

Das Newtonsche Abkühlungsgesetz

Bemerkungen zu einer Arbeit von Isaac Newton
aus dem Jahre 1701

Von **Ulrich Grigull**, München

In den Philosophical Transactions [1]¹⁾ erschien 1701 eine Mitteilung Newton's unter dem Titel „Scala Graduum Caloris“, die aus mehreren Gründen unsere Beachtung verdient. Vermutlich wurden hier zum erstenmal Temperaturmessungen wiedergegeben, die wesentlich über 100°C hinausgingen, nämlich bis zu Temperaturen von etwa 600°C in der heutigen Celsiuskala. Diese Messungen wurden bis zum Erstarungspunkt von Zinn (232°C) mit einem Leinölthermometer durchgeführt, für höhere Temperaturen wurde ein Instrument benutzt, das wir „Abkühlungsthermometer“ nennen wollen. Die Theorie dieses Instruments enthält das sogenannte Newtonsche Abkühlungsgesetz (Newton's Law oder Newton's Law of Cooling), das noch heute unverändert angewendet wird. So ist die genannte Arbeit auch die älteste nachweisbare quantitative Behandlung eines Problems der Wärmeübertragung. Das allein könnte Grund genug sein, sich mit dieser Arbeit erneut zu beschäftigen, zumal sie im Schrifttum wenig Beachtung fand [2]. Eine quantitative Interpretation scheint es bisher nicht zu geben.

Aus überlieferten Notizen können wir schließen, daß die Arbeit in den Jahren 1692/93 entstanden ist [2]. Newton war um diese Zeit Professor am Trinity College an der Universität Cambridge. Die Messungen dürften daher in seinem dortigen Laboratorium durchgeführt sein. Diese Jahre fallen zwischen die Erscheinungsdaten zweier seiner berühmtesten Werke. Die „Philosophiae naturalis principia mathematica“, kurz „Principia“ genannt, waren 1686 erschienen, sein zweites bedeutendes Werk, die „Opticks“, wurde 1704 veröffentlicht. Seit 1696 lebte er in London, da er einen Posten als Aufseher, später als Direktor bei der staatlichen Münze angenommen hatte. Den Lehrstuhl in Cambridge behielt er bis 1701. Seit 1703 war er Präsident der Royal Society. Newton starb im Jahre 1727.

Zu diesen biographischen Notizen gehörte auch eine Bemerkung über das Motiv Newtons, sich zwischen Mechanik und Optik mit Thermodynamik, speziell mit Thermometrie, zu beschäftigen. Diese Frage ist nicht leicht zu beantworten, wir werden am Ende dieses Berichts darauf zurückkommen.

¹⁾ Das Original ist in Anhang 1, die Übersetzung in Anhang 2 beigefügt.

Die Newtonsche Temperaturskala

Wie das Faksimile der Newtonschen Mitteilung im Anhang zeigt, beginnt sie mit einer mehrseitigen Tabelle, in deren rechter Spalte Phänomene mit gleichbleibenden Temperaturen beschrieben werden, die wir heute Fixpunkte nennen würden, und deren Temperaturen in den beiden linken Spalten in Zahlen angegeben sind, in arithmetischer Progression ganz links, in geometrischer Progression in der mittleren Spalte. Diese Tabelle mutet uns sehr modern an, denn sie enthält alle Elemente heutiger praktischer Temperaturskalen.

Nach heutiger Auffassung gibt es eine und nur eine Temperatur, die thermodynamische, die nach den Gesetzen der Thermodynamik definiert ist und die prinzipiell mit einem Gasthermometer verwirklicht werden kann. Wegen der schwierigen Handhabung dieses Instruments hat man die „Internationale Praktische Temperaturskala“ [3] eingeführt, die die thermodynamische Temperatur nach dem Stande der Meßtechnik bestmöglich annähert. Sie besteht, wie auch die Newtonsche Temperaturskala, aus einer Tabelle von Fixpunkten mit Temperaturangaben und einer Meßvorschrift zur Interpolation.

Zur deutlichen Unterscheidung der verschiedenen Begriffe führen wir eine neue Größe und eine neue Einheit ein, nämlich die Newton-Temperatur t_N und den Grad Newton ($^{\circ}N$).

Unter Newton-Temperatur verstehen wir jene Temperatur, die ein von Newton benutztes Instrument anzeigt, und die nach seiner Interpretation die wahre Temperatur ist. Newton kalibriert seine Instrumente nicht an einem Normalinstrument, seine Experimente definieren vielmehr die Temperatur. Eigentlich hätten wir zwei Newton-Temperaturen einführen müssen, eine für das Leinölthermometer und eine für das Abkühlungsthermometer. Da im Überdeckungsbereich beide Skalen übereinstimmen, wie Newton ausdrücklich feststellt, kommen wir mit einer neuen Größe aus.

Diese Newton-Temperatur gehört nach heutiger Auffassung zu den empirischen Temperaturen, die durch ein Meßgerät definiert werden. Hierzu gehören auch die Temperaturen der Internationalen Praktischen Temperaturskala. Diese empirischen Temperaturen werden als Annäherung an die thermodynamische Temperatur betrachtet.

Mit der Einheit Grad Newton (Einheitenzeichen $^{\circ}N$) belegen wir jene Zahlen, die in arithmetischer Progression in der linken Spalte der Newtonschen Temperaturskala aufgeführt sind.

Der Nullpunkt der Skala bei der Temperatur gefrierenden Wassers liegt demnach bei $t_N = 0^{\circ}N$, die Temperatur des menschlichen Körpers bei $t_N = 12^{\circ}N$. Diese beiden Zahlenwerte bestimmen zugleich die Temperaturen der beiden definierenden Fixpunkte der Skala, wie sie für ein Flüssigkeitsthermometer notwendig sind.

Bezeichnen wir die Zahlen der mittleren Spalte der Skala mit n , so gilt folgende Beziehung:

$$t_N/^{\circ}N = 12 \cdot 2^{n-1} \quad (1)$$

Der Wert der Newton-Temperatur verdoppelt sich also bei Zunahme der Zahl n um Eins.

Mit Hilfe der beiden Thermometer hat Newton zu jedem Fixpunkt die zugehörige Temperatur bestimmt. Die höchste Temperatur ist jene eines Küchenfeuers, das mit einem Blasebalg angefacht wird; sie beträgt $t_N = 210^\circ\text{N}$.

Wir erwarten eine lineare Beziehung zwischen der Newton-Temperatur t_N und der Celsius-Temperatur t . Etwaige Unterschiede zwischen den beiden Skalen könnten am ehesten durch Temperatureinflüsse entstehen, die bei niederen Temperaturen zu vernachlässigen sind. Es ist danach konsequent (und entspricht dem Vorgehen Newtons bei der Definition seiner Fixpunkte) anzunehmen, daß bei der Eispunkttemperatur und bei der Körpertemperatur kein Unterschied zwischen beiden Skalen besteht, daß also dort $t_N = t$ gilt.

Damit erhalten wir

$$\begin{aligned} &\text{für die Eispunkttemperatur } t_N = 0^\circ\text{N} = 0^\circ\text{C}, \text{ und} \\ &\text{für die Körpertemperatur } t_N = 12^\circ\text{N} = 37^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

Daraus ergibt sich die Umrechnungsbeziehung

$$1^\circ\text{N} = 3,08^\circ\text{C} \quad (2)$$

Es sei noch erwähnt, daß Newton das Wort calor sowohl für Wärme als auch für Enthalpie und für Temperatur verwendet, weil zu jener Zeit zwischen diesen drei Größen nicht deutlich unterschieden wurde. Die Verständlichkeit der Arbeit leidet darunter nicht.

Die von Newton angegebenen Fixpunkte sind zum Teil nicht oder nur schlecht reproduzierbar. Daneben verwendet er außer den schon genannten definierenden Fixpunkten noch den Wassersiedepunkt (Dampfpunkt), ferner 18 Schmelz- oder Erstarrungspunkte von Metallen und Metallegierungen, die in Tabelle 1 zusammengestellt und dort mit den Buchstaben A bis V in Richtung steigender Temperatur bezeichnet sind. Es handelt sich um die Metalle Blei (Pb), Zinn (Sn), Wismut (Bi) und Regulus Martis. Auf die Bedeutung des zuletzt genannten Metalls wird noch einzugehen sein. Tabelle 1 enthält auch Angaben darüber, ob es sich um einen Schmelzpunkt (Sm) oder einen Erstarrungspunkt (E) handelt, ferner sind die Massenanteile der Legierungsbestandteile eingetragen. Die zugehörigen Newton-Temperaturen sind in $^\circ\text{N}$ und nach Gl. (2) in $^\circ\text{C}$ angegeben, außerdem die Zahl n der geometrischen Skala. Zusätzlich enthält Tabelle 1 das von Newton gebrauchte entscheidende Verb zur Kennzeichnung des Phasenwechsels, da er für das Schmelzen wie für das Erstarren je zwei Vokabeln verwendet. Ein Bedeutungsunterschied war allerdings nicht erkennbar.

Die Frage, ob der Schmelzpunkt oder der Erstarrungspunkt für Präzisionsmessungen geeigneter ist, hat bis heute ihre Bedeutung nicht verloren. Zwar kennt die Thermodynamik nur eine Gleichgewichtstemperatur zwischen zwei Phasen, wir wissen aber auch, daß beim Übergang von der Phase geringeren Ordnungsgrades (hier der Schmelze) zur Phase höheren Ordnungsgrades (hier des Kristalls) Unterkühlungen auftreten können, die bei reinen Metallen bis zu 10 oder 20 K ausmachen. Die Generalkonferenz für Maß und Gewicht [3] empfiehlt, den Erstarrungsvorgang

Tabelle 1
Reproduzierbare Fixpunkte

Verbum bei Newton	Bez.	Sm od. E	Blei	Zinn	Wis- mut	Re- gu- lus	t _N	n	t _N	t	Bemerkungen
							°N		°C	°C	
	A		Eispunkt				0		0	0	
	B		Körpertemperatur				12	1	37	37	
	C		Dampfpunkt				33		101,6	100	
defervendo rigescit	D	E	2	3	5		34	2 ^{1/2}	105	105	bei heftigem Sieden bis zu 34 ^{1/2} °N.
incalescendo liquescit	E	Sm	1	4	5		40 ^{4/11}	2 ^{3/4}	124	135	Calor minimus
defervendo coagulatur	F	E		1	1		47		145	151	Calor minimus
liquescit		Sm		1	1		48	3	148	151	
funditur	G	Sm		2	1		57	3 ^{1/4}	176	184	
ds.	H	Sm	2	3			57		176	187	
defervendo rigescit	I	E		5	2		57		176	195	
ds.	K	E	1		1		57		176	153	?
funditur	L	Sm		8	1		68	3 ^{1/2}	209	218	
rigescit	M	E		1			70		216	232	Zinn
funditur		Sm		1			71		219	232	Ende der Leinölskala
funditur	N	Sm			1		81	3 ^{3/4}	249	271	Wismut
ds.	O	Sm	4	1			81		249	273	
rigescit	P	E	5	1			81		249	282	
defervendo rigescit	Q	E	1				95		293	327	Blei
funditur		Sm	1				96	4	296	327	Calor minimus (96 bis 97)
liquescit	R	Sm		1		1	114	4 ^{1/4}	351	420	
defervendo rigescit	S	E			7	4	114		351	469	
ds.	T	E			1	2	136	4 ^{1/2}	419	561	
ds.	U	E		1		5	136		419	587	
rigescit	V	E				1	146		450	631	Regulus per se.

zur Messung zu verwenden, nachdem man das Zusammenbrechen der Unterkühlung abgewartet hat. Bei den Meßpunkten F, M und Q in Tabelle 1 liegen die Erstarrungstemperaturen deutlich unter den Schmelztemperaturen, so daß hier möglicherweise Unterkühlung eingetreten ist.

Die Celsius-Temperaturen der 18 Fixpunkte aus Tabelle 1, also die heute für richtig angesehenen Gleichgewichtstemperaturen, wurden aus Zustandsdiagrammen des betreffenden Systems entnommen.

Bild 1 zeigt die Lage von 13 Fixpunkten des Systems Blei–Zinn–Wismut in einem Dreiecksdiagramm aus dem „Gmelin“ [4]. Nur die Punkte D und E gehören zum ternären System, die übrigen zu den binären Gemischen oder zu den reinen Komponenten. Entsprechende Diagramme für die vorkommenden Systeme liegen vor. Die

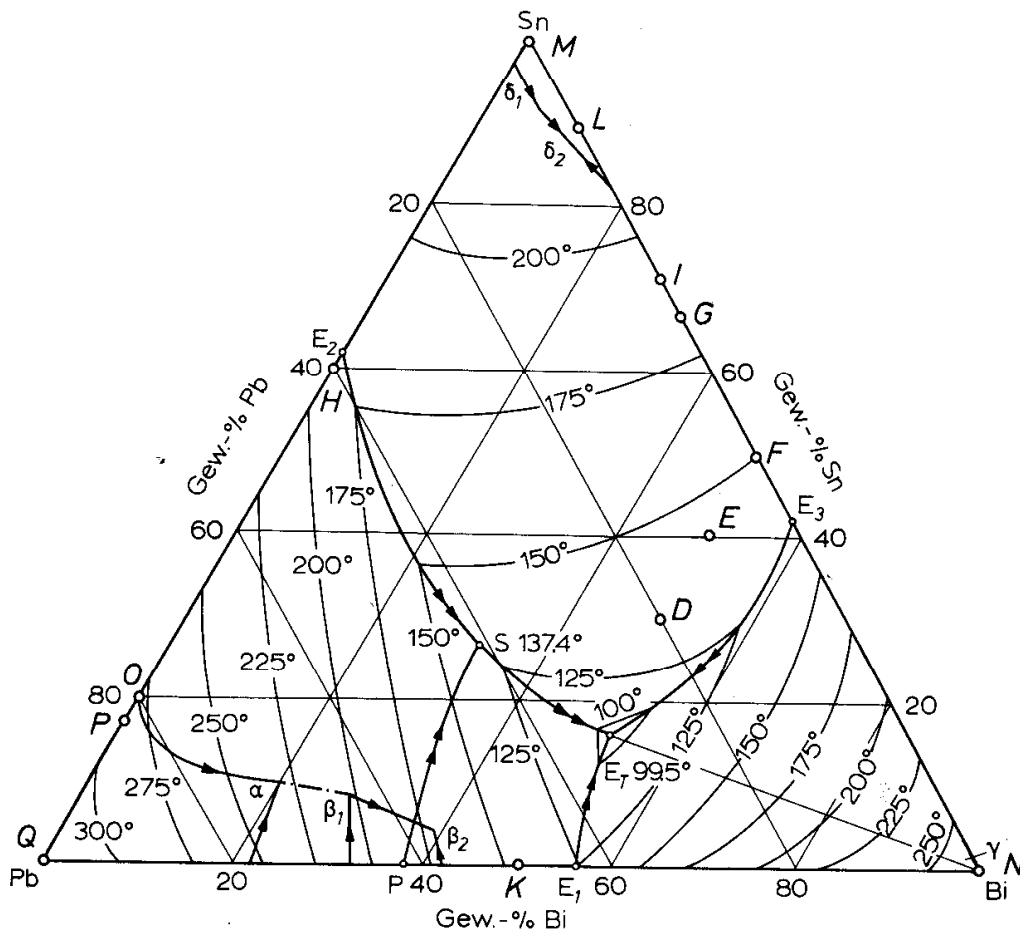


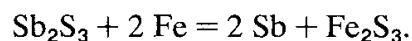
Bild 1:

Lage von 13 Fixpunkten der Newtonschen Skala im Zustandsdiagramm Pb – Sn – Bi.

zum Fixpunkt D in Bild 1 gehörige Temperatur kann kaum richtig sein. Gemäß Tabellenwerten von Systemen ähnlicher Zusammensetzung [5] liegt die Erstarrungstemperatur in der Nähe von 100°C , so daß der Wert $t = 105^{\circ}\text{C}$ nicht unwahrscheinlich ist.

Die Bedeutung von Regulus Martis wird aus der Bezeichnungsweise der Alchemie verständlich. Regulus (der kleine König) ist das reine aus dem Erz gewonnene Metall.

Insbesondere gilt das für Regulus Antimonii, das metallische Antimon. Der Name Antimon galt früher für das Erz Antimonsulfid Sb_2S_3 , das auch Spießglanz, Spießglas, Antimonit oder Stibnit genannt wurde. Zur Reduktion des Stibnits zu metallischem Antimon kann man organische Reduktionsmittel verwenden, aber auch ein weiteres Metall, z. B. Eisen. Darauf bezieht sich der Name Mars, der als Analogon für Eisen steht (so wie Sonne für Gold, Luna für Silber, Venus für Kupfer, Jupiter für Zinn usw.). Wir können also unter Regulus Martis, der an anderer Stelle auch Regulus Martialis genannt wird, metallisches Antimon verstehen, das mit Zusatz von Eisen aus Antimonsulfid gewonnen wurde [4,6]. Die Reaktion verläuft nach der Gleichung



Im Sinne dieser Erklärung wurde in Tabelle 1 für Regulus Martis reines Antimon (Stibium, Sb) mit einem Erstarrungspunkt von 631°C eingesetzt (Fixpunkt V). Die Erstarrungstemperaturen für die Punkte R bis U wurden wiederum dem entsprechenden Band des „Gmelin“ entnommen [4]. Antimonsulfid, das hier nicht gemeint ist, hat einen Erstarrungspunkt von 546°C .

Wie Tabelle 1 zeigt, liegen die Celsius-Temperaturen über den Newton-Temperaturen, mit Ausnahme der Temperatur des Dampfpunkts. Es muß also Gründe dafür geben, daß die Newtonschen Instrumente eine zu kleine Anzeige ergaben. Darauf wird in den nächsten beiden Abschnitten eingegangen.

Das Leinölthermometer

Flüssigkeitsthermometer sind seit der Mitte des 17. Jahrhunderts bekannt, insbesondere als „Florentiner Thermometer“, die man dem Großherzog von Toscana, Ferdinand II., zuschreibt, und die auch in der Academia del Cimento zu Experimenten verwendet wurden [7,8]. Sie waren zunächst mit Wasser, später mit Weingeist gefüllt. Hinsichtlich der Skalen und ihrer Fixpunkte herrschte im 17. Jahrhundert und später eine beträchtliche Verwirrung, vor allem wohl auch deswegen, weil der Ausdehnungskoeffizient von Weingeist stark vom Wassergehalt abhängt, der aber meist nicht angegeben wurde. Lambert [9] berichtet noch 1779, daß 19 verschiedene Skalen im Gebrauch waren, darunter allein drei von Réaumur. Die Quecksilberthermometer von Fahrenheit (seit 1724) stellten einen echten Fortschritt dar.

Für die Arbeit von Newton sind zwei Feststellungen wichtig:

- Eispunkt und Dampfpunkt wurden schon 1665 von Christiaan Huygens als definierende Fixpunkte einer Skala vorgeschlagen;
- als Thermometerflüssigkeiten waren bisher offensichtlich nur Wasser und Weingeist im Gebrauch, nicht aber Leinöl als höhersiedende Substanz (Siedepunkt etwa 316°C). Quecksilber wurde erst nach Newton verwendet.

Wie das Leinölthermometer von Newton ausgesehen hat, wissen wir nicht genau. Man kann aber annehmen, daß es die Form der Florentiner Thermometer gehabt hat, die nach einer Beschreibung von Réaumur [10] aus einer Kapillare mit angeblasener Glaskugel bestanden. Newton maß mit diesem Instrument seine, die Newton-Temperaturen, vom Eispunkt bis zum Schmelzpunkt von Zinn, also bis 232°C , indem er die Newton-Temperatur dem Volumen des Leinöls proportional setzte. Die von ihm angegebenen Volumina des Leinöls sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Dem Volumen beim Eispunkt V_0 gab er den willkürlichen Wert $V_0 = 10.000$. Zum Volumen bei der Körpertemperatur $t_N = 12^{\circ}\text{N} = 37^{\circ}\text{C}$ gehörte der Wert $V_N = 10.256$, so daß nach Newtons Definition die Beziehung

$$t_N = \frac{V_N - V_0}{V_{12} - V_0} 12^{\circ}\text{N} = \frac{V_N - V_0}{V_{37} - V_0} 37^{\circ}\text{C} \quad (3)$$

gelten muß, wenn V_N das beobachtete Volumen bei der Temperatur t_N (in $^{\circ}\text{N}$ oder

in °C) bedeutet. Definiert man in der üblichen Weise einen (Newtonschen) Ausdehnungskoeffizienten β_N , so wird dieser

$$\beta_N = \frac{V_N - V_0}{V_0 \cdot t_N} = \frac{V_{12} - V_0}{V_0 \cdot 12^\circ\text{N}} = 2133 \cdot 10^{-6} (\text{°N})^{-1} = 692 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}, \quad (4)$$

so daß man für die Newton-Temperatur auch schreiben kann

$$t_N = \frac{V_N - V_0}{V_0 \cdot \beta_N} \quad (5)$$

Durch die Angabe der Volumina (an Stelle von Skalenteilen) wird die Unsicherheit beseitigt, die durch etwaige Ungleichheiten im Durchmesser der Kapillare entsteht.

Tabelle 2
Gemessene Volumina des Leinöls (in konventionellen Einheiten)

Bez.	Benennung	V_N	t_N	t_N	t	
			°N	°C	°C	
A	Eispunkt	10.000	0	0	0	
B	Körpertemperatur	10.256	12	37	37	
C	Dampfpunkt	10.705	33	101,6	100	
D	heftiges Sieden	10.725	34	105	105	
M	{	Zinn, vollständiges Erstarren	11.496	70	216	
		Zinn, Beginn der Erstarrung, Schmelzen	11.516	71 (72)	219	232

Für die Erstarrungstemperatur von Zinn ergibt sich in Tabelle 2 der Wert $t_N = 71^\circ\text{N}$, während in der Originalarbeit der Wert 72 steht. Wir haben im folgenden, wie auch schon in Tabelle 1, mit dem Wert 71 gerechnet.

Die Messungen von Newton wären exakt unter zwei Voraussetzungen:

1. das Leinöl müßte einen konstanten, von der Temperatur unabhängigen Ausdehnungskoeffizienten besitzen,
2. das Leinölthermometer müßte vollständig in die Meßflüssigkeit eintauchen, so daß keine Korrektur für den herausragenden Faden erforderlich wäre.

Beide Voraussetzungen sind offensichtlich nicht erfüllt. In Bild 2 ist eine mögliche Anordnung von Metallschmelze und Leinölthermometer dargestellt.

Die Masse des Leinöls m läßt sich darstellen als Produkt aus dem Volumen V_0 bei 0°C und der zugehörigen Dichte ρ_0 , aber auch als Summe aus dem eingetauchten Volumen V_E , multipliziert mit der Dichte ρ_t bei der Celsius-temperatur t , und dem Fadenvolumen $(V_N - V_E)$, multipliziert mit der Dichte ρ_F bei der Fadentemperatur t_F . Es gilt also die Beziehung

$$m = V_0 \rho_0 = V_E \rho_t + (V_N - V_E) \rho_F \quad (6)$$

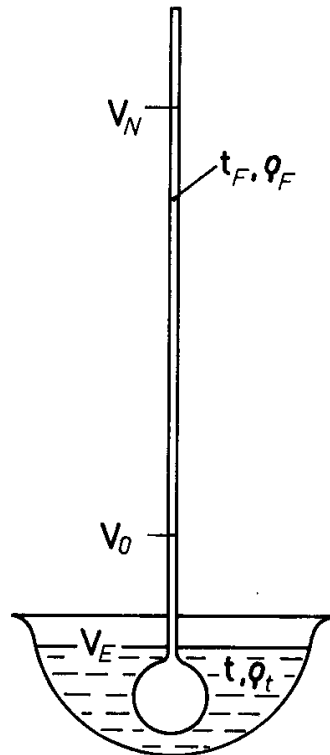


Bild 2:

Metallschmelze und Thermometer.

V_E = Eintauchvolumen, V_0 = Nullpunktvolumen, V_N = Meßvolumen.

Führt man noch die Ausdehnungskoeffizienten

$$\beta_t = \frac{V_t - V_0}{V_0 \cdot t} = \frac{\varrho_0 - \varrho_t}{\varrho_t \cdot t} \quad \text{und} \quad \beta_F = \frac{V_F - V_0}{V_0 \cdot t_F} = \frac{\varrho_0 - \varrho_F}{\varrho_F \cdot t_F}$$

ein, so ergibt sich eine Beziehung zwischen Celsius-Temperatur t und gemessenem Volumen V_N in der Form

$$\frac{1}{1 + \beta_t \cdot t} = \frac{V_0}{V_E} - \frac{V_N - V_E}{V_E} \cdot \frac{1}{1 + \beta_F \cdot t_F} \quad (7)$$

Da Ausdehnungskoeffizienten von Leinöl in der Literatur nicht zu finden waren, haben wir eigene Messungen an drei Ölsorten angestellt²⁾, deren Ergebnis Bild 3 zeigt. Leinöl 1 ist für den Malerbedarf bestimmt, es ist hellgelb und klar. Leinöl 2 ist wie Sorte 1, aber 70 Stunden lang mit Kontakt zur Außenluft getempert, davon 48 Stunden bei 140°C, 4 Stunden bei 170°C und 18 Stunden bei 230°. Es ist dabei dunkelbraun geworden, aber klar geblieben. Leinöl 3 hat die Qualität des Deutschen Arzneibuchs (DAB 7), es ist wie Sorte 1 hellgelb und klar.

Zum Vergleich sind in Bild 3 noch die Literaturwerte [11] für Olivenöl eingetragen. Auffällig ist bei allen Ölsorten die starke Temperaturabhängigkeit von β_t , im

²⁾ Der Verfasser dankt Herrn Udo Glückert für die sorgfältige Durchführung dieser Messungen.

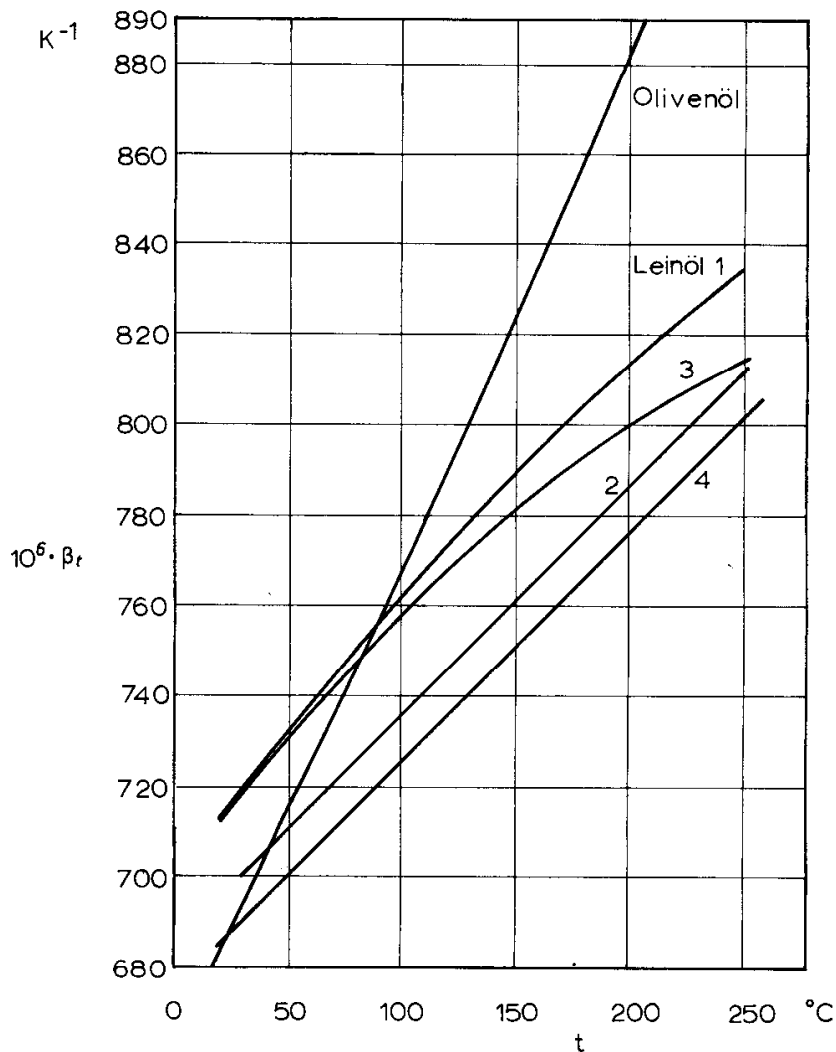


Bild 3:
Ausdehnungskoeffizienten β_t von Leinöl und Olivenöl.

Gegensatz zu Newtons Annahme $\beta_N = \text{const.}$ Wir können aber Newtons Wert für β_N als den effektiven (relativ zu Glas gerechneten) Ausdehnungskoeffizienten eines Leinöls bei 37°C annehmen. Daher haben wir in Bild 3 durch den Punkt 37°C und $692 \cdot 10^{-6}\text{K}^{-1}$ eine Parallele zu Kurve 2 gezogen und nehmen an, daß sich das Newtonsche Leinöl ungefähr so verhalten hat, wie es dieser Kurve 4 entspricht. Für den Ausdehnungskoeffizienten von Glas können wir im Mittel Werte um $20 \cdot 10^{-6}\text{K}^{-1}$ annehmen.

Zur Ermittlung der Fadentemperatur t_F betrachten wir das Leinölthermometer als Rippe, die an der Stelle V_E in Bild 2 der Badtemperatur t ausgesetzt ist und welche die durch Leitung aufgenommene Wärme an die Umgebung abgibt. Wegen der geringen Wärmeleitfähigkeit des Leinöls [$\lambda = 0,17 \text{ W}/(\text{K m})$] wird die Wärme praktisch nur durch die Glaskapillare [$\lambda = 1 \text{ W}/(\text{K m})$] geleitet. Unter plausiblen Annahmen findet man, daß die ursprüngliche Übertemperatur der Kapillare am Eintauchpunkt schon nach wenigen Zentimetern auf 1 Prozent oder sogar auf 1 Promille abgesunken ist,

der längste Teil der Glaskapillare sich also auf Umgebungstemperatur befindet. Wir haben daher mit einer Fadentemperatur $t_F = 25^\circ\text{C}$ gerechnet.

Mit diesen Annahmen erhalten wir aus Gl. (7) die gesuchte Beziehung zwischen der Celsius-Temperatur t und dem Volumen des Leinöls V_N und mit Gl. (5) auch der Newton-Temperatur t_N , wie sie in Bild 4 dargestellt ist. Dabei ist das Eintauchvolumen $V_E = 9550$ angenommen, was etwa der in Bild 2 gezeigten Position des Leinölthermometers entspricht. Die Differenzen zwischen t_N und t lassen sich auf diese Weise befriedigend wiedergeben.

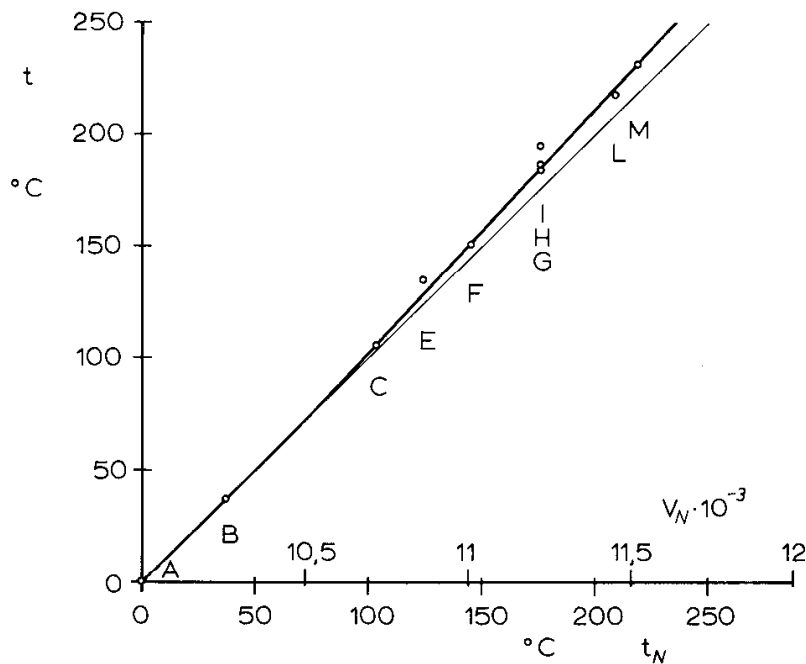


Bild 4:

Vergleich zwischen Newton-Temperatur und Celsius-Temperatur für das Leinölthermometer.

Eine Ausnahme macht der Dampfdruck, bei dem nach Tabelle 1 $t_N > t$ ist. Dieser Widerspruch läßt sich aufklären, wenn man für diesen Versuch bei siedendem Wasser eine größere Eintauchtiefe ($V_E \approx 10.200$) annimmt, was wegen des vermutlich größeren Gefäßes (im Vergleich mit den Tiegeln für die Metallschmelzen) nicht ganz unwahrscheinlich ist. Bei einem etwas geringeren Eintauchvolumen wäre $t_N \approx t$ geworden.

Newton gibt noch an, daß die Ausdehnung der Luft zehnmal so groß wie die des Leinöls, und die des Leinöls etwa fünfzehnmal so groß wie des Weingeistes gewesen sei. Für Luft (mit $\beta_t = 1/T = 3226 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ bei 37°C) ergibt sich etwa das fünffache; bei Weingeist kann es sich nur um eine stark verdünnte wässrige Lösung gehandelt haben. Diese Angaben zeigen aber, daß Newton sowohl mit dem Luftthermometer wie auch mit dem Weingeistthermometer Versuche angestellt haben muß, ehe er sich für Leinöl als Thermometerflüssigkeit entschieden hat.

Das Abkühlungsthermometer

Für die Messung höherer Temperaturen verwendete Newton eine Anordnung, die wir „Abkühlungsthermometer“ nennen wollen, und die aus einem dicken Stück Eisen (*ferrum satis crassum*) bestand, das in einer Esse glühend gemacht und dann an einen kühlen Ort gebracht wurde, wo der Wind gleichmäßig wehte (*ubi ventus constanter spirabat*). Auf dieses Eisen, das wir uns vielleicht als dicke Platte vorstellen können, wurden kleine Proben der Metalle und Metallegierungen aufgebracht. Während der Abkühlung wurde die Zeit notiert, zu der die einzelnen Proben erstarrten.

Die Gesetzmäßigkeit dieses Vorgangs beschreibt Newton folgendermaßen: Bei gleichbleibender Windgeschwindigkeit werden die am Eisen vorbeistreichenden und dabei erwärmten Luftballen gleichmäßig durch nachströmende kalte Luftballen ersetzt (*ut... aer frigidus... uniformi cum motu succederet*). Die dabei an die Luftballen in einer bestimmten Zeit übergehende Wärme (*Calor, quem ferrum calefactum corporibus frigidis sibi contiguis dato tempore communicat*) ist gleich der Enthalpieabnahme des Eisens in dieser Zeit (*Calor, quem ferrum dato tempore amittit*), und diese ist der Übertemperatur des Eisens proportional (*est ut Calor totus ferri*).

Mit dieser Beschreibung, die sich wörtlich aus dem Originaltext ablesen läßt (wenn man die verschiedenen Bedeutungen von *calor* berücksichtigt) und die auch heute noch in jedes Lehrbuch der Wärmeübertragung passen würde, gibt Newton zwei durchaus verschiedene Naturgesetze an, nämlich

1. das Newtonsche Abkühlungsgesetz im engeren Sinne, also die Proportionalität zwischen übergehendem Wärmestrom und momentaner Übertemperatur, und
2. das Abkühlungsgesetz des Eisenstücks, das aus einer Enthalpiebilanz folgt, also die Gültigkeit des ersten Hauptsatzes voraussetzt. Die quasi-stationäre Behandlung ist wegen der verhältnismäßig langsamen Temperaturabnahme unbedenklich.

Das Eisenstück dient demnach als Kalorimeter, dessen zeitliche Enthalpieabnahme durch das Newtonsche Abkühlungsgesetz bestimmt wird und das Newton zur Temperaturmessung verwendet. Man könnte mit dieser Anordnung beispielsweise auch die Wärmekapazität des Eisens oder den Wärmeübergangskoeffizienten bestimmen. Beide Meßverfahren sind heute im Gebrauch.

Die von Newton aufgestellte Enthalpiebilanz läßt sich durch folgende Gleichungen wiedergeben:

$$\Phi \, d\tau = -m \, dh = -m \, c \, dt = \alpha \, A \, (t - t_\infty) \, d\tau \quad (8)$$

Darin bedeuten Φ den Wärmestrom vom Eisen an die vorbeistreichende Luft, m die Masse des Eisens, h seine spezifische Enthalpie, c seine spezifische Wärmekapazität, α den Wärmeübergangskoeffizienten, A die von der Luft berührte Oberfläche des Eisens, τ die Zeit und $(t - t_\infty)$ die momentane Übertemperatur des Eisens über die Lufttemperatur mit t_∞ als dieser Lufttemperatur. Der rechte Term dieser Gleichung

stellt das Newtonsche Abkühlungsgesetz dar. Die Lufttemperatur t_∞ wurde von Newton mit einem Thermometer (vermutlich dem Leinölthermometer) gemessen.

Die Integration von Gl. (8) ergibt die Beziehung

$$\ln \frac{t - t_\infty}{t_1 - t_\infty} = \frac{\alpha_1 A}{m c} (\tau_1 - \tau) \quad (9)$$

wenn τ_1 die gesamte Versuchsdauer bedeutet, also jene Zeit τ_1 seit Versuchsbeginn, zu der das Eisen und damit die aufgebrachten Proben die Temperatur t_1 angenommen haben, die nach Newton gleich der Körpertemperatur von 37°C ist. Der Wärmeübergangskoeffizient α ist konstant angenommen und in Gl. (9) mit α_1 bezeichnet, um ihn von später verwendeten Größen zu unterscheiden. Gl. (9) bestätigt die Angabe von Newton, wonach bestimmten Zeitabständen bestimmte Quotienten der zugehörigen Übertemperatur entsprechen.

In Wirklichkeit ist über größere Temperaturbereiche weder α konstant, noch kann man den Einfluß der Strahlung unterdrücken, so daß an Stelle von Gl. (8) folgende Beziehung zu verwenden ist:

$$\Phi \, d\tau = -m \, c \, dt = \left[\alpha (t - t_\infty) + \varepsilon \sigma (T^4 - T_\infty^4) \right] A \, d\tau \quad (10)$$

Hierin sind ε der Emissionskoeffizient der Proben, σ die Stefan-Boltzmann-Konstante und T die Kelvin-Temperatur.

Da Gl. (10) nicht in geschlossener Form integriert werden kann, wird sie stückweise linearisiert [12] und man erhält:

$$\Phi \, d\tau = -m \, c \, dt = (\alpha_K + \alpha_S) A (t - t_\infty) \, d\tau \quad (11)$$

mit der Gl. (9) entsprechenden Lösung

$$\ln \frac{t - t_\infty}{t_1 - t_\infty} = \frac{(\alpha_K + \alpha_S)}{m c} A (\tau_1 - \tau) = \frac{\alpha_K + \alpha_S}{\alpha_1} \frac{\alpha_1 A}{m c} (\tau_1 - \tau) \quad (12)$$

In die Gln. (11) und (12) ist neben dem Wärmeübergangskoeffizienten durch Konvektion, der hier mit α_K bezeichnet wird, noch der Wärmeübergangskoeffizient durch Strahlung

$$\alpha_S = \varepsilon \sigma (T^4 - T_\infty^4) / (t - t_\infty) \quad (13)$$

eingeführt, der stark von der Temperatur T abhängt, aber für begrenzte Temperaturbereiche konstant angenommen werden kann. Für $\tau \rightarrow \tau_1$ in Gl. (12), also für das Versuchsende, gilt auch $(\alpha_K + \alpha_S) \rightarrow \alpha_1$, so daß dann die Temperaturen aus Gl. (12) denen aus Gl. (9) gleich werden. Wir hätten in den Gln. (8) und (9) t durch t_N ersetzen können, da nach dem Newtonschen Konzept der Abkühlungsvorgang nach Gl. (9) ablaufen würde.

Zur Berechnung von α_K wurde eine Beziehung für die angeströmte Platte [13] verwendet, deren Ergebnisse wegen vermuteter Turbulenzeinflüsse durch Kanten und Halterung (cum forcipe) um 10% erhöht wurden. Für den Emissionskoeffizienten ε

liegen nur spärliche Literaturangaben vor [14], die Werte zwischen 0,5 und 0,6 wahrscheinlich machen; wir haben mit $\varepsilon = 0,55$ gerechnet. Für die Umgebungstemperatur wurde $t_\infty = 10^\circ\text{C}$ angenommen, da die Versuche vermutlich im Freien vorgenommen wurden. Damit erhält man die α -Werte aus Bild 5, die insbesondere den Strahlungseinfluß bei höheren Temperaturen zeigen. Setzt man für die Masse m und die Oberfläche A des Eisens plausible Werte ein und rechnet den Versuchsbeginn von dem Zeitpunkt, an dem das Eisen die Erstarrungstemperatur des „Regulus per se“ ($t_N = 450^\circ\text{C}$) erreicht hat, so ergibt sich eine Versuchsdauer $\tau_1 = 77$ min.

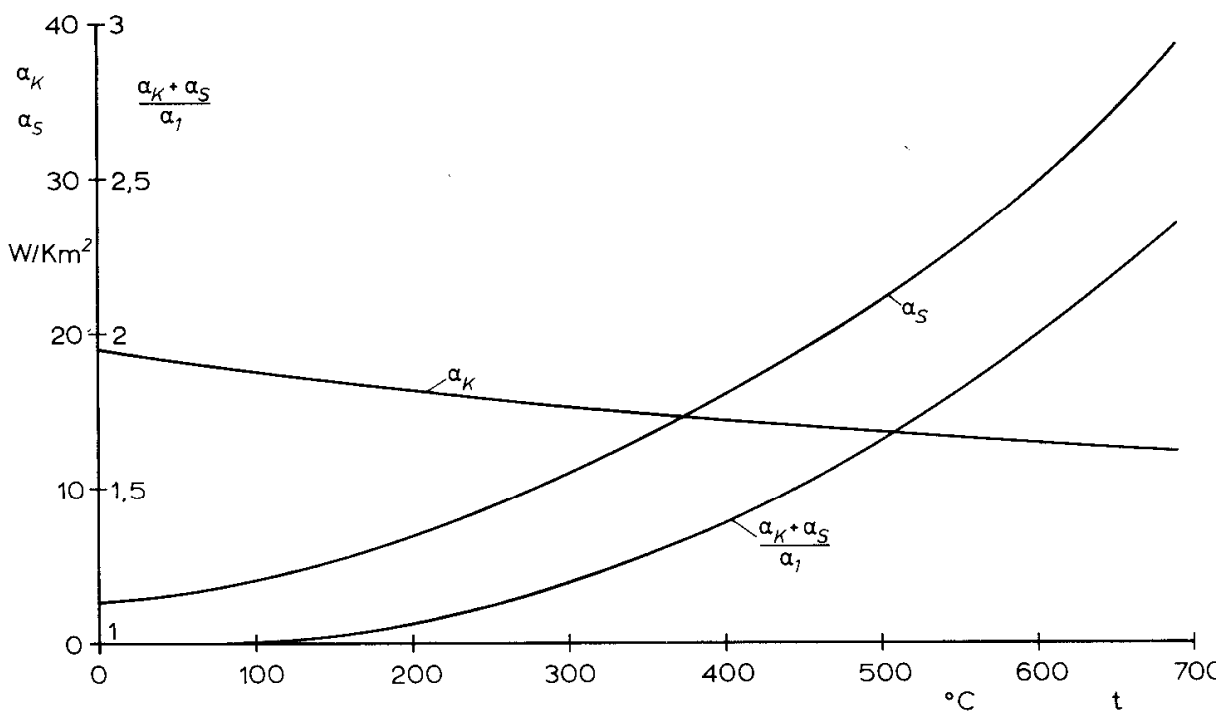


Bild 5:
Wärmeübergangskoeffizienten der Konvektion α_K und der Strahlung α_S .
 $\alpha_1 = 22 \text{ W}/(\text{K m}^2)$.

Der zeitliche Abkühlungsverlauf nach Newton gemäß Gl. (9) und der wirkliche Verlauf nach Gl. (12) sind in Bild 6 in halblogarithmischer Darstellung wiedergegeben. Die gerade Linie nach Gl. (9) entspricht dem von Newton angenommenen Verlauf. Auf ihr sind die Newton-Temperaturen markiert, die Buchstaben für die Fixpunkte entsprechen Tabelle 1. Die darüber liegende gekrümmte Kurve entspricht dem Verlauf nach Gl. (12). Sie wurde durch eine graphische Konstruktion erhalten, bei der in Gl. (12) die Werte $(\alpha_K + \alpha_S)/\alpha_1$ nach Bild 5 bereichsweise konstant angenommen wurden. Die eingezeichneten Celsius-Temperaturen zeigen, daß sich auf diese Weise der wirkliche Abkühlungsverlauf befriedigend wiedergeben läßt. Für $\tau = 0$ erhält man Werte um 640°C , so daß diese Konstruktion der Interpretation von Regulus Martis als Antimon zumindest nicht widerspricht.

Nicht alle Angaben Newtons lassen sich befriedigend aufklären. Hierzu gehören die Schmelzpunkte N, O, Q und R in Tabelle 1 im Meßbereich des Abkühlungsthermometers, das nach seiner Konstruktion nur Erstarrungstemperaturen liefern sollte. Nur für die Fixpunkte N und O könnte man annehmen, daß Newton sie auch mit dem Leinölthermometer vermessen hat.

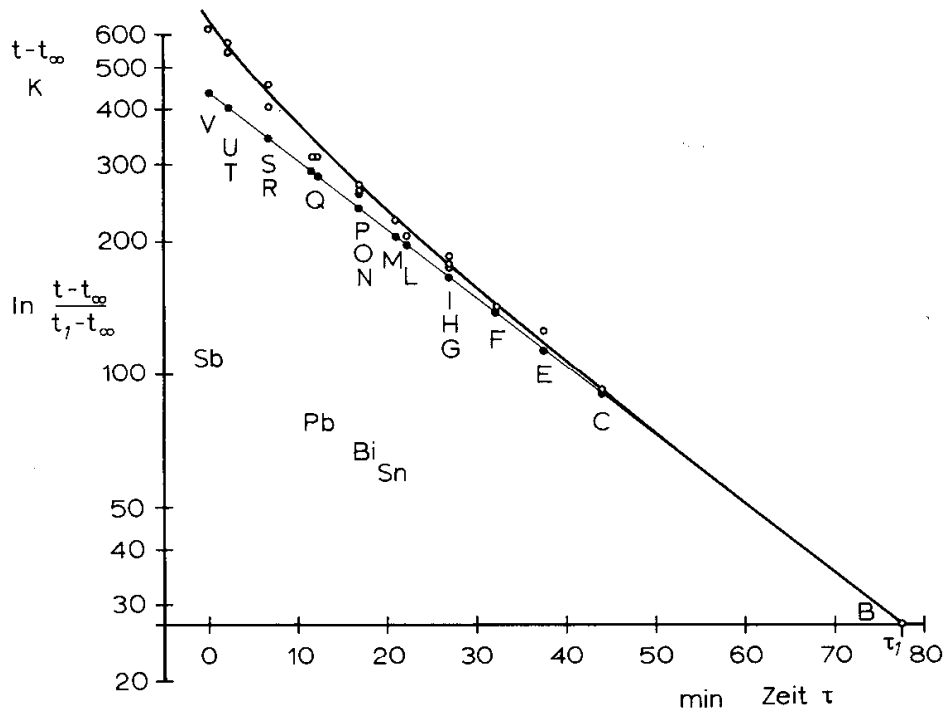


Bild 6:

Abkühlung des Eisenstückes als Kalorimeter in halblogarithmischer Darstellung.

Schlußfolgerungen

Die Meßwerte Newtons mit dem Leinölthermometer und mit dem Abkühlungsthermometer müssen nach dem heutigen Stand des Wissens anders interpretiert werden: Beim Leinölthermometer sind die mit der Temperatur zunehmenden Ausdehnungskoeffizienten und der herausragende Faden, beim Abkühlungsthermometer die veränderlichen Wärmeübergangskoeffizienten und die Temperaturstrahlung zu berücksichtigen. Die dadurch entstehenden Korrekturen ergeben für beide Instrumente die heute für richtig angesehenen Celsius-Temperaturen. Diese Korrekturen liegen für beide Instrumente in der gleichen Richtung und sind im überdeckten Bereich im Rahmen der Meßunsicherheit gleich. Daraus schließt Newton, daß er zu Recht die Leinöltemperaturen dem Volumen des Leinöls proportional setzen konnte, da er an der Richtigkeit der Messungen mit dem Abkühlungsthermometer keine Zweifel hatte.

Es bleibt noch die Frage der Motivation. Wir wissen heute, daß sich Newton über viele Jahre mit der Alchemie beschäftigt hat [2,6], daß er die wichtigsten Lehrbücher

kannte und daß er einige grundlegende Versuche nachgearbeitet hat. Er verfügte über ein gut eingerichtetes metallurgisches Laboratorium, das ihm auch für die hier beschriebenen Versuche zugute kam. Sein langjähriger Mitarbeiter Dr. Humphrey Newton of Grantham, der mit Isaac Newton nicht verwandt war, berichtete über diese Jahre folgendes:

Er ging sehr selten vor zwei oder drei Uhr zu Bett, manchmal nicht vor fünf oder sechs und schlief dann vier oder fünf Stunden, besonders im Frühjahr und wenn die Blätter fielen. Um diese Zeit pflegte er etwa sechs Wochen in seinem Laboratorium zu verbringen, wobei das Feuer weder bei Nacht noch bei Tage kaum jemals ausging. Er saß die eine Nacht auf und ich die andere, bis er seine chemischen Experimente beendet hatte, in deren Durchführung er überaus genau, streng und pünktlich war. Was er eigentlich für ein Ziel verfolgte, konnte ich nicht erkennen, aber seine Mühe und seine Sorgfalt ließen mich vermuten, es müsse etwas sein, was außerhalb menschlicher Fähigkeit und menschlichen Könnens liege... Manchmal, wenn auch sehr selten, wollte er in einem alten schimmeligen Buch nachsehen, das in seinem Laboratorium lag und das wie ich glaube, „Agricola de Metallis“ hieß, da die Umwandlung von Metallen auch sein Hauptanliegen war. Hierfür war Antimon eine wichtige Substanz...

Was Dr. Newton als Zeitgenosse nicht erkannte, ist uns heute erst recht unzugänglich. Wir sind auf begründbare Vermutungen angewiesen. Vielleicht ist die jahrelange Beschäftigung mit der Alchemie aus der Absicht zu erklären, auch die Chemie auf ihre Grundlagen zu stellen, nachdem das mit der Mechanik und der Optik so glänzend gelungen war, oder noch gelingen sollte. Vielleicht hat Newton dabei auch das Bedürfnis verspürt, über geeignete Meßverfahren, auch für die Temperatur, zu verfügen, um quantitative Beobachtungen anstellen zu können. Der Meßbereich solcher Verfahren sollte bis zum Schmelzpunkt der wichtigen Substanzen gehen, zu denen Antimon gehörte. Wenn man dieser Überlegung folgt, wäre die hier besprochene Arbeit das Rudiment eines wissenschaftlichen Planes, der, durch äußere Lebensumstände bedingt, nie ausgeführt wurde.

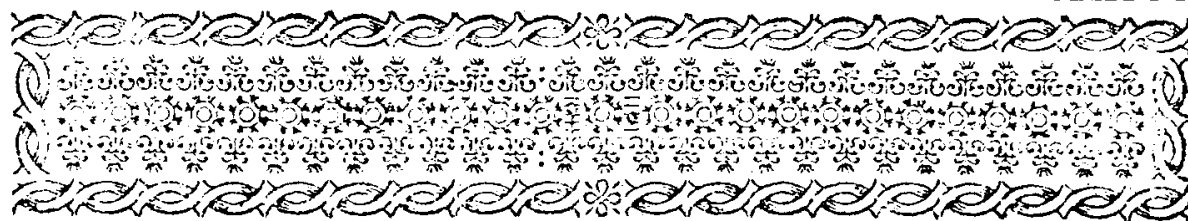
Aber wie dem auch sei, für uns hat diese Arbeit über Thermometrie ihren besonderen Wert

- wegen des für damalige Zeit ungewöhnlich hohen Meßbereichs,
- wegen der Verwendung von Metallschmelzpunkten als Fixpunkte,
- wegen der Formulierung des Newtonschen Abkühlungsgesetzes,
- wegen seiner Verwendung zusammen mit dem zeitlichen Abkühlungsgesetz des Kalorimeters und
- damit als älteste nachweisbare Arbeit über ein Problem der Wärmeübertragung.

Wir können diese Arbeit daher mit Recht als das betrachten, was heute ein „Pioneer Paper“ genannt wird.

Literatur

- [1] Scala Graduum Caloris. Phil. Trans. Bd. 22 (1701), S. 824/829 Auch veröffentlicht unter dem Titel: Scala Graduum Caloris et Frigoris. Is. Newtoni Opuscula Tom. II, S. 419/423. Lausanne und Genf, 1744 (vgl. Anhang 1 und 2).
- [2] J.A. Ruffner: Reinterpretation of the Genesis of Newton's „Law of Cooling“. Archive for History of Exact Sciences. Vol. II., S. 138/152. Berlin usw. 1962–65.
- [3] Comptes Rendus des Séances, 13. Conf. Gén. des Poids et Mesures. Paris 1968.
- [4] Gmelin: Handbuch der anorganischen Chemie. Benutzt wurden die Bände Antimon, Blei, Wismut, Zinn. Berlin, Heidelberg, New York 1949–75.
- [5] Landolt-Börnstein: Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik und Technik. 6. Aufl., Bd. IV, 2b, S. 998. Berlin usw. 1964.
- [6] Betty J.T. Dobbs: The Foundations of Newton's Alchemy or „The Hunting of the Greene Lion“. Cambridge usw. 1975.
- [7] Kirstine Meyer: Die Entwicklung des Temperaturbegriffs im Wandel der Zeiten. Braunschweig 1913.
- [8] F. Henning: Temperaturmessung. 3. Aufl., hrsg. v. H. Moser. Berlin usw. 1977.
- [9] H.J. Lambert: Pyrometrie oder vom Maße des Feuers und der Wärme. Berlin 1779.
- [10] Abhandlungen über Thermometrie. Hrsg. v. A.J. v. Oettinghausen. Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften, Nr. 57. Leipzig 1894.
- [11] Physikalisches Taschenbuch. Hrsg. v. H. Ebert. 4. Aufl. Braunschweig 1967.
- [12] H. Gröber, S. Erk, U. Grigull: Die Grundgesetze der Wärmeübertragung. 3. Aufl., Neudruck. Berlin usw. 1969.
- [13] U. Grigull: Wärmeübertragung. Hütte, des Ingenieurs Taschenbuch. 29. Aufl. Physikhütte, Berlin usw. 1971.
- [14] VDI-Wärmeatlas. 2. Aufl. Düsseldorf 1974.



ISAACI NEWTONI

SCALA

GRADUUM CALORIS, ET FRIGORIS.

<i>Æquales Caloris Gradus.</i>		<i>Constantes Caloris Gradus.</i>
o.	o.	C ALOR aeris hyberni, ubi aqua incipit gelu rigriscere. Innotescit hic Calor accuratè locando Thermometrum in nive compressà, quo tempore gelu solvitur.
o, 1, 2.		Calores aeris hyberni.
2, 3, 4.		Calores aeris verni & autumnalis.
4, 5, 6.		Calores aeris æstivi.
6.		Calor aeris meridiani circa mensẽ Julium.
12.	1.	Calor maximus, quem Thermometer ad contactum corporis humani concipit. Idem, circiter, est Calor Avis ova incubantis.
$14\frac{3}{11}$	$1\frac{1}{4}$	Calor balnei propè maximus, quem quis manu immersà & constanter agitâtâ diutiùs perferre potest. Idem ferè est Calor Sanguinis recens effusi.
17.	1	Calor balnei maximus, quem quis manu immersà & immobili manente diutiùs perferre potest.
$20\frac{2}{11}$	$1\frac{3}{4}$	Calor balnei, quo cera innatans & liquefacta defervendo rigriscit & diaphaneitatem amittit.
24.	2.	Calor balnei, quo cera innatans incalescendo liquefcit, & in continuo fluxu sine ebullitione conservatur.

O P U S C U L U M X X I.

420

Æquales
Caloris
Gradus.*Constantes Caloris Gradus.*

28 $\frac{6}{11}$	2 $\frac{1}{4}$	Calor mediocris inter Calores, quo cera liquefit, & aqua ebullit.
34.	2 $\frac{1}{2}$	Calor, quo aqua vehementer ebullit, & mistura duarum partium plumbi, trium partium stamni, & quinque partium bismuti defervendo rigescit. Incipit aqua ebullire Calore partium 33; Calorem partium plusquam 34 $\frac{1}{2}$ ebulliendo vix concipit. Ferrum verò defervescens Calore partium 35 vel 36, ubi aqua calida, & 37, ubi frigida in ipsum guttatim incidit, desinit ebullitionem excitare.
40 $\frac{4}{11}$	2 $\frac{3}{4}$	Calor minimus, quo mistura unius partis plumbi, quatuor partium stamni, & quinque partium bismuti incalescendo liquefit, & in continuo fluxu conservatur.
48.	3.	Calor minimus, quo mistura æqualium partium stamni, & bismuti liquefit. Hęc mistura Calore partium 47 defervendo coagulatur.
57.	3 $\frac{1}{4}$	Calor, quo mistura duarum partium stamni & unius partis bismuti funditur; ut & mistura trium partium stamni & duarum plumbi; sed mistura quinque partium stamni & duarum partium bismuti hoc Calore defervendo rigescit. Et idem facit mistura æqualium partium plumbi & bismuti.
68.	3 $\frac{1}{2}$	Calor minimus, quo mistura unius partis bismuti, & octo partium stamni funditur. Stannum per se funditur Calore partium 72, & defervendo rigescit Calore partium 70.
81.	3 $\frac{3}{4}$	Calor, quo bismutum funditur, ut & mistura quatuor partium plumbi & unius partis stamni; sed mistura quinque partium plumbi & unius partis stamni, ubi fusa est & defervet, in hoc Calore rigescit.

Calor

S C A L A G R A D U U M &c. 421

*Æqualis
Caloris
Gradus.*

Constantes Caloris Gradus.

96.	4.	Calor minimus, quo plumbum funditur. Plumbum incallescendo funditur Calore partium 96, vel 97, & defervendo rigescit Calore partium 95.
114.	$\frac{1}{4}$	Calor, quo corpora ignita defervendo penitus desinunt in tenebris nocturnis lucere, & vicissim incallescendo incipiunt in iisdem tenebris lucere; sed luce tenuissimâ, quæ sentiri vix possit. Hoc Calore liquefcit mixtura æqualium partium stamni & reguli <i>martis</i> , & mixtura septem partium bismuti, & quatuor partium ejusdem reguli defervendo rigescit.
136.	$\frac{1}{2}$	Calor, quo corpora ignita in tenebris nocturnis candent, in crepusculo verò neutiquam. Hoc Calore tum mixtura duarum partium reguli <i>martis</i> , & unius partis bismuti, tum etiam mixtura quinque partium reguli <i>martis</i> , & unius partis stamni defervendo rigescit. Regulus per se rigescit Calore partium 146.
161.	$\frac{3}{4}$	Calor, quo corpora ignita in crepusculo proximè ante ortum Solis, vel post occasum ejus manifestò candent; in clarâ verò diei luce neutiquam, aut non nisi perobscurè.
195.	5.	Calor prunarum in igne parvo culinari ex carbonibus fossilibus bitaminosis constructo & absque usu follium ardente. Idem est Calor ferri in tali igne, quantum potest, candentis; ignis parvi culinari, qui ex lignis constat, Calor paulò major est, nempe partium 200 vel 210. Et ignis magni major adhuc est Calor, præsertim si folliis cieatur.

In columnâ primâ habentur Gradus Caloris in proportione arithmeticâ, computum inchoando à Calore, quo aqua incipit gelu rigescere, tanquam ab infimo Caloris gradu, seu còmmune termino Caloris & Frigoris; &, ponendo Calorem externum

422

O P U S C U L U M XXI.

corporis humani esse partium duodecim. In secundâ columnâ habentur Gradus Caloris in ratione geometricâ sic, ut secundus Gradus sit duplo major primo, tertius item secundo, & quartus tertio, & primus sit Calor externus corporis humani sensibus æquatus.

Patet autem per hanc Tabulam, quòd Calor aquæ bullientis sit ferè triplo major, quam Calor corporis humani; & quòd Calor stanni liquecentis sit sextuplo major; & Calor plumbi liquecentis octuplo major, & reguli liquecentis duodecuplo major; & Calor ordinarius ignis culinaris sexdecim, vel septemdecim vicibus major, quàm Calor idem corporis humani.

Constructa fuit hæc Tabula ope Thermometri & ferri candentis. Per Thermometrum inveni mensuram Calorum omnium usque ad Calorem, quo stannum funditur, & per ferrum calefactum inveni mensuram reliquorum. Nam, Calor, quem ferrum calefactum corporibus frigidis sibi contiguis dato tempore communicat, hoc est, Calor, quem ferrum dato tempore amittit, est ut Calor totus ferri. Ideòque, si tempora refrigerii sumantur æqualia, Calores erunt in ratione geometricâ, & propterea per Tabulam Logarithmorum facilè inveniri possunt.

Primum igitur per Thermometrum ex oleo lini constructum inveni, quòd, si oleum, ubi Thermometer in nive liquecente locabatur, occupabat spatium partium 10000; idem oleum Calore primi gradus, seu corporis humani, rarefactum occupabat spatium 10256; & Calore aquæ jamjam ebullire incipientis, spatium 10705; & Calore aquæ vehementer ebullientis, spatium 10725; & Calore stanni liquefacti defervientis, ubi incipit rigescere & consistentiam amalgamatis induere, spatium 11516; & ubi omnino rigescit, spatium 11496. Igitur oleum rarefactum fuit ac dilatatum in ratione 40 ad 39 per Calorem corporis humani; in ratione 15 ad 14 per Calorem aquæ bullientis; in ratione 15 ad 13 per Calorem stanni defervientis, ubi incipit coagulari & rigescere; & in ratione 23 ad 20 per Calorem, quo stannum deferviens omnino rigescit. Rarefactio aeris æquali Calore fuit decuplo major, quàm rarefactio olei; & rarefactio olei, quasi quindecim vicibus major,

SCALA GRADUUM etc. 423

major, quàm rarefactio spiritus vini. Et, ex his inventis, ponendo Calores olei ipsius rarefactioni proportionales, & pro Calore corporis humani scribendo partes 12, prodiit Calor aquæ, ubi incipit ebullire, partium 33; &, ubi vehementiùs ebullit, partium 34; & Calor stamni, ubi, vel liquefcit, vel defervendo incipit rigescere & consistentiam amalgamatis induere, prodiit partium 72; &, ubi defervendo rigescit & induratur, partium 70. His cognitis, ut reliqua investigarem, calefeci ferrum satis crassum, donec satis canderet, & ex igne cum forcipe etiam candente exemptum locavi statim in loco frigido, ubi ventus constanter spirabat, huic imponendo particulas diversorum Metallorum & aliorum corporum ilquabilium, notavi tempora refrigerii, donec particulæ omnes amiffa fluiditate rigescerent, & Calor ferri æquaretur Calori corporis humani. Deinde, ponendo quòd excessus Calorum ferri, & particularum rigescentium, supra Calorem atmosphæræ Thermometro inventum, essent in progressionem geometricâ, ubi tempora sunt in progressionem arithmeticâ, Calores omnes innotuere.

Locavi autem ferrum, non in aere tranquillo, sed in vento uniformiter spirante, ut aer à ferro calefactus semper abriperetur à vento, & aer frigidus in locum ejus uniformi cum motu succederet. Sic enim aeris partes æquales æqualibus temporibus calefactæ sunt, & Calorem conceperunt Calori ferri proportionalem. Calores autem sic inventi eandem habuerunt rationem inter se, cum Caloribus per Thermometrum inventis; & propterea rarefactiones olei ipsius Caloribus proportionales esse rectè assumpsimus.

F I N I S.

Eine Skala der Wärme- und Kältegrade

von
Isaac Newton

Aus: Is. Newtoni Opuscula. Tom. II, S. 419/423. Lausanne und Genf 1744.

Auch anonym veröffentlicht unter dem Titel „Scala Graduum Caloris“ in Philosophical Transactions, Bd. 22 (1701), S. 824/829.

Übersetzung aus dem Lateinischen

Gleiche Wärmegrade		Konstante Wärmegrade (Fixpunkte)
0	0	Wärme der Luft im Winter, wenn Wasser zu gefrieren beginnt. Diese Wärme wird genau bestimmt durch ein Thermometer in verdichtetem Schnee, wenn er zu tauen beginnt.
0, 1, 2		Wärme der Luft im Winter.
2, 3, 4		Wärme der Luft im Frühling und im Herbst.
4, 5, 6		Wärme der Luft im Sommer.
6		Wärme der Luft am Mittag etwa im Monat Juli.
12	1	Höchste Wärme eines Thermometers im Kontakt mit dem menschlichen Körper. Etwa gleich der Wärme eines brütenden Vogels.
$14\frac{3}{11}$	$1\frac{1}{4}$	Höchste Wärme eines Bades, die die eingetauchte, gleichförmig bewegte Hand längere Zeit ertragen kann. Etwa gleich der Wärme frisch ausgeströmten Blutes.
17	$1\frac{1}{2}$	Höchste Wärme eines Bades, die die eingetauchte ruhende Hand längere Zeit ertragen kann.
$20\frac{2}{11}$	$1\frac{3}{4}$	Wärme eines Bades, bei der schwimmendes flüssiges Wachs beim Abkühlen zu erstarren und undurchsichtig zu werden beginnt.
24	2	Wärme eines Bades, bei der schwimmendes Wachs beim Erwärmen schmilzt und ohne zu sieden flüssig bleibt.
$28\frac{6}{11}$	$2\frac{1}{4}$	Mittlere Wärme zwischen der des schmelzenden Waxes und der des siedenden Wassers.

Gleiche Wärmegrade		Konstante Wärmegrade (Fixpunkte)
34	$2\frac{1}{2}$	Wärme, bei der Wasser lebhaft siedet und eine Mischung aus zwei Teilen Blei, drei Teilen Zinn und fünf Teilen Wismut beim Abkühlen erstarrt. Wasser beginnt bei einer Wärme von 33 Teilen an zu siedet und erreicht beim Sieden kaum mehr als $34\frac{1}{2}$ Teile. Eisen, das auf 35 oder 36 Teile der Wärme abgekühlt wird, beendet das Sieden von aufgetropftem heißem Wasser und bei 37 Teilen von kaltem Wasser.
$40\frac{4}{11}$	$2\frac{3}{4}$	Niedrigste Wärme, bei der eine Mischung aus einem Teil Blei, vier Teilen Zinn und fünf Teilen Wismut beim Erwärmen schmilzt und flüssig bleibt.
48	3	Niedrigste Wärme, bei der eine Mischung aus gleichen Teilen Zinn und Wismut schmilzt. Diese Mischung erstarrt beim Abkühlen auf 47 Teile.
57	$3\frac{1}{4}$	Wärme, bei der eine Mischung aus zwei Teilen Zinn und einem Teil Wismut schmilzt, ebenso wie eine Mischung aus drei Teilen Zinn und zwei Teilen Blei. Dagegen erstarrt beim Abkühlen bei dieser Wärme eine Mischung aus fünf Teilen Zinn und zwei Teilen Wismut. Dasselbe geschieht mit einer Mischung aus gleichen Teilen Blei und Wismut.
68	$3\frac{1}{2}$	Niedrigste Wärme, bei der eine Mischung aus einem Teil Wismut und acht Teilen Zinn schmilzt. Reines Zinn schmilzt bei 72 Teilen der Wärme und erstarrt beim Abkühlen bei 70 Teilen.
81	$3\frac{3}{4}$	Wärme, bei der Wismut schmilzt, wie auch eine Mischung aus vier Teilen Blei und einem Teil Zinn. Eine Mischung aus fünf Teilen Blei und einem Teil Zinn, die aufgeschmolzen und wieder abgekühlt wurde, erstarrt dagegen bei dieser Wärme.
96	4	Niedrigste Wärme, bei der Blei schmilzt. Blei schmilzt beim Erwärmen bei einer Wärme von 96 oder 97 Teilen und erstarrt beim Abkühlen bei einer Wärme von 95 Teilen.
114	$4\frac{1}{4}$	Wärme, bei der entzündete Körper ganz und gar aufhören, im Dunkeln zu leuchten und andererseits beim Erwärmen im gleichen Dunkel zu leuchten beginnen, aber mit einem sehr schwachen Licht, das man kaum wahrnehmen kann. Bei dieser Wärme schmilzt eine Mischung aus gleichen Teilen Zinn und Regulus Martis. Eine Mischung aus sieben Teilen Wismut und vier Teilen desselben Regulus erstarrt beim Abkühlen.

Gleiche Wärmegrade	Konstante Wärmegrade (Fixpunkte)
136	4 ^{1/2} Wärme, bei der entzündete Körper im nächtlichen Dunkel glühen, aber keineswegs in der Dämmerung. Bei dieser Wärme erstarrt beim Abkühlen eine Mischung aus zwei Teilen Regulus Martis und einem Teil Wismut, aber auch eine Mischung aus fünf Teilen Regulus Martis und einem Teil Zinn. Regulus allein erstarrt bei einer Wärme von 146 Teilen.
161	4 ^{3/4} Wärme, bei der entzündete Körper in der Dämmerung kurz vor Sonnenaufgang deutlich glühen, nicht aber bei hellem Tageslicht oder höchstens sehr dunkel.
195	5 Wärme glühender Kohlen in einem kleinen Küchenfeuer, das aus bituminösen Kohlen besteht und ohne Blasebalg brennt. Ebenso groß ist die Wärme von Eisen, das in einem solchen Feuer so stark wie möglich glüht. Die Wärme eines kleinen Küchenfeuers aus Holz ist etwas größer, sicherlich 200 oder 210. Die Wärme eines großen Feuers ist noch größer, besonders wenn es mit einem Blasebalg angefacht wird.

In der ersten Spalte sind die Wärmegrade in arithmetischer Progression enthalten, gezählt ab jener Wärme, bei der Wasser zu gefrieren beginnt, gleichsam als unterem Wärmegrad oder der gemeinschaftlichen Grenze zwischen Wärme und Kälte, und unter der Annahme, daß die äußere Wärme des menschlichen Körpers zwölf Teile beträgt. In der zweiten Spalte sind die Wärmegrade im geometrischen Verhältnis enthalten derart, daß der zweite Grad doppelt so groß ist wie der erste, der dritte wie der zweite und der vierte wie der dritte und daß der erste gleich der äußeren Wärme des menschlichen Körpers ist.

Aus dieser Tabelle wird deutlich, daß die Wärme siedenden Wassers nahezu dreimal größer ist, als die Wärme des menschlichen Körpers, die Wärme schmelzenden Zinns sechsmal größer, die Wärme schmelzenden Bleis achtmal größer, die Wärme schmelzenden Regulus zwölfmal größer und die gewöhnliche Wärme eines Küchenfeuers entsprechend sechzehn- oder siebzehnmals größer ist als die Wärme eben dieses menschlichen Körpers.

Diese Tabelle wurde mit Hilfe eines Thermometers und eines glühenden Eisens gewonnen. Durch das Thermometer fand ich das Maß aller Wärmen bis zur Wärme schmelzenden Zinns und durch das erhitzte Eisen fand ich das Maß der übrigen. Denn die Wärme, die das erhitzte Eisen den ihm benachbarten kalten Körper in gegebener Zeit mitteilt, das heißt die Wärme, die das Eisen in gegebener Zeit verliert, ist wie die gesamte Wärme des Eisens. Deshalb sind, wenn die Abkühlungszeiten gleich genommen werden, die Wärmen im geometrischen Verhältnis und können daher leicht durch eine Logarithmentafel gefunden werden. Zunächst fand ich mit einem

Leinölthermometer, daß wenn das Öl, sofern das Thermometer in schmelzenden Schnee gebracht wurde, einen Raum von 10.000 Teilen einnahm, dasselbe Öl bei der Wärme des ersten Grades, oder des menschlichen Körpers, verdünnt einen Raum von 10.256 Teilen, bei der Wärme, bei der Wasser gerade zu sieden beginnt, von 10.705, bei der Wärme heftig siedenden Wassers von 10.725, bei der Wärme des sich abkühlenden verflüssigten Zinns, sobald es zu erstarren und die Konsistenz eines Amalgam anzunehmen beginnt, von 11.516, und sobald es vollständig erstarrt ist, einen Raum von 11.496 Teilen einnimmt. Das Öl wurde also verdünnt und ausgedehnt im Verhältnis 40 zu 39 durch die Wärme des menschlichen Körpers, im Verhältnis 15 zu 14 durch die Wärme siedenden Wassers, im Verhältnis 15 zu 13 durch die Wärme des sich abkühlenden Zinns, sobald es zu koagulieren und zu erstarren beginnt und im Verhältnis 23 zu 20 durch die Wärme, bei der Zinn bei der Abkühlung vollständig erstarrt. Die Verdünnung der Luft bei der gleichen Wärme war zehnfach größer als die des Öls, die Verdünnung des Öls etwa fünfzehnmal größer als die von Weingeist. Indem man die Wärmen der Verdünnung des Öls selbst proportional setzt und der Wärme des menschlichen Körpers zwölf Teile zuschreibt, geht aus diesen Ergebnissen die Wärme des Wassers, bei der es zu sieden beginnt, mit 33 Teilen und die, bei der es heftig siedet, mit 34 Teilen hervor. Die Wärme des Zinns, bei der es entweder flüssig wird oder beim Abkühlen zu erstarren und die Konsistenz von Amalgam anzunehmen beginnt, geht mit 72 Teilen und jene, bei der es beim Abkühlen erstarrt und fest wird, mit 70 Teilen hervor.

Nachdem dieses bekannt war, habe ich, um den Rest zu untersuchen, ein hinlänglich dickes Stück Eisen erhitzt, bis es glühte, es mit einer ebenfalls glühenden Zange aus dem Feuer genommen und sofort an einen kalten Ort gebracht, wo der Wind gleichmäßig wehte. Auf dieses Eisen wurden Teilchen verschiedener Metalle und anderer schmelzfähiger Körper aufgebracht und die Abkühlungszeiten gemessen, bis alle Teilchen nach Verlust ihrer Fließfähigkeit erstarrt und die Wärme des Eisens der Wärme des menschlichen Körpers gleich geworden war. Mit der Annahme, daß die Überwerte der Wärmen des Eisens und der erstarrenden Teilchen über die mit dem Thermometer gemessene Wärme der Atmosphäre in geometrischer Progression erhalten werden, wenn die Zeiten in arithmetischer Progression vorliegen, sind alle Wärmen bekannt.

Das Eisen habe ich nicht ruhender Luft, sondern einem gleichmäßig wehenden Winde ausgesetzt, damit die vom Eisen erwärmte Luft ständig vom Winde fortgeführt wird und kalte Luft an ihrer Stelle in gleichmäßiger Bewegung nachrückt. Damit werden gleiche Teile der Luft in gleichen Zeiten erwärmt und nehmen Wärmen auf, die der Wärme des Eisens proportional sind. Die so gefundenen Wärmen hatten unter sich das gleiche Verhältnis wie die mit dem Thermometer gemessenen und daher konnten wir zu recht annehmen, daß die Verdünnungen des Öles seinen eigenen Wärmen proportional seien.