boerhave²⁰ verdanken wir 15 Briefe⁹ Fahrenheits, die uns Aufschluß über seine Lebensumstände, seine Technik bei der Thermometerherstellung und die Ergebnisse wissenschaftlicher Versuche mit Hilfe seiner genauen Thermometer geben. Weitere persönliche und schriftliche Beziehungen pflegte er mit s'Gravesande²¹ und mit van Musschenbroek,²² die, wie auch Boerhave, Fahrenheits Thermometer benutzten und ihn wegen seiner Fertigkeit bei ihrer Herstellung lobten. Seit 1718 hielt Fahrenheit Vorlesungen über naturwissenschaftliche Probleme, von denen uns Mitschriften und Ankündigungen erhalten sind. Themen waren Optik, Hydrostatik und Chemie. Daneben machte er eigene Experimente, die nur teilweise mit der Fabrikation von Thermometern und Barometern in Verbindung standen: so über den Siedepunkt von Flüssigkeiten, die Ausdehnung von Quecksilber in Glasröhren verschiedener Herkunft (Potsdamer, Böhmisches, Thüringer, Englisches, Amersfoorter und Amsterdamer Glas), die Unterkühlung von Wasser beim Gefrieren, die Dichte von Flüssigkeiten und die Entwicklung eines Aräometers, die Abhängigkeit des Siedepunkts von Wasser vom Barometerstand, die Erzeugung von Kälte durch Kältemischungen.

²⁰ Herman Boerhave (1668–1738), Professor der Botanik, Medizin und Chemie in Leiden. Buch: „Elementa Chemiae“. Vervollkommnete klinische Diagnostik.

²¹ Wilhelmus Jakobus s'Gravesande (1688–1742), Professor der Mathematik, Astronomie und Physik in Leiden. Schrieb 1720–1721 das erste Lehrbuch über Experimentalphysik.

²² Petrus van Musschenbroek (1692–1761), Schüler von Boerhave, 1719 Professor für Mathematik und Physik in Duisburg, 1725 in Utrecht und 1740 in Leiden. Experimentierte mit der „Leidener Flasche“.

1724 fuhr er nach London, weil ihn die Royal Society zum Mitglied ernannt hatte. Er hielt dort ein Referat über die Dichte eines Metalls, das man „Bleigold“ nannte, und das häufig gemeinsam mit Gold auftrat und vermutlich Platin²³ war. Außerdem publizierte er in diesem Jahr fünf Abhandlungen in den „Philosophical Transactions“,²⁴ die, zusammen mit den Briefen an Boerhave, die wichtigste Quelle über seine Tätigkeiten sind; sie sind mehrfach in deutscher Übersetzung erschienen.^{1, 25}

Das enge Verhältnis zu Boerhave wird auch dadurch deutlich, daß Fahrenheit ihn über seine Heiratspläne informiert. Am 20. März 1729 teilt er mit,

„..... daß ich, weil ich des Wohnens bei allerhand verschiedenen Leuten müde war, damit beschäftigt bin, mir eine treue Freundin zu suchen.“

Aber schon am 17. April desselben Jahres schreibt er:

„Ich hatte bei dem Fräulein (die bereits einen hübschen Groschen besitzt) viel Zutritt, aber ihre Freunde, die von ihr erben mußten, fürchtend, daß dieses Vorteilchen ihnen entgehen würde, haben es so zu drehen gewußt, daß die Sache schief gegangen ist.“²⁸ Von einem weiteren Versuch wird nicht berichtet, er blieb Junggeselle.

Das letzte Vorhaben Fahrenheits war eine Wasserhebemaschine, die zur Entwässerung überschwemmter Flächen dienen sollte. Er hatte davon ein Modell angefertigt und ein Patent bei den „Staten van Holland en West-Friesland“ angemeldet, das auch tatsächlich erteilt wurde. Zu Verhandlungen darüber fuhr er im September 1736

²³ Friedrich Albert Meyer: Fahrenheits Anteil an der Entdeckung des Platins. Z. Erzbergbau u. Metallhüttenwesen 4 (1951) 221–222.

²⁴ Die aus dem Lateinischen übersetzten Titel lauten:

- a. Untersuchungen über den Siedepunkt einiger Flüssigkeiten. Phil. Trans. London 33 (1724) 1–3.
- b. Versuche und Beobachtungen über das Frieren von Wasser im luftleeren Raume. Phil. Trans. London 33 (1724) 78–84.
- c. Die spezifischen Gewichte einiger Körper zu verschiedenen Zeiten für verschiedene Zwecke erforscht. Phil. Trans. London 33 (1724) 114–118.
- d. Beschreibung und Anwendung eines neuen Aräometers. Phil. Trans. London 33 (1724) 140–141.
- e. Beschreibung eines neuen Barometers. Phil. Trans. London 33 (1724) 179–180.

²⁵ Abhandlungen über Thermometrie von Fahrenheit, Réaumur, Celsius. Hrg. A. J. v. Oettingen. 140 Seiten. Leipzig: Engelmann 1894.

nach den Haag, wo er plötzlich erkrankte. Er ließ am 7. September einen Notar in seinen Gasthof „Frisleven“ kommen, dem er sein Testament diktierte. Hierin vermachte er s'Gravesande die Hälfte künftiger Einnahmen aus dem Patent.^{6,8}

Fahrenheit starb am 16. September 1736 in den Haag im Alter von fünfzig Jahren und wurde vier Tage später in der Klosterkirche beigesetzt. Es war ein Begräbnis vierter Klasse. Die Grabstätte ist wegen späterer Umbauten heute nicht mehr auffindbar. Der Nachlaß wurde am 5. Dezember 1736 in seinem letzten Amsterdamer Wohnhaus – Prinsengracht bei der Nieuwe Spiegelstraat – versteigert und dadurch in alle Winde zerstreut. Ein Porträt Fahrenheit's ist nicht überliefert und hat sich auch bis heute nicht finden lassen.

2. Fahrenheit's Werk

2.1 *Temperatur und Temperaturskalen*

Die Temperatur wird als neue Basisgröße in die Thermodynamik eingeführt. Die so eingeführte Größe heißt „Thermodynamische Temperatur“ und ist durch die Gesetze der Thermodynamik definiert, also z. B. durch die Zustandsgleichung des idealen Gases, die Neigung der Dampfdruckkurve nach Clausius und Clapeyron, die Strahlung des schwarzen Körpers nach Stefan und Boltzmann, das Verhältnis von Wärmemengen beim Carnot-Prozeß, die Rauschleistung eines elektrischen Widerstandes nach Nyquist. Nur bei Benutzung der thermodynamischen Temperatur gelten die Gesetze der Thermodynamik genau.

Alle übrigen, auf andere Weise definierten Temperaturen sind empirische Temperaturen. Sie sind üblicherweise durch ein Meßgerät definiert, dessen Anzeige als Maß für die Temperatur angesehen wird, also etwa durch ein Quecksilber-in-Glas-Thermometer oder durch ein Widerstandsthermometer. Die empirischen Temperaturen werden als Annäherungen an die thermodynamische Temperatur betrachtet. Alle von Fahrenheit und anderen eingeführten Temperaturen, die wir im folgenden betrachten werden, sind empirische Temperaturen; wir beschränken uns auf Ausdehnungsthermometer.

Zur Festlegung der Temperatureinheit, die von alters her mit

„Grad“ (von gradus, Stufe) bezeichnet wird, dient die Temperaturskala. Man kann einer Temperatur mehrere Temperaturskalen zuordnen. Zur Aufstellung und Anwendung einer Temperaturskala sind folgende Schritte zu beachten:

1. Definition der Skala durch Fixpunkte.
2. Weitergabe, das heißt Übertragung der Skala von einem Thermometer auf ein anderes.
3. Bezifferung der Skalenstriche.

Der letzte Schritt erscheint dem Benutzer als der wichtigste und steht daher, insbesondere bei populären Darstellungen, unangemessen im Vordergrund, obwohl die Bezifferung von Skalenstrichen wissenschaftlich unerheblich ist.^{25a} Der erste Schritt ist für die Eindeutigkeit und Reproduzierbarkeit der Skala maßgebend. Nur mit eindeutig definierten und eindeutig zu jedem Zeitpunkt und an jedem Punkt der Erde reproduzierbaren Fixpunkten kann man korrespondierende Thermometer herstellen, mit deren Hilfe sich zu verschiedenen Zeiten und an verschiedenen Orten gemessene Temperaturen vergleichen lassen. Das ist die Voraussetzung für eine wissenschaftliche Thermometrie. Eine Skala wird durch Vergleich mit einem Standardthermometer weitergegeben. Will man die Skala nur in einem bestimmten Temperaturintervall weitergeben, so genügen auch Hilfsthermometer für einzelne Fixpunkte oder für bestimmte andere Skalenwerte.

Die thermodynamische Temperatur ließe sich durch ein Gasthermometer mit einem idealen Gas darstellen. Ein solches Instrument wird auch verwendet, seine Handhabung ist aber für praktische Zwecke zu kompliziert, so daß sein Gebrauch den Staatsinstituten für Metrologie vorbehalten bleibt. Für die Praxis, auch im Bereich der Präzisionsmessungen, verwendet man heute eine empirische Temperatur, die durch die sogenannte „Internationale Praktische Temperaturskala (IPTS)“ definiert ist.²⁶ Sie beruht auf mehreren, gut repro-

^{25a} Ernst Mach sagt dazu: „Diese Temperaturzahl hat lediglich die Eigenschaft einer Inventarnummer . . .“ E. Mach: Die Prinzipien der Wärmelehre. 2. Aufl. J. A. Barth: Leipzig 1900, S. 56.

²⁶ Die gültige Form ist die „Internationale Praktische Temperaturskala von 1968“, in der Form von 1975, die durch die 15. Generalkonferenz für Maß und Gewicht 1975 angenommen wurde (IPTS-68). Vgl. Sigmar German u. Peter Drath: Handbuch SI-Einheiten. 460 Seiten. Vieweg: Braunschweig 1979.

TOM. IV. XIV. LEÇON. pl. 3.

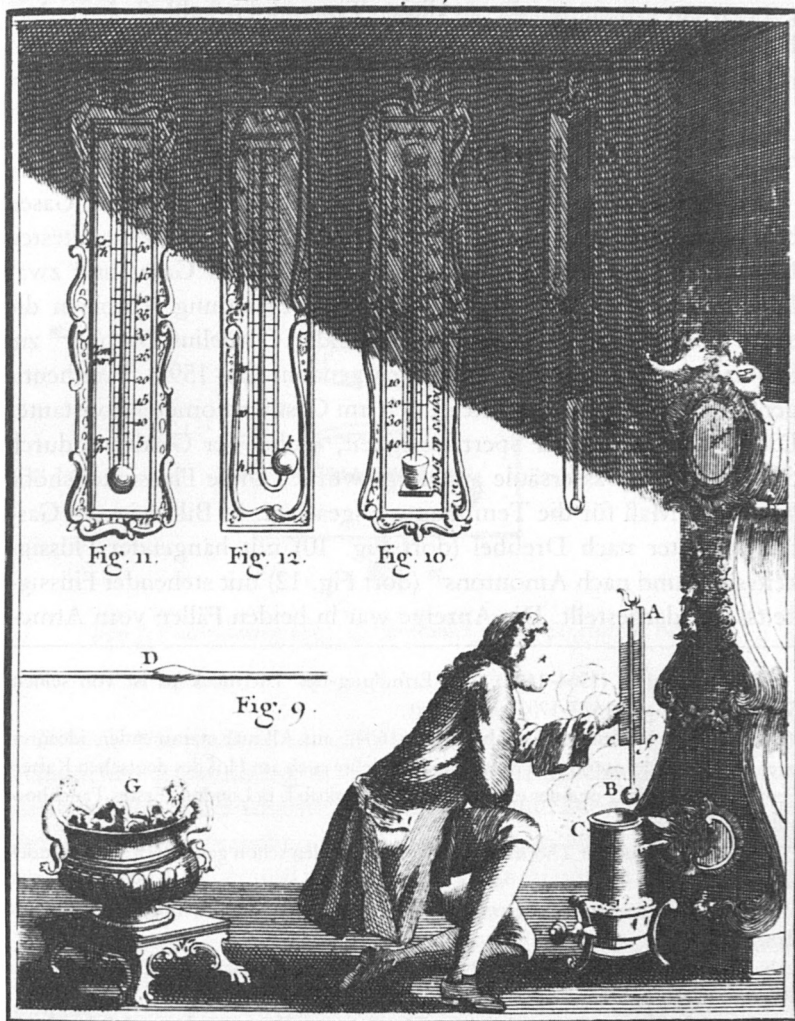


Bild 1: Thermometrie um 1750. Fig. 10 Luftthermometer nach Drebbel; – Fig. 12 Luftthermometer nach Amontons; – Fig. 11 Florentiner Thermometer mit Wein-
geist; rechts oben Reisettermometer; unten Kalibrierung am Dampfpunkt und Eis-
punkt. Nach Nollet: *Leçons de Physique Expérimentale*. Paris 1764 [Photo Deut-
sches Museum, München].

duzierbaren Gleichgewichtszuständen als Fixpunkten und Normalgeräten zur Messung, die an diesen Fixpunkten kalibriert werden. Die Temperatur der IPTS-68 ist die derzeit bestmögliche Annäherung an die thermodynamische Temperatur.

2.2 *Anfänge der Thermometrie*

Die Wirkung der Wärme auf das Volumen der Körper ist bei Gasen besonders auffallend. So ist es nicht überraschend, daß die ältesten Instrumente zur Bestimmung von Temperaturen Gase, und zwar Luft, als Arbeitsmedium enthielten. Ihre Erfindung schreiben die einen Galilei,²⁷ die anderen dem Holländer Cornelius Drebbel²⁸ zu; bei beiden wird etwa die gleiche Zeit genannt (um 1592).²⁹ Im heutigen Sprachgebrauch handelte es sich um Gasthermometer konstanter Dichte mit Wasser als Sperrflüssigkeit, wobei der Gasdruck durch die Höhe der Wassersäule angezeigt wurde. Diese Flüssigkeitshöhe wurde als Maß für die Temperatur angesehen. In Bild 1 ist ein Gasthermometer nach Drebbel (dort Fig. 10) mit hängender Flüssigkeitssäule und nach Amontons³⁶ (dort Fig. 12) mit stehender Flüssigkeitssäule dargestellt. Die Anzeige war in beiden Fällen vom Atmo-

²⁷ Galileo Galilei (1564–1642). Die Erfindung des Thermoskops ist von seinem Schüler V. Viviani (1622–1703) überliefert.

²⁸ Cornelius Jacobszoon Drebbel (1572–1634), aus Alkmar stammender, ideenreicher Erfinder, Philosoph und Mathematiker, lebte auch am Hof des deutschen Kaisers Ferdinand II. in Prag und des englischen Königs Jakob I. in London. Erstes Tauchboot auf der Themse.

²⁹ Zur Geschichte der Thermometrie seien außer den schon genannten Werken noch zitiert:

a. J. H. van Swinden: *Dissertation sur la comparaison des thermomètres*. Amsterdam 1778.

b. Johann Heinrich Lambert: *Pyrometrie oder vom Maaße des Feuers und der Wärme*. Berlin 1779.

c. Fr. Burckhardt: *Die wichtigsten Thermometer des achtzehnten Jahrhunderts*. Bericht der Gewerbeschule zu Basel. 30 Seiten. Basel 1871.

d. E. Gerland: *Das Thermometer*. 48 Seiten. In: *Sammlung gemeinverständlicher wissenschaftlicher Vorträge*, hrg. Rud. Virchow u. Fr. v. Holtzendorff. XX. Serie, Heft 457–480. Berlin: Carl Habel 1885.

e. E. Gerland u. F. Traumüller: *Geschichte der physikalischen Experimentierkunst*. 442 Seiten. Leipzig 1899. Reprografischer Nachdruck Hildesheim 1965.

f. Kirstine Meyer: *Die Entwicklung des Temperaturbegriffs im Laufe der Zeiten*. Braunschweig 1913.

sphärendruck abhängig. Der italienische Arzt und Anatom Sanctorius (1561–1636, Professor in Padua) verwendete ein Luftthermometer zur Fiebermessung, dessen Anwendung Bild 2 zeigt. Die normale Körpertemperatur war durch eine Marke am Kapillarrohr gekennzeichnet.

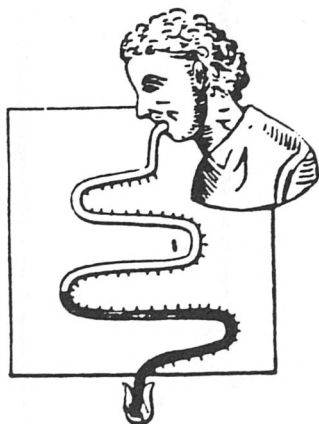


Bild 2: Fiebermessen mit Luftthermometer nach Sanctorius. Nach^{29e}.

Damals wie heute konnten sich Gasthermometer wegen der umständlichen Anwendung in der Praxis nicht durchsetzen und wurden von Flüssigkeitsthermometern verdrängt. Diese konnten in beliebiger Lage gebraucht werden, ihre Anzeige hing nicht vom Atmosphärendruck ab und man konnte sie in kleineren Abmessungen herstellen. Bei der Entwicklung der Flüssigkeitsthermometer spielte eine Gruppe italienischer Wissenschaftler eine entscheidende Rolle, die um die Mitte des 17. Jahrhunderts in Florenz zusammenkamen.

2.3 *Accademia del Cimento*

Nach dem Tode Galileis 1642 fanden sich einige seiner Schüler in Florenz zusammen, um im Sinne ihres Lehrers weiterhin experimentelle Naturforschung zu betreiben. Da auch der Großherzog der Toskana, Ferdinand II (1610–1670) ein Bewunderer Galileis und ein

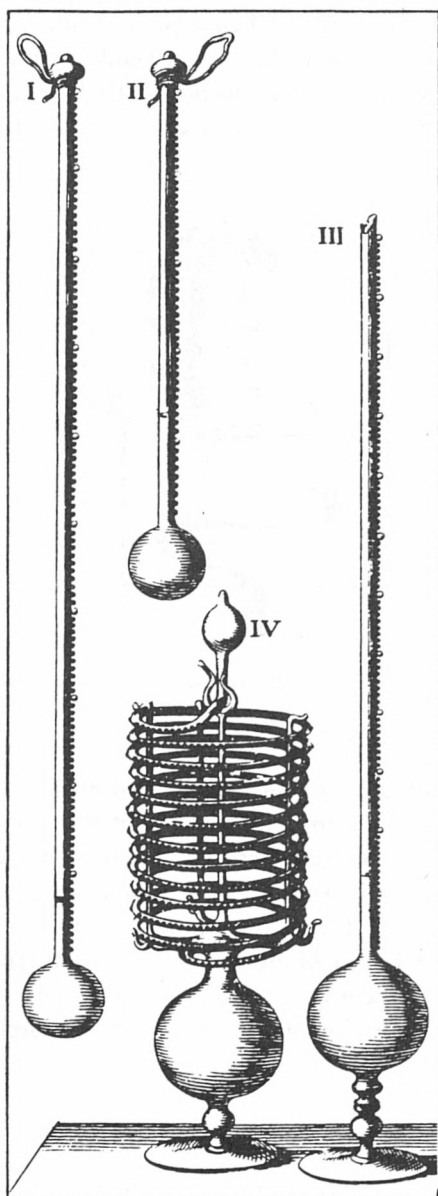


Bild 3: Florentiner Thermometer. I 100 Grad; – II 50 Grad; – III 300–400 Grad; – IV
Spiralthermometer [Photo Istituto e Museo di Storia della Scienza di Firenze].

Freund der Naturwissenschaften war, räumte er diesen Wissenschaftlern zu ihren Treffen seine eigenen Räume ein, so daß am Hofe zu Florenz eine Art Privatakademie entstand. Hieraus entwickelte sich später die „Accademia del Cimento“, die 1657 durch den Großherzog gegründet wurde. Das Patronat übernahm der jüngere Bruder, Leopoldo de' Medici (1617–1675), der spätere Kardinal.³⁰ Diese Akademie hat nur 10 Jahre bestanden, in dieser Zeit aber sehr erfolgreich gearbeitet und Instrumente entwickelt, die ihre Erfinder lange überlebten. Ihre Tätigkeit ist in einem Arbeitsbericht niedergelegt, den der Akademie-Sekretär im Jahre der Auflösung (1667) veröffentlichte.³¹ Viele der von der Accademia del Cimento verwendeten und entwickelten Instrumente befinden sich heute im Museo di Storia della Scienza in Florenz.³²

Zu diesen Instrumenten gehört auch das „Florentiner Thermometer“, eines der ältesten Flüssigkeitsthermometer der Welt, das unter diesem Namen mindestens bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts verbreitet war.¹ Es handelt sich um ein mit Weingeist gefülltes Glasthermometer, das aus einer Kugel mit angeschmolzener, oben geschlossener Kapillare bestand (Bild 3, I bis III). Die Skalenpunkte waren schwarze Email-Tröpfchen, die man auf die Kapillare aufgeschmolzen hatte. Jeder zehnte Tropfen war aus weißem, jeder hundertste aus rotem Material.³⁰ Die Akademie verwendete Thermometer mit Skalenlängen von 50, 100 und 300 bis 400 Grad.

Zur Kalibrierung nahm man zwei äußerste Punkte an, jenen der starken Winterkälte in Florenz, der vermutlich etwas unterhalb des Eispunkts lag, und jenen der großen Sommerwärme. Allerdings lagen diese Temperaturen an verschiedenen Skalenpunkten bei den einzelnen Thermometer-Typen, wie Bild 4 nach Lambert^{29b} zeigt. Trotz dieser nicht eindeutigen Fixpunkte ließen sich innerhalb einer Serie durch die Erfahrung der Glasbläser Thermometer mit befriedigender Korrespondenz herstellen, wie es kürzlich Vitton und Me-

³⁰ M. Celeste Cantù u. M. Luisa Righini Bonelli: *The Accademia del Cimento*. 16 Seiten. Nardini Ed.; Centro Intern. del Libro, (ohne Jahreszahl).

³¹ *Saggi di Naturali Esperienze fatte nell'Accademia del Cimento*. Firenze 1667. Reprint Pisa: Domus Galilaeana 1957.

³² M. Celeste Cantù u. M. Luisa Righini Bonelli: *Gli Strumenti Antichi al Museo di Storia della Scienza di Firenze*. 173 Seiten. Firenze: Arnault 1980.

Anzeigen.	1. Therm.	2. Therm.	3. Therm.
Sommer: Sonnenwärme			
Nähe: Blutwärme :	80	40	400
frisches Wasser :	—	—	140
Starke Winterkälte :	17	11	
in Florenz :	18	12	
gefahnen Eis :	7 $\frac{1}{2}$	—	35
	5	—	15

Bild 4: Skalen der Florentiner Thermometer. 1. Therm. 100 Grad; – 2. Therm. 50 Grad; – 3. Therm. 400 Grad. – Nach Lambert^{29b}.

stutz³³ an dem 50 Grad-Thermometer feststellen konnten, das in Bild 5 mit Maßstab gezeigt ist. Aus Bild 3, IV ist noch das Spiralthermometer zu erwähnen, dessen Spirale etwa 10 cm hoch ist, bei einem Durchmesser der unteren Kugel von 6,8 cm. Wenn es sich auch um eine wissenschaftliche Spielerei handelt, zeigt es doch den hohen Stand der Fertigkeit der Florentiner Glasbläser.

Die Florentiner Thermometer verbreiteten sich rasch in alle Länder. Das galt für jene Instrumente, die noch aus der Akademie stammten, aber erst recht für jene, die nach der Auflösung der Akademie von anderen Instrumentenmachern, vorwiegend Italienern, außerhalb Florenz' hergestellt und vertrieben und auch von fliegenden Händlern angeboten wurden. Die Florentiner Thermometer machten dabei manche Veränderungen durch, die Lambert^{29b} folgendermaßen beschreibt:

Diese Leute giengen von der Sorgfalt, die die Florentinische Akademie bey der Eintheilung ihrer Thermometer beobachtet hatten, sehr ab. Und eben daher entstand die Klage überall, daß die Thermometer keine verständliche Sprache haben und ihre Eintheilungen gar nicht mit einander übereinstimmen.

³³ Ottavio Vittori u. Anna Mestitz: Calibration of the „Florentine Little Thermometer“. Endeavor 5 (1981) No. 3, 113–118. Hierin wird auch auf frühere Untersuchungen von V. Antinori (1841) hingewiesen.

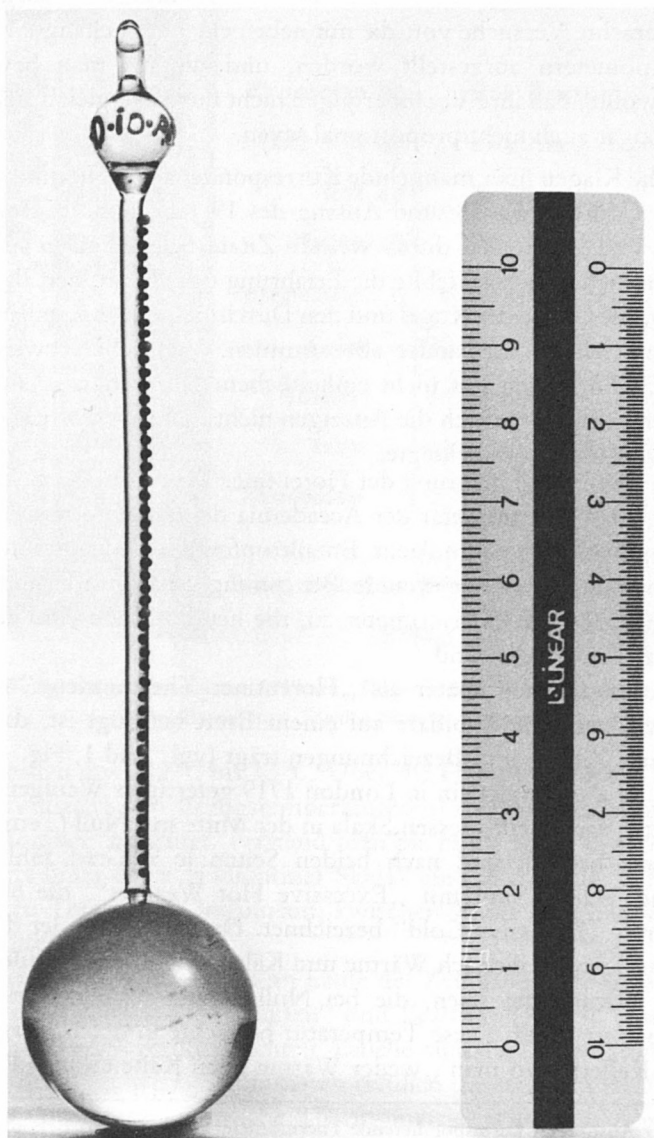


Bild 5: „Kleines Florentiner Thermometer“, 50 Grad. Museo di Storia della Scienza di Firenze.

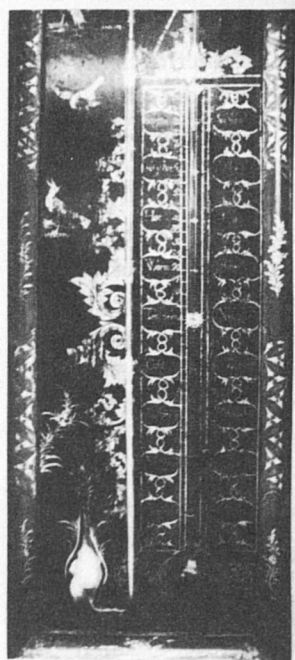
Man warf sogar die Schuld auf die Thermometer selbst, und brachte Versuche vor, die mit neben einander gehängten Thermometern aufgestellt worden, und woraus man beweisen wollte, daß ihre Veränderungen nicht nur nicht gleich, sondern sogar auch nicht proportional seyen.

Solche Klagen über mangelnde Korrespondenz der Thermometer³⁴ waren am Ende des 18. und Anfang des 19. Jahrhunderts weit verbreitet und ließen sich durch weitere Zitate belegen. Den späteren Thermometermachern fehlte die Erfahrung der Florentiner, die Füllmenge, die Größe der Kugel und den Durchmesser der Kapillare (das Kaliber) richtig aufeinander abzustimmen. Vielleicht verwendeten sie auch Kapillaren mit nicht einheitlichem Durchmesser, also mit Kaliberfehlern, wodurch die Anzeigen nicht mehr proportional blieben, wie Lambert es beklagte.

Eine weitere Veränderung der Florentiner Thermometer betraf die Skalen. Die Thermometer der Accademia del Cimento besaßen auf die Kapillare aufgeschmolzene Emailtropfen als Skalenpunkte, wie oben beschrieben, ohne weitere Benennung oder Bezifferung. Das trifft auch für alle Thermometer zu, die heute im Museum zu Florenz³² zu besichtigen sind.

Dagegen tauchen später als „Florentiner Thermometer“ solche auf, bei denen die Kapillare auf einem Brett befestigt ist, das eine Skala mit Ziffern und Bezeichnungen trägt (vgl. Bild 1, Fig. 11). In Bild 6 ist als Beispiel ein in London 1719 gefertigtes Weingeistthermometer dargestellt, dessen Skala in der Mitte mit Null (Temperate Weather) beginnt und nach beiden Seiten je 90 Grad zählt. Die 80 Grad Wärme sind mit „Excessive Hot Weather“, die 80 Grad Kälte mit „Excessive Cold“ bezeichnet. Das entspricht der damaligen Auffassung, wonach Wärme und Kälte zwei gegeneinander wirkende Naturkräfte seien, die bei Null gerade ausgeglichen, eben „temperiert“ sind. Diese Temperatur herrschte in tiefen, verschlossenen Kellern, wo man „weder Wärme noch Kälte empfand“; dem

³⁴ Der Ausdruck „korrespondierende Thermometer“ ist keine Wortschöpfung unserer Tage, sondern stammt aus dem 18. Jahrhundert. Unter dem Stichwort „korrespondierende Wettergläser“ in Zedlers Konversationslexikon von 1748 werden Fahrenheits Leistung und Wolffs Kommentar gewürdigt. (Vgl. Johann Heinrich Zedler: Großes vollständiges Lexikon aller Wiss. u. Künste. Leipzig u. Halle, 64 Bde., ab 1732. Nachdruck Graz ab 1961. Hier Bd. 55, 1748, Nachdruck 1962.)



Excessive	80	Hot Weather
Very Hot	60	Weather
Hot	40	Weather
Warm	20	Weather
Temperate	0	0 Weather
Cold	20	Weather
Colder	40	Weather
Very	60	Cold
Excessive	80	Cold

Isaac Robelou Fecit Londini

1719

Bild 6: Weingeistthermometer von 1719 mit „Florentiner Skala“. Links unten Syphon eines Barometers. Science Museum, London.

entsprechen etwa 12°C bis 13°C. Über die Fixierung solcher Skalen an reproduzierbaren Bezugstemperaturen ist damit nichts ausgesagt. Wie Møller¹ berichtet, verstand man bis in die Mitte des 19. Jahrhunderts unter einer „Florentiner Skala“ eine solche, die, von einer mittleren Temperatur beginnend, zwischen 90 bis 100 Grad Wärme und Kälte unterscheidet.

Neben dieser Skala gab es im Laufe der Zeit zahlreiche andere mit ganz verschiedenen „Fixpunkten“ und Bezifferungen. In einer von Lambert^{29b} 1779 veröffentlichten Tabelle sind 19 Temperaturskalen aufgeführt. Nur wenige von diesen erfüllen die strengen Bedingungen für eine wissenschaftliche Thermometrie, wie sie in Abschnitt 2.1 zusammengestellt sind. Es handelte sich überwiegend um Flüssigkeitsthermometer, bei denen die Temperatur dem Volumen proportional gesetzt war.³⁵

³⁵ Diese Proportionalität erschien den Autoren offenbar als unbedenklich. Eine

Auf der Suche nach einem „natürlichen“ Maß für die Temperatur findet Amontons³⁶ (1663–1705) an einem Luftthermometer mit Quecksilber als Sperrflüssigkeit, daß sich der Druck der eingeschlossenen Luft immer um den gleichen Bruchteil (rund ein Drittel) des Anfangsdruckes erhöht, wenn die Thermometerkugel aus kaltem Wasser in siedendes Wasser getaucht wird. Das gilt für beliebige Anfangsdrücke und Volumina. Da der Luftdruck (immer unter Einbeziehung des Atmosphärendrucks) als Maß für die Temperatur gelten kann, läßt sich auf diese Weise eine natürliche Temperaturskala aufstellen, deren Nullpunkt dem Druck Null entspricht. Amontons schlägt vor, ein solches Luftthermometer zur Kalibrierung von Flüssigkeitsthermometern zu verwenden, um von den konventionellen Skalen abzukommen. Diese Vorschläge, die von Lambert^{29b} weitergeführt wurden, bleiben unbeachtet. In aller Konsequenz sind sie erst 1948 durch die 9. Generalkonferenz für Maß und Gewicht bei der Definition einer thermodynamischen Temperaturskala berücksichtigt worden.

Beim Auftreten Fahrenheits herrscht etwa folgende Situation: Die Florentiner Thermometer sind weit verbreitet. Ihre Qualität entspricht aber nicht mehr jener aus der Zeit der Accademia del Cimento. Die Klagen über mangelnde Konkordanz sind allgemein. Daneben gibt es zahlreiche weitere Thermometerkonstruktionen mit geringer Verbreitung. Kaum eine davon entspricht den Forderungen einwandfreier Temperaturmessung. Weiterführende Vorschläge, etwa von Newton oder Amontons, finden so gut wie keine Beachtung. Das Interesse an Temperaturmessung ist groß. Die Akademien in London, Paris, Mannheim und Berlin, ebenso wie Einzelpersonen u. a. in Florenz, Danzig, Kiel, Kopenhagen, unternehmen Dauerbeobachtungen von Luftdruck und Temperatur. Für einen Instrumentenmacher, der korrespondierende Thermometer anbot, herrschten gute Aussichten.

Ausnahme machte Newton, der diese Proportionalität erst durch ein zweites Meßverfahren bestätigte: I. Newton: *Scala Graduum Caloris*. Phil. Trans. 22 (1701) 824–829. Vgl. U. Grigull: Newton's Temperature Scale and the Law of Cooling. Wärme- u. Stoffübertragung 18 (1984) 195–199.

³⁶ G. Amontons: *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*. Année 1702, S. 155–180, Paris 1704.

2.4 Fahrenheits erste Thermometer

2.4.1 Die Fixpunkte

Wie man aus Fahrenheits eigenen Mitteilungen schließen kann, muß er in den Jahren 1706 oder 1707, also mit 20 oder 21 Jahren, begonnen haben, Thermometer herzustellen. Der Besuch bei Olav Roemer 1708 veranlaßte ihn, sein erstes Thermometer zu „verbessern“. Über dieses zweite Thermometer, das wie das erste ein Weingeist-in-Glas-Thermometer war, haben wir drei Aussagen: Fahrenheits Publikation Nr. 2 in den *Philosophical Transactions*,^{1,24b} Wolffs Bericht in den *Acta Eruditorum*¹⁷ und Fahrenheits Brief Nr. 15 an Boerhave⁹ vom 17. April 1729. Denn nach der dritten Quelle war dieses Thermometer identisch mit jenem, das Fahrenheit in zwei Exemplaren Christian Wolff in Halle 1714 aushändigte. Die Skala dieses Thermometers war wie folgt definiert und beziffert:

Der Nullpunkt liegt bei der Temperatur einer Kältemischung aus Schnee oder Eis mit „Meersalz“ oder Salmiak (Ammoniumchlorid, NH_4Cl), von Wolff mit „*frigus vehementissimum*“, von Fahrenheit^{24c} später mit „*Extream Cold*“ bezeichnet. In der zeitgenössischen Literatur heißt eine solche Kältemischung „gesalzen Eis“, ihre Temperatur „künstliche Kälte“.

Der zweite Fixpunkt ist der Eispunkt, realisiert als Mischung von Wasser mit Eis. Er wird mit 32 Grad beziffert und von Wolff mit „*aer frigidus*“ benannt.

Der dritte Fixpunkt liegt bei jener Temperatur, die das Thermometer im Munde oder in der Achselhöhle eines gesunden Menschen endgültig annimmt, von Wolff mit „*aestus intolerabilis*“ benannt, von Fahrenheit mit 96 beziffert und später mit „*Extream Hott*“ bezeichnet.^{24e}

Statt der genannten Ziffern, also der Vielfachen von 8, werden auch sogenannte „große Grade“ erwähnt, die das Vierfache der genannten betragen (8 und 24 statt 32 und 96). Womit und ob überhaupt die Skalen der in Halle bei Wolff vorgezeigten Thermometer beziffert waren, ist nicht genau nachweisbar, es spielt für unsere Betrachtungen auch keine entscheidende Rolle.

Die 3 Fixpunkte waren im Prinzip lange vor Fahrenheit vorgeschlagen.³⁷

Mit ihren drei Fixpunkten ist die Skala von Fahrenheit überbestimmt. Das gibt uns die Möglichkeit, die Temperatur des von ihm gewählten Nullpunkts nachzuprüfen, zumal die Angaben dazu nicht eindeutig sind, da er von Meersalz *oder* Salmiak spricht.³⁸ Da die Temperatur des dritten Fixpunkts (Körpertemperatur, 96°F oder 37°C) bei Fahrenheit dreimal so hoch liegt als die Temperatur des Eispunkts (32°F oder 0°C), und da er seine Temperatur dem Volumen des Weingeists proportional setzt,³⁵ kann man folgende Frage formulieren:

Bei welcher Celsiusstemperatur t^* liegt der Nullpunkt der zweiten Fahrenheitsskala, wenn folgende Bedingung für ein Weingeist-in-Glas-Thermometer erfüllt sein muß:

$$\frac{V(96^\circ\text{F}) - V(0^\circ\text{F})}{V(32^\circ\text{F}) - V(0^\circ\text{F})} = 3 = \frac{V(37^\circ\text{C}) - V(t^*)}{V(0^\circ\text{C}) - V(t^*)} \quad (1)$$

Mit °F sind hier die „kleinen Grade“ der Fahrenheitsskala von 1714 gemeint, die wir nach Bedarf auch mit °F (1714) bezeichnen werden. Unter Celsiusstemperatur t ist hier und im folgenden die heute als zutreffend angesehene Temperatur verstanden; es wird also zwischen einer empirischen und der thermodynamischen Celsiusstemperatur kein Unterschied gemacht. Wenn man annimmt, daß die Ausdehnung des Glases gegenüber der Ausdehnung des Weingeists vernachlässigt werden kann, erhält man aus Gl. (1) folgenden Ausdruck für die Dichte $\varrho(t^*)$ des Weingeists bei der Celsiusstemperatur t^* , die der Fahrenheittemperatur $t_F = 0^\circ\text{F}$ (1714) entspricht:

$$\frac{\varrho(0^\circ\text{C})}{\varrho(t^*)} = \frac{1}{2} \left(3 - \frac{\varrho(0^\circ\text{C})}{\varrho(37^\circ\text{C})} \right) \quad (2)$$

Mit Kenntnis der Dichte-Temperaturfunktion $\varrho(t)$ für Äthylalkohol-Wasser-Mischungen bei verschiedenem Massenverhältnis läßt sich aus Gl. (2) die Celsiusstemperatur t^* des Nullpunkts der Fahren-

³⁷ N. Ernest Dorsey: Fahrenheit and Roemer: J. Washington Acad. Sciences 36 (1946) No. 11, 361–372.

³⁸ Einige Autoren haben daraus „Meersalz **und** Salmiak“ gemacht. Das entspricht nicht dem Text der Quellen.

heitskala von 1714 bestimmen und mit der Gleichgewichtstemperatur einer der in Frage kommenden Eis-Salz-Mischungen vergleichen.

Die Kälteerzeugung durch „gesalzen Eis“ ist schon seit alters her bekannt.³⁹ Bild 7 zeigt als Beispiel das Phasendiagramm des Systems

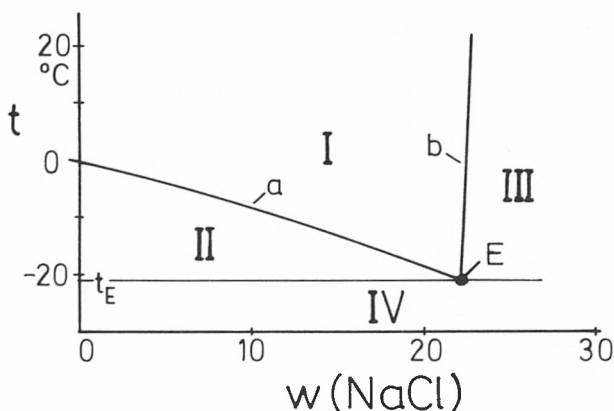


Bild 7: Schmelzdiagramm von Eis und Kochsalz. a) Schmelzpunktniedrigung; – b) Löslichkeit von NaCl in Wasser, E eutektischer Punkt mit der Temperatur t_E , w (NaCl) in g anhydr. Substanz in 100 g Lösung.

H₂O-NaCl. Das Gebiet I der ungesättigten Lösung Wasser-Natriumchlorid grenzt längs der Kurve a an das Gebiet II Lösung und Eis, und längs der Kurve b an das Gebiet III Lösung und Natriumchlorid. Das Gebiet IV enthält die Mischung Eis und festes Natriumchlorid. Der eutektische Punkt E, der hier auch kryohydratischer Punkt genannt wird, ist ein vierfacher (Quadrupel-) Punkt, weil hier die 4 Phasen Lösung, Eis, Salz und Dampf miteinander im Gleichgewicht stehen. Treten Eis und Salz zusammen, bildet sich spontan die Lösung I, wobei die verbrauchten Lösungs- und Schmelzwärmen das System längs der Kurve a solange abkühlen, bis die Lösung auch an Salz gesättigt ist, also bis zum Schnittpunkt mit der Kurve b, dem eutektischen Punkt E. Die Temperatur t_E stellt sich unabhängig von einer vorherigen Unterkühlung von Eis und Salz ein. Tabelle 1 zeigt die Massenanteile und die eutektischen Temperaturen t_E für die drei

³⁹ Vgl. hierzu: Fr. Rüdorff: Über Kältemischungen. Ann. Physik Chemie 122 (1864) 337–346 u. Tafel I.

in Frage kommenden Systeme.⁴⁰ Wie eigene Versuche zeigten, besteht zwischen Meersalz und reinem Natriumchlorid kein meßbarer Unterschied. Die Temperaturen t_E stellen sich auch dann ein, wenn man erheblich von den angegebenen Massenanteilen abweicht.³⁹ Die eutektischen Punkte dieser Kältemischungen eignen sich vorzüglich als Fixpunkte für Temperaturskalen.

Tabelle 1: Massenanteile und eutektische Temperaturen t_E von Kältemischungen aus Eis, Kochsalz, Salmiak

Stoff	Massenanteile (Salz als Anhydrit)		
Eis	100	100	100
NaCl	28,8	0	29,7
NH ₄ Cl	0	22,9	7,6
t_E in °C	– 21,2	– 15,8	– 25,0

Zur Berechnung der Celsius-temperatur t^* von Fahrenheits Nullpunkt nach Gl. (2) muß man die Funktion $\varrho(t)$ von Weingeist kennen. In der Literatur ließen sich nur Werte über 0°C finden.⁴¹ Wir haben daher für 4 Massengehalte die $\varrho(t)$ -Funktion bis – 30°C gemessen⁴² und daraus t^* ermittelt, wie es Tabelle 2 zeigt. Daraus kann man schließen, daß Fahrenheit das System Eis–Meersalz zur Darstellung seines Nullpunkts verwendet hat und nicht das System Eis–Salmiak.

Tabelle 2: Celsius-temperatur t^* des Nullpunkts der Fahrenheit-Skala von 1714 und Dichteverhältnisse für 4 verschiedene Massengehalte w des Weingeists (w in g je 100 g Lösung)

w (%)	t^* (°C)	$\frac{\varrho(0^\circ\text{C})}{\varrho(37^\circ\text{C})} - 1$
99,9	– 20,0	1/24,67
95,0	– 20,1	1/25,67
80,9	– 19,7	1/27,95
72,7	– 19,8	1/28,57

⁴⁰ Landolt-Börnstein: Physikalisch-Chemische Tabellen. 5. Aufl. Bd. 1, S. 626–627. Berlin: Springer 1923.

⁴¹ Landolt-Börnstein: Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik u. Technik. 6. Aufl. Bd. II, 1, S. 884. Berlin: Springer 1971.

⁴² Der Verfasser dankt Herrn Udo Glückert für die sorgfältige Durchführung dieser Messungen. Spätere Publikation ist vorgesehen.

Das ternäre System Eis-Meersalz-Salmiak kommt nach dem Wortlaut seiner eigenen Publikationen³⁸ ohnehin nicht in Frage. Der eutektischen Temperatur t_E hat er sich nur bis auf rund 1 K genähert. Das läßt sich zwanglos durch die gemeinsame Wirkung des herausragenden Fadens und der Wärmeleitung auf die Meßstelle infolge der höheren Umgebungstemperatur erklären. Hierzu paßt Fahrenheits Feststellung:^{24b} „Dieser Versuch gelingt besser im Winter als im Sommer.“ Damit ist glaubhaft gemacht, daß Fahrenheits zweite Skala eindeutig durch drei reproduzierbare Fixpunkte definiert ist.

2.4.2 Die korrespondierenden Thermometer von Halle

Die beiden korrespondierenden Thermometer, die Fahrenheit in Halle 1714 Christian Wolff übergab, besaßen gleiche Skalen (mit der ungefähren Länge von 16 cm), aber Thermometergefäße von verschiedenem Inhalt. Sie ergaben im ganzen von Wolff untersuchten Bereich (etwa 10°C bis 30°C) übereinstimmende Anzeigen.¹⁷ Die Beziehung zwischen Füllvolumen, Skalenlänge und Kaliber wird durch die elementare Thermometergleichung angegeben:

$$\frac{V(t) - V(0^\circ\text{C})}{V(0^\circ\text{C})} = \frac{\varrho(0^\circ\text{C})}{\varrho(t)} - 1 = \frac{qL_t}{V(0^\circ\text{C})} \quad (3)$$

Es bedeuten: q den Querschnitt des Kapillare, L_t die Skalenlänge für das Temperaturintervall 0°C bis t und $V(0^\circ\text{C})$ das Volumen des Gefäßes und des Teils der Kapillare bis zur Marke 0°C. Dabei ist angenommen, daß die Ausdehnung des Glases gegenüber der des Weingeists zu vernachlässigen ist und daß keine weiteren Korrekturen, etwa für Kaliberfehler, herausragenden Faden usw., erforderlich sind. Als Bezugstemperatur ist hier, wie üblich aber nicht notwendig, 0°C angenommen. Da die Skalenlänge L_t bei beiden Instrumenten Fahrenheits die gleiche war, die Gefäßvolumina (also im wesentlichen $V(0^\circ\text{C})$) aber verschieden waren, mußte Fahrenheit Kapillaren wählen, bei denen das Verhältnis $q/V(0^\circ\text{C})$ konstant blieb, sofern er in beiden Thermometern Alkohol gleicher Konzentration verwendet hat. Er konnte aber noch eine weitere Möglichkeit der Justierung ausnutzen, indem er die linken Seiten von Gl. (3) veränderte dadurch, daß er zwei verschieden konzentrierte Alkohole verwendete. Wie die rechte Spalte von Tabelle 2 zeigt, ist die $\varrho(t)$ -Funktion we-

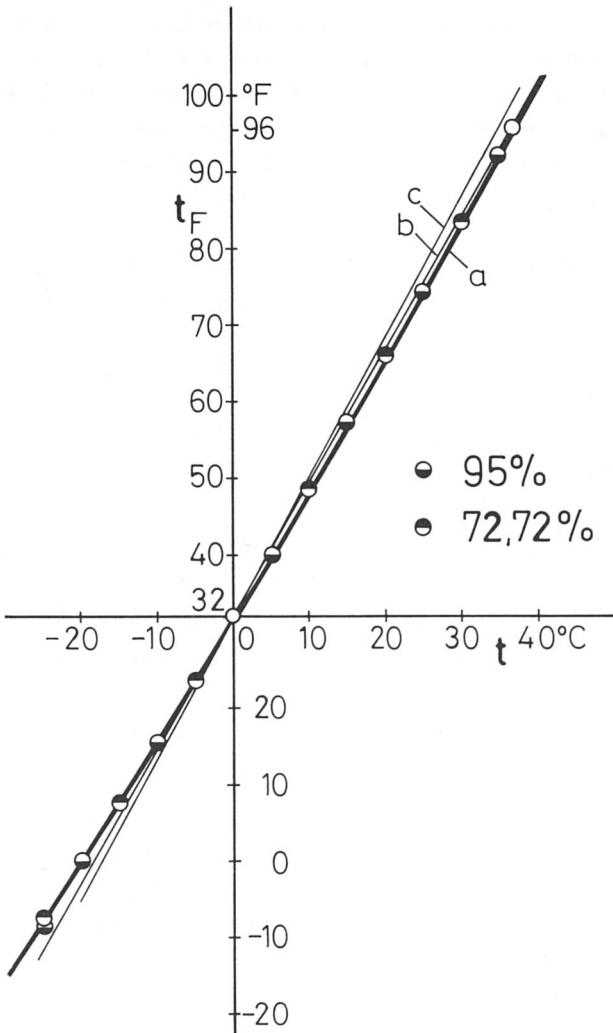


Bild 8: Skala der korrespondierenden Thermometer (Halle 1714) für Weingeist von 95% und 75,72% als Funktion der Celsius-temperatur.

sentlich von der Konzentration abhängig. Es ist aber nicht selbstverständlich, daß durch diese Variation gleiche Anzeigen erhalten bleiben.

Zur Prüfung dieser Frage ist in Bild 8 die Fahrenheittemperatur

über der Celsiustemperatur aufgetragen derart, daß 32°F dem Nullpunkt der Celsiusskala ($^{\circ}\text{C}$) entspricht und 96°F auf 37°C fallen (Kurve a). Dann liegt der Nullpunkt der Fahrenheitskala bei $\approx -20^{\circ}\text{C}$, da die beiden Skalen nicht linear voneinander abhängen. Die Abweichung zur Linearität (dünne Linie b in Bild 8) ist nicht sehr groß, rund 0,5 K bei etwa 20°C und 1,5 K bei -20°C . Es wird aber durch diese Darstellung plausibel gemacht, daß Fahrenheit für den Nullpunkt seiner Skala von 1714 tatsächlich die eutektische Temperatur des Systems Eis-NaCl verwendet hat, entsprechend seiner eigenen Beschreibung.^{24b} Die Funktion zwischen Fahrenheit- und Celsius-temperatur ist in Bild 8 für zwei verschiedene Massengehalte des Weingeists, nämlich 95% und 72,72%, für die eigene Dichtemessungen vorliegen, dargestellt. Man erkennt, daß die berechneten Punkte im Rahmen der Zeichengenauigkeit auf die gleiche Kurve fallen. Die größte gegenseitige Abweichung liegt bei etwa 20°C und beträgt $0,16^{\circ}\text{F}$. Christian Wolff¹⁷ berichtet, daß er im Rahmen seiner Prüfung der beiden Fahrenheitthermometer größte Abweichungen von $\frac{1}{16}$ Grad gefunden hat, womit er sich auf die 24teilige Skala bezieht, deren Grade 4mal so groß wie die von uns hier betrachteten Fahrenheitgrade der 96teiligen Skala waren. Danach ist die größte von Wolff angegebene Abweichung $0,25^{\circ}\text{F}$, also größer als diejenigen, die allein durch Verwendung von Weingeist verschiedenen Gehalts entstehen können.

Wir folgern aus diesen Betrachtungen:

1. Der „Kunstgriff“ Fahrenheit bei der Herstellung der beiden korrespondierenden Thermometer von 1714 bestand darin, daß er wohldefinierte Fixpunkte verwendete, wie er es erst in seiner zweiten Publikation von 1724 beschrieben hat.^{24b}
2. Wir halten es für sehr wahrscheinlich, daß Fahrenheit die eutektische Temperatur des Systems NaCl-Eis ($-21,2^{\circ}\text{C}$) als Temperatur seines Nullpunkts anstrebte und bis auf die Meßunsicherheit von rund ± 1 K auch erreichte.
3. Die Konkordanz der Thermometer konnte nach Gl. (3) durch Anpassung von Kaliber und Füllvolumen erreicht werden, da die Skalenlänge festlag.
4. Eine weitere Anpassung bot sich an durch Wahl von Weingeist verschiedenen Gehalts, wodurch, gemäß Bild 8, die Konkordanz der beiden Thermometer erhalten blieb. Damit ist auch nachge-

wiesen, daß der Weingeistgehalt (in gewissen Grenzen) bei der Thermometrie keine Rolle spielt.⁴³

5. Christian Wolff hielt die korrespondierenden Thermometer Fahrenheit's für einen so bedeutenden Fortschritt, daß er ihm einen zweiseitigen Aufsatz in den „Acta Eruditorum“ widmete. Nach Lambert^{29b} stimmten die Thermometer „zu Wolffens Verwunderung immer miteinander überein“ („Wolff errieth auch das Kunststück nicht, weil er es in den Salzen suchte“).^{29b}
6. Die Herstellung von korrespondierenden Thermometern mit festgelegter Skala, die man auch im voraus gravieren konnte, schuf die Möglichkeit einer Serienfabrikation.

2.4.3 Fahrenheit und Roemer

Bevor Fahrenheit 1714 Christian Wolff seine beiden Thermometer übergab, war er 1708 in Kopenhagen mit Olav Roemer zusammengetroffen. Dieser kalibrierte gerade seine selbst hergestellten Weingeistthermometer, die er für meteorologische Reihenmessungen brauchte, auf folgende, von Fahrenheit beschriebene Weise: Die Thermometer wurden abwechselnd in Eiswasser und in warmes Wasser getaucht und der Stand der Flüssigkeit markiert. Die Hälfte dieses Intervalls wurde nach unten angetragen und der Anfangspunkt mit 0 Grad bezeichnet, der Eispunkt mit 7,5 Grad. Dem warmen Wasser kamen danach 22,5 Grad zu. Wir haben es hier mit dem Verhältniß $22,5/7,5 = 3$ zu tun.

Diese eigentümliche Skalierung wird erst durch einen Vorschlag Roemers in seinen *Adversaria*¹¹ verständlich. Dort wird eine Skala von 60 Grad vorgeschlagen, deren höchste Temperatur die des Dampfpunkts ist. Diese 60 Grad werden in 8 Teile zu je 7,5 Grad geteilt, wobei der Eispunkt bei 7,5 Grad liegen soll, so daß für Frosttemperaturen noch 7,5 Grad bis zum Nullpunkt bleiben. Ob Roemer diese Skala wirklich in voller Länge verwendet hat, ist nicht erwiesen, worauf auch Dorsay³⁷ hinweist. Auf die Schwierigkeit, mit einem Weingeistthermometer den Wassersiedepunkt⁴⁴ messen zu wollen, wird von Roemer nicht eingegangen. Bei linearer Skala würde

⁴³ Aus den Dichteangaben Fahrenheit's kann man schließen, daß er etwa 90%igen Weingeist verwendet hat.^{24a}

⁴⁴ Der Dampfdruck von reinem Aethylalkohol bei 100°C beträgt 2,19 bar.

der Nullpunkt Roemers bei $-14,3^{\circ}\text{C}$ liegen, die Temperatur des „warmen Wassers“ entspräche $28,6^{\circ}\text{C}$.

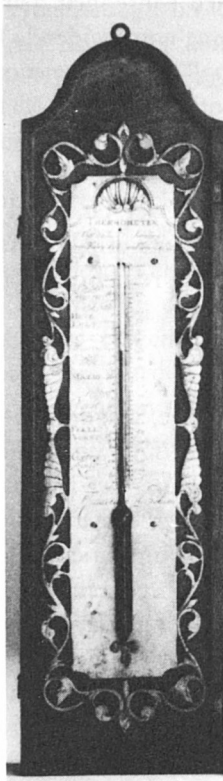
Fahrenheit identifiziert diese Warmwasser-Temperatur mit der Körpertemperatur und, wegen des oben erwähnten 3:1-Verhältnisses, Roemers Nullpunkt mit seinem eigenen, der Temperatur des „gesalzen Eises“ (vgl. nächsten Abschnitt). Falls Fahrenheit's Vermutung richtig wäre, hätte Roemer die von ihm vorgeschlagene Skala nicht benutzt, da man 37°C nicht mit $28,6^{\circ}\text{C}$ verwechseln kann. Falls Roemer seine Skala benutzt hätte, müßte sich Fahrenheit geirrt haben. Für unsere Überlegungen spielt das keine entscheidende Rolle. Die von Fahrenheit erwähnte „Verbesserung“ seiner Thermometer scheint allein darin zu bestehen, eine wesentlich in einer Richtung laufende Skala nach dem Vorbild Roemers zu übernehmen, wobei er den unbequemen Faktor 7,5 in den Faktor 8 ändert und viermal kleinere Grade einführt. Das ist der Ursprung der Gradzahl $32 = 4 \times 8$ für Fahrenheit's Eispunkt, die sich bis heute erhalten hat. Sie beruht, nach Fahrenheit's eigenen Aussagen,⁹ auf reinem Zufall.

2.4.4 Fahrenheit's älteste Skala

Diese Betrachtungen führen direkt zu der Frage, wie die Skalen der ersten Thermometer Fahrenheit's aus den Jahren 1706 oder 1707 ausgesehen haben. Nach übereinstimmender Meinung der Biographen, vor allem nach van Swinden^{29a} and Lambert,^{29b} aber auch nach Burckhardt^{29c} und Momber,¹ handelte es sich um eine Skala nach Florentiner Art (vgl. Abschnitt 2.3), für die Fahrenheit aber bereits die Fixpunkte seiner zweiten Skala anwendete (... „wiewohl er übrigens die zum Grunde gelegte Grade bey diesen Veränderungen beybehielt“).^{29b} Wenn man sich diese Auffassung zu eigen macht – und wir finden kein beweisbares Gegenargument – gelangt man zu einigen bemerkenswerten Feststellungen, Fahrenheit's Person und sein Werk betreffend:

1. Fahrenheit hat sein Arbeitsprinzip, das „artificium“ nach Wolff¹⁷ Thermometerskalen nur durch reproduzierbare Fixpunkte zu definieren, schon sehr früh, also mit 20 oder 21 Jahren, gefunden.
2. Dadurch brachte er die von ihm benutzte Skala nach Florentiner Art, die kaum noch etwas mit den Thermometern der Florentiner Akademiker zu tun hatte, auf eine eindeutige Grundlage.

3. Beim Besuch bei Roemer in Kopenhagen brachte Fahrenheit bereits ein fertiges Konzept mit. Da er in Roemers Skalierung die 3:1-Relation wiederfand, die auch seine älteste Skala enthielt, hielt er die Temperatur des warmen Wassers bei Roemer für die Bluttemperatur. Er lernte noch die Möglichkeit kennen, daß der Nullpunkt einer Skala nicht unbedingt ein Fixpunkt zu sein braucht.



Thermometer Op de Schalen		
van Fahrenheit		en Florence
	112	120
Bloed Warm	96	90
Hete Lucht	80	60
Warm	64	30
Matig	48	0
Vorst	32	30
Felle Vorst	16	60
Extra Koud	0	90
	16	120

F.Casartel,Amsterdam

Bild 9: Weingeistthermometer, hergestellt von F. Casartel, Amsterdam, vermutlich Mitte 18. Jhdt. Zylindergefäß statt Kugel. Zuordnung der Skalen wie bei Fahrenheit (Tabelle 3). Science Museum, London.

Hiervon hat er vermutlich bei den Skalen der Quecksilberthermometer Gebrauch gemacht (vgl. Abschnitt 2.5).

4. Fahrenheit muß in Amsterdam, noch in Diensten des ehemaligen Lehrherrn stehend, eine Werkstatt betrieben haben, da die Darstellung der drei Fixpunkte sowie Fabrikation und Kalibrierung seiner Thermometer einen gewissen Aufwand erforderten. Daß er hierfür Geld brauchte und ein Darlehen aufnahm, ist verständlich.

Die beiden hier betrachteten Skalen Fahrenheits, also jene von 1707 und von 1714, beziehen sich auf dieselbe Temperatur, die durch ein Weingeist-in-Glas-Thermometer definiert ist. Die Skalen enthalten dieselben drei Fixpunkte: Das Eutektikum des $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ -Systems, den Eispunkt und die Körpertemperatur. Den Zusammenhang der Bezifferung und die Celsiusstemperatur zeigt Tabelle 3, in die auch die Benennungen von Wolff¹⁷ und die späteren von Fahrenheit^{24c} eingetragen sind.

Die Fahrenheitskala von 1707 ist, äußerlich betrachtet, identisch mit jenen nach „Florentiner Art“, die unter diesem Namen noch lange bestanden.¹ Die Instrumentenmacher der späteren Zeit machten sich offensichtlich die in Tabelle 3 dargestellte Zuordnung zur Fahrenheitskala von 1714 zunutze. Das zeigt ein vermutlich Mitte des 18. Jahrhunderts in Amsterdam hergestelltes Weingeistthermometer mit einer Fahrenheit- und einer Florentinerskala (Bild 9). Hierbei ist das Thermometergefäß als Zylinder, und nicht mehr als Kugel, ausgeführt, wie es Fahrenheit zur Verringerung der Trägheit der Thermometer vorgesehen hatte.

Tabelle 3: Bezifferung und Benennung der Skalen der Weingeistthermometer Fahrenheits von 1707 und 1714. Temperaturen der Fixpunkte sind kursiv gesetzt

t_F		t	Wolff (1714)	Fahrenheit (1724)
°F (1707)	°F (1714)	°C		
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	$\approx - 20$	frigus vehementissimum	Extream Cold

2.5 Das Quecksilberthermometer

2.5.1 Vorgeschichte

Mitteilungen von Amontons³⁶ entnahm Fahrenheit,^{24a} daß dieser mit Hilfe eines Luftthermometers mit Quecksilber als Sperrflüssigkeit feststellte, daß Wasser bei einer bestimmten Temperatur siedete. Außerdem stellte Amontons fest, daß die Höhe der Quecksilbersäule im Barometer zwar wenig, aber doch merklich von der Temperatur beeinflußt wurde in dem Sinne, daß bei gleichem Luftdruck die Säule im Sommer um etwa 3 Pariser Linien höher stand als im Winter (1 ligne = $\frac{1}{12}$ pouce = 2,256 mm). Diese Beobachtungen regten Fahrenheit an, Thermometer für höhere Temperaturen zum Studium von Siedephänomenen zu bauen und hierfür Quecksilber als Thermometerflüssigkeit zu verwenden.^{24a} – Die Kenntnisse der französischen Sprache hatte er sich im Selbststudium angeeignet (Brief No. 15 vom 17. April 1729).⁹

Die ersten Quecksilberthermometer stellte Fahrenheit in den Jahren 1713/14 in Berlin her, zunächst für den eigenen Gebrauch. Nach der Übersiedlung nach Amsterdam begann er 1717/18 mit der gewerbsmäßigen Herstellung. Die ersten drei Quecksilberthermometer schickte er zusammen mit je einem Weingeistthermometer an Boerhave, s'Gravesande und Lambert ten Kate (Brief No. 14 v. 30. Mai 1729).⁹ Fahrenheit wollte damit die genaue Übereinstimmung zwischen den beiden Instrumenten demonstrieren. Diese Demonstration mißlang vollständig, denn er erhielt von allen drei Empfängern im Laufe einiger Monate Reklamationen, da Abweichungen bis zu 6°F im Bereich 0°F bis 96°F festgestellt wurden. Bei dem Versuch, Gründe für die Abweichungen zu finden, machte Fahrenheit zwei grundlegende Entdeckungen. Er fand nämlich, daß

1. die unterschiedliche thermische Ausdehnung der einzelnen Glasarten die Anzeige von Quecksilberthermometern beeinflußt, und daß
2. die Siedetemperatur von Wasser und von anderen Flüssigkeiten vom Barometerstand, also vom Druck abhängt.

Beide Phänomene wurden von Fahrenheit ausführlich untersucht.

2.5.2 Thermische Ausdehnung des Glases

Wenn die thermische Ausdehnung des Glases in die gleiche Größenordnung wie die der Thermometerflüssigkeit gerät, muß die Beziehung zwischen Flüssigkeitsdichte, Kaliber, Skalenlänge und Füllvolumen nach Gl. (3) offensichtlich modifiziert werden. Beim Quecksilber-in-Glas-Thermometer treffen diese Voraussetzungen zu. Zur Ableitung einer neuen Beziehung betrachten wir die Verteilung der Flüssigkeitsmasse m bei einem Thermometer auf der Bezugstemperatur, hier 0°C , und einem solchen, das sich einheitlich auf der Meßtemperatur t befindet.⁴⁵ Diese Beziehung lautet

$$m = \varrho_0 V_0 = \varrho_t V_0^* + \varrho_t q^* L_t^* \quad (4)$$

Es bedeuten: ϱ die Dichte der Flüssigkeit, V_0 das Volumen von Gefäß und dem Teil der Kapillare bis zur Marke Null, q den Querschnitt der Kapillare und L_t die Fadenlänge zwischen den Marken Null und t . Die Formelzeichen V_0^* , q^* und L_t^* beziehen sich auf Größen, die bei der Meßtemperatur t zu nehmen sind. Die Indizes bedeuten hier wie auch später die Celsiusstemperaturen (Ausnahme V_0^*). Die Umformung von Gl. (4) ergibt:

$$\frac{\varrho_0 V_0}{\varrho_t V_0^*} - 1 = \frac{q^* L_t^*}{V_0^*} = \frac{q L_t}{V_0} \quad (5)$$

Die rechte Teilgleichung von Gl. (5) bedeutet, daß sich das Volumen der Kapillare $q L_t$ proportional dem Gefäßvolumen V_0 ändert. Das setzt voraus, daß Gefäß und Kapillare aus der gleichen Glassorte bestehen. Das ist aber für eine haltbare Schmelzverbindung ohnehin erforderlich, wie es auch Fahrenheit feststellt (Brief Nr. 15).⁹

Die Dichte-Temperatur-Funktion von Quecksilber wird durch eine Gleichung von K. Scheel und W. Heuse von 1912 wiedergegeben,⁴⁵ die von 0°C bis 100°C gilt:

$$\varrho_0/\varrho_t = 1 + 1,8182 \cdot 10^{-4}t + 0,78 \cdot 10^{-8}t^2 \quad (6)$$

Für ein Gefäß aus Jenaer Thermometerglas 16^{III} lautet die Volumen-Temperatur-Funktion nach K. Scheel (1920)⁴⁵ zwischen 20°C und 500°C :

$$V_0^*/V_0 = 1 + 0,2334 \cdot 10^{-4}t + 0,906 \cdot 10^{-8}t^2 \quad (7)$$

⁴⁵ Vgl. z. B. F. Henning: Temperaturmessung. Leipzig: J. A. Barth 1951. 294 Seiten.

Aus den Gln. (6) und (7) errechnet sich die linke Seite von Gl. (5) für ein Quecksilberthermometer aus Jenaer Glas 16^{III} zu

$$H_t = \frac{\varrho_0 V_0}{\varrho_t V_0^*} - 1 = 1,5848 \cdot 10^{-4} t - 0,4959 \cdot 10^{-8} t^2 \quad (8)$$

Daraus berechnen sich die Werte

$$\text{für } t = 100^\circ\text{C: } H_{100} = 1,5798 \cdot 10^{-2} = 1/63,3 \quad \text{und} \quad (9a),$$

$$\text{für } t = 37^\circ\text{C: } H_{37} = 0,58569 \cdot 10^{-2} = 1/170,7 \quad (9b),$$

die wir in der von Fahrenheit gewählten Form geschrieben haben, um sie mit seinen Meßwerten später vergleichen zu können.

Die rechte Seite von Gl. (5) ist das Verhältnis des Fadenvolumens bei der Marke t zum Gefäßvolumen bei der Marke Null. Diesen Quotienten kann man auch auffassen als das Verhältnis der relativen Ausdehnung des Quecksilbers zum Anfangsvolumen in einem bestimmten Glas, so daß wir auch schreiben können

$$\left(\frac{V_t - V_0}{V_0} \right)_{\text{rel}} = \left(\frac{V_t}{V_0} \right)_{\text{rel}} - 1 = \frac{q L_t}{V_0} \quad (10).$$

Wenn wir noch V_0^*/V_0 ersetzen durch $(V_t/V_0)_{\text{Gl}}$, weil es sich hier um die absolute Ausdehnung des Glases handelt, so kann man Gl. (5) in die Form bringen:

$$\left(\frac{V_t}{V_0} \right)_{\text{Gl}} = \frac{(\varrho_0/\varrho_t)_{\text{Hg}}}{(V_t/V_0)_{\text{rel}}} = \frac{(V_t/V_0)_{\text{Hg}}}{(V_t/V_0)_{\text{rel}}} \quad (11)$$

Hieraus kann man kubische Ausdehnungskoeffizienten des Glases

$$\alpha_{\text{Gl}} = \left(\frac{V_t - V_0}{V_0 t} \right)_{\text{Gl}} = \frac{1}{t} \left(\frac{V_t}{V_0} - 1 \right)_{\text{Gl}} \quad (12)$$

berechnen, wenn die übrigen Ausdrücke in Gl. (11) bekannt sind. Davon wird später Gebrauch gemacht. Eine Gleichung von der Form der Gl. (11) hat Fahrenheit in Worten beschrieben (Brief No. 14).⁹

Die relative Ausdehnung des Quecksilbers in verschiedenen Glas-sorten ist von Fahrenheit ausführlich gemessen worden, weil er hier den Grund für die mangelnde Übereinstimmung zwischen Wein-

geist- und Quecksilberthermometern sah. Er gibt dabei den Quotienten

$$\frac{V(96^{\circ}\text{F}) - V(0^{\circ}\text{F})}{V(0^{\circ}\text{F})} = \frac{1}{g} \quad (13)$$

an. Es ist aber sehr unwahrscheinlich, daß Fahrenheit bei seinen Messungen jedesmal das System auf 0°F abgekühlt hat, zumal der Nullpunkt einer Quecksilberskala noch garnicht definiert war und jedenfalls an anderer Stelle (auf die Celsiuskala bezogen) lag als der Nullpunkt der Weingeistskala. In einem Brief an Boerhave (No. 12)⁹ schreibt er:

Ich beginne bei Null zu zählen, 32 Grad unterhalb des Punktes zwischen Tauen und Frieren, den man, wie Sie wissen, mit Wasser und Eis erhält.

Das ist so zu deuten, daß er in Wirklichkeit den Quotienten

$$\frac{V(96^{\circ}\text{F}) - V(32^{\circ}\text{F})}{V(32^{\circ}\text{F})} = \frac{V_{37} - V_0}{V_0} = \frac{1}{h} \quad (14)$$

gemessen und auf $1/g$ umgerechnet hat (die Indizes sind wieder die Celsiusstemperaturen).

Damit kommt auch zum Ausdruck, daß Fahrenheit bei der Quecksilberskala den Nullpunkt nicht mehr als Fixpunkt ansieht, sondern nur noch als berechnete Temperatur, 32 Grad seiner Skala unterhalb des Eispunkts. Wir haben Fahrenheits Meßwerte mittels der Beziehung

$$\frac{1}{h} = \frac{2}{3g + 1} \quad (15)$$

umgerechnet, um Vergleiche mit heutigen Werten bei einem einheitlichen Bezugsvolumen $V(32^{\circ}\text{F}) = V_0$ durchführen zu können.

In Tabelle 4 sind in chronologischer Reihenfolge die von Fahrenheit angegebenen Meßwerte $1/g$ nach Gl. (13) und die umgerechneten Werte $1/h$ nach Gl. (14) angegeben. Für die spätere Auswertung (vgl. Abschnitt 2.5.4) sind noch mitgeteilte Werte für die Wassersiedetemperatur in Grad Fahrenheit angegeben. Auch bei Glassorten gleicher Herkunft findet man in Tabelle 4 beträchtliche Unterschiede in der relativen Ausdehnung, die nicht nur auf Meßunsicherheiten sondern

Tabelle 4: Relative Ausdehnung von Quecksilber in verschiedenen Gläsern. Wassersiedetemperatur t'_F in °F (nach Fahrenheit).

Brief ^a No.	Datum	Herkunft des Glases	$\frac{V(96^\circ\text{F}) - V(0^\circ\text{F})}{V(0^\circ\text{F})}$	$\frac{V_{37} - V_0}{V_0}$	Wassersiedetemperatur t'_F (°F)
1	5. III. 1715	Potsdam ?	—	1/174	
5	12. XIII. 1718	Glas A	1/120	1/180,5	Wasser 212 $\frac{1}{2}$
7	23. I. 1719	Glas B ^a	1/115 $\frac{7}{8}$	1/174,3	Wasser 212–213 Regenwasser ^b (212) 205 $\frac{1}{2}$
Phil. Trans. 30 (1724) 1–3					Regenwasser 212
12	20. III. 1729	Amsterdam	1/119 $\frac{1}{16}$	1/179,1	
		Böhmen	1/110 $\frac{5}{8}$	1/166,4	Wasser 211
		England	1/116 $\frac{9}{16}$	1/175,3	
14	30. III. 1729	Böhmen ^c od. Potsdam	1/112 $\frac{5}{16}$	1/170	
		Thüringen	1/113 $\frac{1}{12}$	1/170,1	
		England	1/116 $\frac{9}{16}$	1/175,3	
		Amersfoort	1/119 $\frac{1}{16}$	1/179,1	
		Amsterdam	1/120 $\frac{15}{16}$	1/181,9	
15	17. IV. 1729				Wasser ^d 205–212
		Jena 16 ^{III}	—	1/170,7	

^a – Der Wert 1/120 wird widerrufen

^b – (212) 205 $\frac{1}{2}$ bedeutet, daß 212 widerrufen wird und 205 $\frac{1}{2}$ gültig ist

^c – Der Wert 1/110 $\frac{5}{8}$ wird widerrufen

^d – Bei Barometerstand von etwa 28–31 inches

auch auf die geänderte Zusammensetzung der Rohstoffe in den Glashütten zurückzuführen sind, wie es auch Fahrenheit beklagte.

Seine Meßwerte kommentiert er folgendermaßen (Brief Nr. 14):⁹ Je weicher ein Glas, je niedriger also sein Schmelzpunkt ist, desto stärker expandiert es. Damit verringert sich die relative Ausdehnung des Quecksilbers (siehe Gl. (11)) und man muß bei gleichem Kaliber und gleicher Skalenlänge das zylindrische Gefäß größer machen. Das sieht man unmittelbar aus Gl. (10). Zum Nachweis führt Fahrenheit folgenden Versuch aus: Er fertigt zwei Thermometer mit gleichen Maßen, das eine aus holländischem Glas und korrekt kalibriert ($1/h \approx 1/180$), das andere aus Thüringer Glas ($1/h \approx 1/170$). Beim Erwärmen steigt das Quecksilber in dem Thermometer aus Thüringer Glas höher als in jenem aus holländischem Glas. Dieses Experiment wird uns noch in Abschnitt 2.5.4 beschäftigen. Der Einfluß der Glassorten auf die Thermometeranzeige war ihm nach seinen Worten Ende 1720 klargeworden.

Läßt man gewisse Streuungen außer acht, so kann man die Glassorten der Tabelle 4 in 3 Gruppen zusammenfassen (vgl. Tab. 5). Aus Gl. (12) kann man dann den kubischen Ausdehnungskoeffizienten der Gläser α_{Gl} berechnen, wenn man die absolute Ausdehnung des Quecksilbers Gl. (6) entnimmt. Die kubischen Ausdehnungskoeffizienten stimmen gut mit heutigen Werten überein (vgl. auch⁹). Das heutige Jenaer Thermometerglas 16^{III} entspricht dem Thüringer Glas.

Tabelle 5 Gruppen von Glassorten aus Tabelle 4.
Kubischer Ausdehnungskoeffizient α_{Gl} .

	$\frac{V_{37} - V_0}{V_0}$	$10^7 \alpha_{\text{Gl}}$ in $1/\text{K}$
Potsdamer, Böhmisches oder Thüringer Glas	$\approx \frac{1}{170}$	230
Englisches Glas	$\approx \frac{1}{175}$	275
Amsterdamer und Amersfoorter Glas	$\approx \frac{1}{180}$	318
Jenaer Thermometerglas 16 ^{III}	$= \frac{1}{170,7}$	236

2.5.3 Druckabhängigkeit der Siedetemperatur

Im April 1723 veranstaltete Fahrenheit Versuche über die „Elastizität“ von Wasserdampf unter dem Einfluß verschiedener Wärmegrade (Brief Nr. 10).⁹ Die dafür angefertigte Glasapparatur zeigt Bild 10. Im rechten Zylinder ist Wasser enthalten, das vor dem Zu-

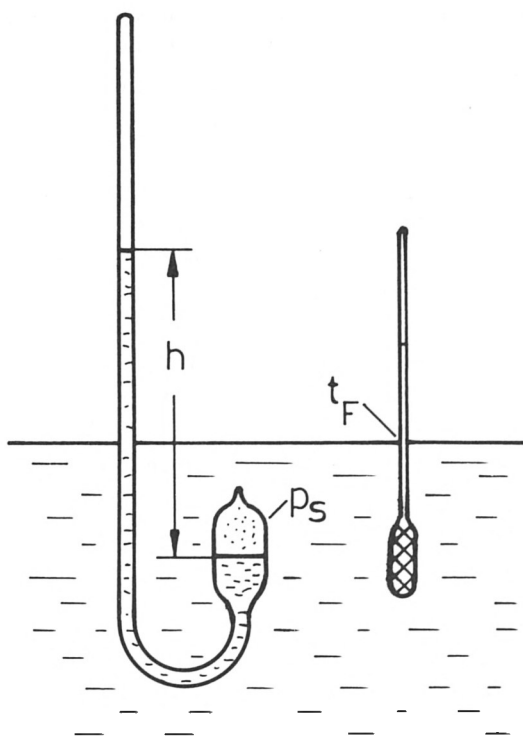


Bild 10: Apparatur zur Messung des Dampfdrucks von Wasser, 1723. Das linke Glasrohr ist 130 cm lang. Nicht maßstäblich. h Höhe der Quecksilbersäule, p_s Sättigungsdruck des Wassers, t_F Fahrenheittemperatur.

schmelzen über längere Zeit zum Sieden gebracht wurde, um die Luft auszutreiben. So wird dem Dampfdruck über der Wasseroberfläche p_s durch die Quecksilbersäule h das Gleichgewicht gehalten. Die Umgebung befand sich auf etwa 15°C. Die gemessenen Werte sind in Tabelle 6 wiedergegeben. Die Höhe h wurde in Pariser Linien angegeben (1 ligne = $\frac{1}{12}$ pouce = 2,256 mm).

Wie Tabelle 4 zeigt, könnte Fahrenheit um 1723 eine Quecksilberskala benutzt haben, bei der der Wassersiedepunkt bei etwa $205,5^{\circ}\text{F}$ gelegen hat, da er im Januar 1719 den früheren Wert von 212°F widerruft. Das würde bei der Auswertung der Dampfdruckmessungen eine Rolle spielen. Zur Prüfung dieser Frage haben wir in Bild 11 die zehn Meßpunkte der Tabelle 6 in ein t_{F}, t -Diagramm eingetragen in der Art, daß als Ordinate die von Fahrenheit angegebenen Temperaturen der Tabelle 6 benutzt wurden, den zehn gemessenen Dampf-

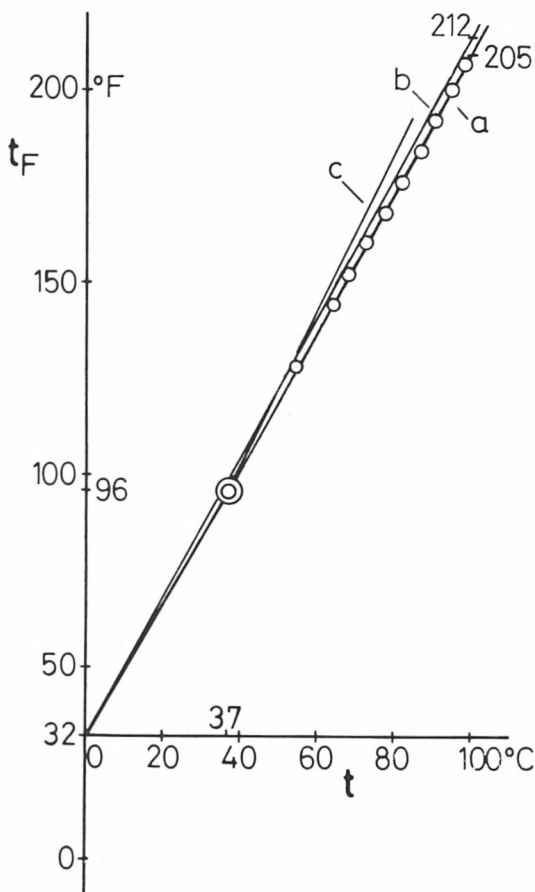


Bild 11: t_{F}, t -Diagramm mit den Dampfdruckmessungen Fahrenheits (Kreise). Gerade a für $t'_{\text{F}} = 205^{\circ}\text{F}$, Gerade b für $t'_{\text{F}} = 212^{\circ}\text{F}$, Kurve c extrapolierte Weingeistskala.

drücken aber die heutigen Celsiustemperaturen zugeordnet wurden. Die Höhen h der Quecksilbersäule wurden dazu hinsichtlich der Raumtemperatur korrigiert, d. h. mit $(\rho_{15}/\rho_0)_{\text{Hg}} = 0.997271$ multipliziert.

Tabelle 6: Fahrenheits Dampfdruckmessungen von Wasser, 1723.

t_F	h	p_s	t_s	$p_s^{1/4}$
$^{\circ}\text{F}$ (206)	lignes	mbar	$^{\circ}\text{C}$	mbar $^{1/4}$
128	$49\frac{1}{2}$	148,5	55,2	3,49
144	$80\frac{1}{4}$	240,7	64,4	3,94
152	$97\frac{1}{2}$	292,9	68,9	4,14
160	119	356,9	73,6	4,35
168	$145\frac{1}{4}$	434,9	78,2	4,57
176	176	527,9	82,8	4,79
184	$210\frac{1}{2}$	631,4	87,4	5,01
192	$249\frac{1}{3}$	747,9	91,9	5,23
200	$292\frac{1}{5}$	876,5	96,6	5,44
207	$333\frac{1}{3}$	999,8	100,6	5,62

Fahrenheit hat auch beim Quecksilberthermometer angenommen, daß das Volumen linear von der Temperatur abhängt.⁴⁶ Wie die Gln. (6) und (8) zeigen, ist das weitgehend erfüllt, da die Terme mit t^2 klein gegen die linearen Terme sind. Extrapoliert man eine Fahrenheitskala, die beim Eispunkt $32^{\circ}\text{F} \triangleq 0^{\circ}\text{C}$ und bei Körpertemperatur $96^{\circ}\text{F} \triangleq 37^{\circ}\text{C}$ anzeigt, linear auf die Wassersiedetemperatur 100°C , so erhält man für die entsprechende Fahrenheittemperatur

$$t'_F = 32^{\circ}\text{F} + 100(96 - 32)^{\circ}\text{F}/37 = 204,97^{\circ}\text{F} \approx 205^{\circ}\text{F}.$$

Die Gerade a in Bild 11 entspricht dieser Beziehung, während die Gerade b für $t'_F = 212^{\circ}\text{F}$ gilt. Die zehn Meßpunkte liegen in diesem

⁴⁶ In Brief Nr. 4⁹ diskutiert er die Möglichkeit, eine nichtlineare Skala zu verwenden, um Kaliberfehler zu kompensieren. Das scheint ihm aber gefährlich, da beim Bruch der Kapillare die Messingskala wertlos würde.

Diagramm näher an den Geraden a. Wir haben daher bei der Auswertung mit $t'_F = 206^\circ\text{F}$ gerechnet und diese Einheit in Tabelle 6 mit $^\circ\text{F}(206)$ bezeichnet. Bild 12 zeigt Fahrenheit's Meßwerte im Ver-

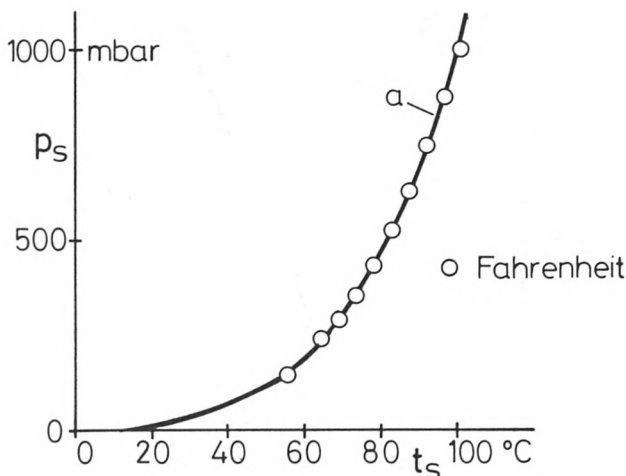


Bild 12: Fahrenheit's Dampfdruckwerte (Kreise) und heutige Dampfdruckkurve (ausgezogene Linie) im p, t -Diagramm.

gleich mit der heutigen Dampfdruckkurve im p, t -Diagramm. Die Übereinstimmung ist sehr befriedigend. Fahrenheit zeigt ferner, daß die Werte $p_s^{1/4}$ der Sättigungstemperatur t_s proportional seien, was in Bild 13 bestätigt wird.

Die Druckabhängigkeit der Siedetemperatur ist eine fundamentale thermodynamische Beziehung, die weit über die Thermometrie hinausgeht. Fahrenheit dürfte einer der ersten sein, der sich mit den thermodynamischen Eigenschaften des Wasserdampfes beschäftigt hat. Die beiden linken Spalten von Tabelle 6 sind die älteste bekannte Dampftafel.

Die Beziehung zwischen Siedetemperatur und Barometerstand ist Fahrenheit in allen Konsequenzen bewußt geworden. So schlägt er vor, Höhen von Bergen und Tiefen von Bergwerkschächten mit Hilfe von Thermometern zu bestimmen, ebenso den barometrischen Druck auf See, wo die Anwendung von Barometern wegen der Schiffsbewegungen schwierig ist. Hierzu beschreibt er^{24c} ein Hypso-

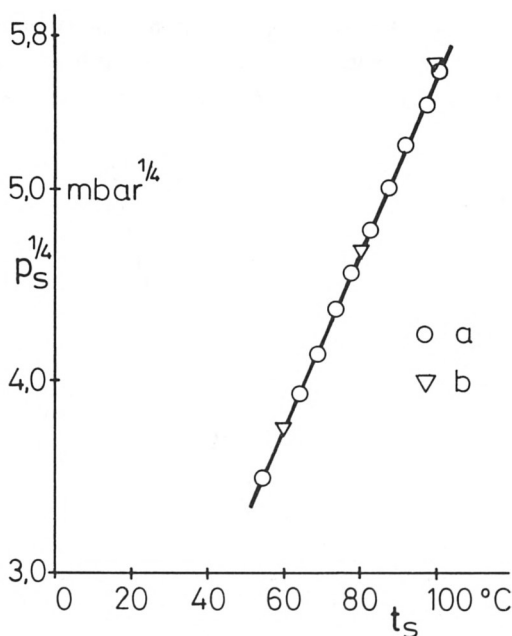


Bild 13: $p_s^{1/4}$ als Funktion der Sättigungstemperatur t_s nach Fahrenheit. Kreise Fahrenheit's Werte, Dreiecke heutige Werte.

barometer (Bild 14), das ein Quecksilberthermometer mit doppeltem Zweck ist: die untere Skala dient zur Temperaturmessung zwischen 0°F und 96°F . Taucht man das Hypsobarometer in siedendes Wasser, so zeigt die obere Skala die Siedetemperatur an. Man kann aber auch, wie in Bild 14, die Skala in „inches of Mercury“ des Barometers teilen. Es ist nicht nachgewiesen, daß ein solches Hypsobarometer auch hergestellt wurde.

2.5.4 Die Skala des Quecksilberthermometers

Daß Fahrenheit bei der Kalibrierung der Quecksilberthermometer die Fixpunkte der Weingeistskala – den Eispunkt bei 32°F und die Körpertemperatur bei 96°F – benutzt hat, ist vielfältig belegt. Er hat nur den Nullpunkt (0°F) nicht mehr als Fixpunkt angesehen (vgl. 2.5.2). Die lineare Extrapolation, die bei Quecksilber (im Gegensatz zum Weingeist) zulässig ist, führt auf die Siedetemperatur $t'_F \approx$

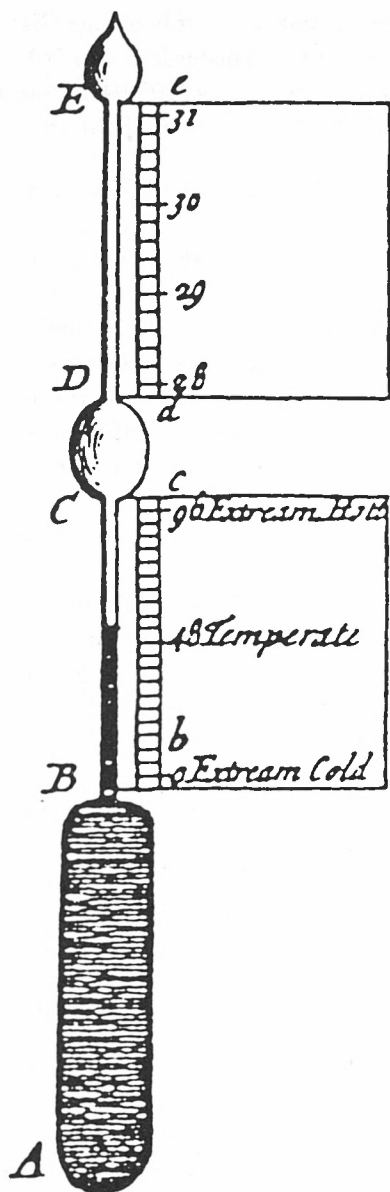


Bild 14: Hypsobarometer nach Fahrenheit, 1724.

205°F. Das gilt selbstverständlich für beliebige Glassorten. Bei einem mittleren Barometerstand in Amsterdam von 761,1 mmHg als langjährigem Mittel⁴⁷ erhält man $t'_F = 205,04^\circ\text{F}$. Ein Quecksilberthermometer aus Jenaer Glas 16^{III} ergäbe nach Gl. (8)

$$t'_F = 32^\circ\text{F} + \frac{H_{100}}{H_{37}} (96 - 32)^\circ\text{F} = 204,6^\circ\text{F} \approx 205^\circ\text{F}$$

mit H_{100} und H_{37} aus Gl. (9a u. 9b). Trotzdem gibt Fahrenheit in Tabelle 4 wiederholt Wassersiedepunkte um $t'_F = 212^\circ\text{F}$ an, dem heutigen Zahlenwert. Wie kommt das zustande?

Er unterscheidet in seinen Angaben zwischen „Wasser“ und „Regenwasser“. Allerdings können übliche Verunreinigungen den genannten Temperaturunterschied nicht erklären. Selbst bei Meerwasser als stark „verunreinigtem“ Süßwasser beträgt die Siedepunkterhöhung nur $\approx 0,28\text{ K}$.

Wenn man Fahrenheits Angaben in Tabelle 4 verfolgt, bietet sich folgende Erklärung an:

Nach der Übersiedlung nach Amsterdam begann er erneut mit der Herstellung der Quecksilberthermometer und maß hierzu die relative Ausdehnung in einem Glase A. Da zu jenem Zeitpunkt weder Fahrenheit noch sonst jemand den Einfluß der Glassorte kannte, bestanden keine Bedenken, Thermometer auch aus Glas B nach den Maßen für Glas A anzufertigen. Damit maß er eine Siedetemperatur $t'_F = 212\frac{1}{2}$, die er im Brief No. 5 mitteilte (Tabelle 4). Das wird durch folgende Rechnung belegt:

$$t'_F = \frac{120}{115\frac{7}{8}} \cdot 205,5^\circ\text{F} = 212,8^\circ\text{F},$$

wenn beide Skalen bei Fahrenheits Nullpunkt zusammenfallen, oder

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

wenn beide Skalen beim Eispunkt koinzidieren. Diesem Ergebnis entsprechen die Angaben in Brief No. 7 von 212–213°F. Von dieser

⁴⁷ Landolt-Börnstein, 6. Aufl.⁴¹ Bd. III, S. 612, Springer: Berlin 1952. Die Angabe gilt für Utrecht.

Serie scheint Fahrenheit drei Thermometer an seine Freunde – zusammen mit je einem Weingeistthermometer – zur Prüfung verschickt zu haben (vgl. 2.5.1).

Diese Thermometer zeigten eine Körpertemperatur von etwa $98,6^{\circ}\text{F}$ statt der erwarteten 96°F an. Offenbar hat Fahrenheit diese Unstimmigkeit sehr rasch bemerkt, denn schon nach wenigen Wochen teilte er die neue relative Ausdehnung⁴⁸ (diesmal des wirklich verwendeten Glases B) mit und den neuen Siedepunkt $205,5^{\circ}\text{F}$ anstatt 212°F . Die Angabe 212–213 im selben Brief dürfte aus einer älteren Tabelle stammen.

Der oben geschilderte Vorgang entspricht genau dem Experiment mit Thüringer und holländischem Glas, das Fahrenheit im Brief No. 14⁹ mitteilt (vgl. 2.5.2). Daß die drei an seine Freunde verschickten Thermometer aus der Serie mit $t'_{\text{F}} \approx 212^{\circ}\text{F}$ stammten, geht daraus hervor, daß Abweichungen zwischen Weingeist- und Quecksilberthermometern bis 6°F zwischen 0°F und 96°F beobachtet wurden (vgl. 2.5.1). Aus Bild 8 ist eine solche Differenz zwischen Kurve *a* und der Geraden *c* abzulesen. Später teilt Fahrenheit in Brief Nr. 15⁹ von 1729 Beobachtungen mit, wonach Weingeist- und Quecksilberthermometer zwischen 64°F und 96°F übereinstimmen, zwischen 36°F und 64°F das Weingeistthermometer aber weniger anzeigte. Das stimmt mit der Differenz zwischen Kurve *a* und Geraden *b* in Bild 8 näherungsweise überein und würde bedeuten, daß hier ein auch bei 96°F kalibriertes Quecksilberthermometer verwendet wurde, also eines mit $t'_{\text{F}} \approx 205^{\circ}\text{F}$. Daß dann (nach Fahrenheit) die Differenzen ab 16 Grad über 96°F beginnen, ist aus Bild 11 aus der Differenz zwischen der Geraden *a* und der Kurve *c* zu entnehmen. Prinzipiell können Weingeist- und Quecksilberthermometer nicht übereinstimmen, da sie zwei verschiedene empirische Temperaturen definieren, außer bei den gemeinsamen Fixpunkten, an denen sie kalibriert sind. Aber die Unterschiede sind klein, wie Bild 8 zeigt,

⁴⁸ Der Brieftext lautet: Es ist daher nützlich, Sie zu informieren, daß ich gefunden habe, daß die Expansion von Quecksilber nicht $1/120$, sondern $1/115\frac{7}{8}$ beträgt (...). Wegen der geänderten Proportion im Quecksilberthermometer müssen die mitgeteilten Werte der Siedepunkte von Flüssigkeiten geändert oder reduziert werden (...). Die Zahlen in Klammern gelten für die alten Werte und die anderen sind die reduzierten Werte, wie sie jetzt gelten (Brief Nr. 7).⁹

und wären den Freunden vielleicht entgangen, wenn Fahrenheit nicht die Glassorte gewechselt hätte.

So hat es den Anschein, daß Fahrenheit mindestens im Jahrzehnt von 1719 bis 1729 Quecksilberthermometer mit zwei verschiedenen Skalen herstellte. Die Fixpunkte der einen waren der Eispunkt mit 32°F und die Körpertemperatur bei 96°F . Der Wassersiedepunkt lag hier bei $t'_{\text{F}} \approx 205^{\circ}\text{F}$. Diese Skala galt mit großer Wahrscheinlichkeit insbesondere für jene Thermometer, die nur bis etwa 96°F reichten, also für meteorologische Zwecke bestimmt waren.⁴⁹ Für wissenschaftliche Beobachtungen, insbesondere an Siedevorgängen, stellte Fahrenheit Thermometer mit längerer Skala her, bei denen der Wassersiedepunkt bei $t'_{\text{F}} \approx 212^{\circ}\text{F}$ lag. Die Körpertemperatur verlor ihre Bedeutung als Fixpunkttemperatur. Der Eispunkt blieb unverändert bei 32°F .

Es bleibt noch der Einfluß des Barometerstandes auf die Gestaltung der Skalen zu besprechen. Fahrenheit gibt im Brief Nr. 13⁹ aus dem Jahre 1729 eine Differenz von 8 bis 9°F für den Wassersiedepunkt bei Barometerständen von 29 bis 31 engl. inches an. Später (Brief Nr. 15)⁹ reduziert er diese Differenz auf 6 bis $6,5^{\circ}\text{F}$ für Barometerstände zwischen 28 und 31 engl. inches und bittet Boerhave, in seinem Lehrbuch der Chemie,²⁰ für das Fahrenheit experimentelle Beiträge liefert, nur eine Differenz von einigen Graden ohne genaue Festlegung zu erwähnen.

Die Neigung der Dampfdruckkurve bei 100°C beträgt

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

Die zweite Angabe von Fahrenheit mit

$$\frac{\Delta p}{\Delta T} = \frac{3 \text{ inHg}}{6,25^{\circ}\text{F}} \approx 29 \frac{\text{mbar}}{\text{K}}$$

stimmt mit unserem Werte einigermaßen überein. Der Barometerstand b in Amsterdam würde nach Fahrenheits Angaben

⁴⁹ Im Deutschen Museum, München, befindet sich ein Quecksilberthermometer mit zylindrischem Gefäß und Messingskala nach Fahrenheit, geteilt nach 0,4,8,12 . . . 96. Es dürfte sich um einen späteren Nachbau eines von Fahrenheit gefertigten Thermometers handeln.

$$b = (29,5 \pm 1,5) \text{ inHg} \approx (749,3 \pm 38) \text{ mmHg} \approx (999 \pm 51) \text{ mbar}$$

betragen, was sowohl wegen des Mittelwertes als auch des Bereichs nicht wahrscheinlich ist. Mit dem früher erwähnten Mittelwert⁴⁷ und einem angemessenen Bereich erhält man

$$b = (761,1 \pm 25) \text{ mmHg} = (1047,7 \pm 33) \text{ mbar}$$

und daraus die Siedetemperatur von Wasser für Amsterdam

$$t_s = (100,04 \pm 0,9)^\circ\text{C}.$$

Dem würden die beiden Fahrenheittemperaturen

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

entsprechen. So ist es sowohl vom Mittelwert wie vom Bereich her nicht möglich, die Differenz der Siedepunkttemperaturen nach Fahrenheit durch den schwankenden Barometerstand zu erklären, denn dazu müßte der unrealistische Wert

$$t'_F = (208,5 \pm 3,5)^\circ\text{F}$$

nachweisbar sein, der sich aber nicht belegen läßt.

Die Weiterentwicklung der Quecksilberskala durch Fahrenheit läßt sich durch Zitate aus Brief No. 15⁹ nachweisen, in dem er schreibt:

Es gibt keinen besser bestimmten Punkt als den von zerstoßnem Eis, dessen Zwischenräume mit Süßwasser aufgefüllt sind, oder den von siedendem Wasser, sofern der Atmosphärendruck berücksichtigt wurde. Dann kann man immer den 96. Grad mathematisch berücksichtigen, wie ich es gemacht habe.

Das bedeutet, daß er, wie schon erwähnt, die Körpertemperatur als Fixpunkt für die Thermometer, die t'_F enthielten, aufgegeben hat. Für die nur bis 96°F reichenden Quecksilberthermometer dürfte er aber weiter die Körpertemperatur zur Kalibrierung beibehalten haben.

Aus einem weiteren Zitat⁵⁰ im selben Brief (Nr. 15) kann man

⁵⁰ Aus Brief Nr. 15⁹: Wenn ich zum Beispiel wünschte, daß ein Interessent, dem ich kein Thermometer aus der eigenen Werkstatt übersenden kann, sich ein Thermometer

ähnliche Folgerungen ziehen. Es ist hierzu anzumerken, daß eine Kalibrierung mit gleitender Siedetemperatur, wie Fahrenheit⁵⁰ sie vorschlägt, zu korrekten Skalen führt, sofern eine eindeutige Dampfdruckbeziehung vorliegt. Das Problem spielt offenbar auch bei der Thermometrie des 19. Jahrhunderts noch eine Rolle. Ein um diese Zeit in München angefertigtes Thermometer⁵¹ trägt die Inschrift

Siedepunkt bey 26°6''' Barom. Stand Par. M.,

was einem Druck von $\approx 715 \text{ mmHg} = 953 \text{ mbar}$ entspricht, dem mittleren lokalen Atmosphärendruck von München.

Im Jahre 1777 berief die Royal Society of London ein Komitee unter der Leitung von Henry Cavendish,⁵² um den Siedepunkt von Wasser als Fixpunkt festzulegen. Es wurde bestimmt, daß die Temperatur siedenden Wassers 212°F beim Druck von 29,8 inches ($\approx 756,9 \text{ mmHg}$) beträgt.

Als 1845 die britische Längeneinheit, das „imperial yard“ neu festgelegt wurde, definierte man diese Länge durch den Abstand zweier Strichmarken auf einem Maßkörper, dem Imperial Standard Yard, „at the temperature of sixty-two degrees of Fahrenheit's thermometer“. Das dürfte die älteste Erwähnung eines Fahrenheit-Thermometers in einer gesetzlichen Vorschrift sein.⁵³

Unsere Betrachtungen zu Fahrenheits Quecksilberthermometern können wir wie folgt zusammenfassen:

mache, das mit meinem übereinstimmt, würde ich ihm vorschlagen, sich selbst ein Quecksilber-Thermometer anzufertigen, dessen Röhrchen überall gleichmäßig und dessen Gefäß nicht zu groß ist. Da ich die Ausdehnung seines Glases nicht kenne, würde ich ihm raten, die Werte von Potsdamer Glas zu nehmen. Wenn er dann das Thermometer aus einer Mischung von Wasser und Eis in kochendes Wasser steckt (unter Beobachtung des Atmosphärendrucks zur Versuchszeit), hat er diese Strecke in 173 bis 180 Grad [im Originaltext versehentlich 205 bis 212 Grad] zu teilen und weitere 32 Grad unterhalb des Eispunkts anzutragen, um ein Thermometer zu haben, das im ganzen Temperaturbereich mit meinem übereinstimmt.

⁵¹ Es handelt sich um ein Quecksilberthermometer mit Messingskala, 89cm lang, nach Celsius und Réaumur geteilt, Meßbereich -50°C bis $+100^{\circ}\text{C}$, mit Kugel, hergestellt von P. Rath, München, nach Schätzung um 1810 bis 1820. Deutsches Museum, München.

⁵² H. Cavendish: Phil. Trans. 67 (1777) 816–857 (zitiert nach⁹).

⁵³ U.Stille: Messen und Rechnen in der Physik 2. Aufl. Braunschweig: Vieweg 1861. S. 50.

1. Quecksilberthermometer hatte Fahrenheit in Berlin um 1713/14 versuchsweise hergestellt, ab 1717 in Amsterdam gewerbsmäßig. Er behielt zunächst die beiden Fixpunkte der Weingeistskala bei, den Eispunkt bei 32°F und die Körpertemperatur bei 96°F . Den Skalennullpunkt betrachtete er nicht mehr als Fixpunkt.
2. Bei einer solchen Skala wäre die Wassersiedetemperatur $t'_{\text{F}} \approx 205^{\circ}\text{F}$. Vermutlich infolge eines Wechsels in der Glassorte, hervorgerufen durch den Ortswechsel von Berlin nach Amsterdam, maß er $t'_{\text{F}} \approx 212^{\circ}\text{F}$, einen Wert, den er zwar bald auf $205,5^{\circ}\text{F}$ korrigierte, trotzdem aber auf die Dauer beibehielt. Die Körpertemperatur war spätestens ab 1729 nicht mehr Fixpunkttemperatur. Er benutzte nur noch Eispunkt und Dampfunkt als Fixpunkte. Eine Ausnahme bildeten die Thermometer bis 96°F .
3. In dem Bemühen, Anzeigedifferenzen zwischen Weingeist- und Quecksilberthermometer aufzuklären, entdeckte er den Einfluß der Glassorte auf die Anzeige und die Druckabhängigkeit der Siedetemperatur. Er stellte eine Dampf tafel für den Sättigungszustand mit 10 Meßpunkten zwischen 50°C und 100°C auf.

2.6 Abschließende Bemerkungen

1. Fahrenheits Verdienst um die Thermometrie besteht darin, daß er von Anfang an seine Thermometerskalen nur durch reproduzierbare Fixpunkte definiert. Dieses Arbeitsprinzip muß er schon in jungen Jahren – mit 20 oder 21 – gefunden haben. Obwohl andere es vor ihm verwendeten (Newton, Amontons), war es wenig verbreitet. Wahrscheinlich war Fahrenheit der erste professionelle Thermometermacher, der es konsequent anwendete.
2. So konnte Fahrenheit „korrespondierende Wettergläser“ herstellen und dadurch einer langdauernden Konfusion bei der Temperaturmessung ein Ende bereiten. Auch ein Experte wie Christian Wolff erkannte zwar die Bedeutung dieser Korrespondenz, fand aber den Kunstgriff (das „artificium“) nicht, den Fahrenheit erst 1724 bekanntgab.
3. Seine Thermometer, die denen seiner Konkurrenten überlegen waren, verbreiteten sich rasch und mit ihnen – als Nebenprodukt – seine Skala. Die Gradzahlen der Fixpunkte (32 für den Eispunkt und 212 für den Dampfunkt) beruhen auf reinem Zu-

fall. Die Ernennung zum Fellow of the Royal Society hatte zur Folge, 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; so die Dichte, die Siedetemperatur, die thermische Ausdehnung – auch relativ zu Gläsern –, die er für viele Stoffe durchführte und in Tabellen bekanntgab. Wichtige Entdeckungen waren die Unterkühlung von Wasser beim Gefrieren und die Druckabhängigkeit der Siedetemperatur. Er stellte die erste Dampftafel auf.
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 Pionier der exakten Thermometrie bezeichnen können.