

Die Verdampfung als Mittel der Wärmemessung.*)

Von W. Müller - Erzbach.

Zu allen genaueren Messungen der Temperatur wurden bisher fast ausschliesslich die Ausdehnung von Flüssigkeiten oder die Druckveränderungen durch die Ausdehnung der Gase benutzt. Ein akustisches Thermometer von Cagniard-Latour, welches die Veränderung der Tonhöhe einer Pfeife durch die Wärme verwendet und die auf der Dissociation beruhende Wärmemessung haben nur ein theoretisches Interesse. Für hohe Wärmegrade bis über 900° genügt zu technischen Bestimmungen noch in den meisten Fällen das von W. Siemens erfundene Pyrometer, welches die Widerstandsänderungen eines galvanischen Stromes in einem heissen Metalldraht zur Anwendung bringt. Die damit erhaltenen Werte wichen**) von denen anderer Pyrometer vorteilhaft ab, doch wurden gegen das Luftthermometer bis zur Temperatur von 430° Unterschiede von 3° bis 9° festgestellt, so dass es für die genaue Beobachtung der gewöhnlichen Luftwärme ebenfalls nicht in Betracht kommt.

Trotz des grossen Unterschiedes der bisher benutzten Wärmemessapparate in ihrer Konstruktion stimmen doch alle darin überein, dass durch dieselben ein in einer bestimmten Zeit eintretender Wärmegrad an einer gleichzeitigen Zustandsänderung des Wärmemessers beobachtet werden soll. Vollständig abweichend davon kann nach dem nachstehend beschriebene Verfahren die Wärme durch die von ihr geleistete Arbeit gemessen werden. Innerhalb einer verschlossenen Flasche wird, beispielsweise aus einer eingesetzten Glasröhre, eine der Wärme entsprechende Wassermenge verdampft und aus dem Gewichtsverluste jener Röhre die Temperatur erkannt. Man misst in diesem Falle also die Wärme mit Hülfe der Wage. Es wird aber dadurch nicht ein einzelner momentan vorhandener Wärmegrad wie beim Quecksilberthermometer beobachtet,

*) Teilweise mitgeteilt in den Verh. d. phys. Ges. zu Berlin No. 5, S. 36, 1888.

**) A. F. Weinhold, Progr. d. höh. Gewerbeschule Chemnitz, 1873.

sondern man ermittelt auf diese Weise die während eines längeren Zeitraums herrschende Durchschnittstemperatur, der Apparat ist ein Thermograph. Da er die Summe aller einzelnen Wärmewirkungen in der ganzen geleisteten Arbeit der Verdampfung zur Anschauung bringt, so scheint mir der Name Thermointegrator geeignet zu sein, ihn von den bekannten Thermographen zu unterscheiden. Die Einrichtung desselben ging zunächst aus Beobachtungen über die Wasserverdampfung hervor. Vielfache Versuche, nach der Art des Atmometers eine konstante Beziehung zwischen der Temperatur und der Verdampfungs menge festzustellen, missglückten, weil der Gegendruck eindringender Luftfeuchtigkeit nicht beseitigt werden konnte. Erst durch Anwendung einer Fettschicht als Sperrmittel wurde diese Schwierigkeit beseitigt. Eine mit eingeschliffenem Glasstöpsel verschliessbare und mit konzentrierter Schwefelsäure teilweise gefüllte Glasflasche kann nämlich durch geringes Einfetten des Stöpsels gegen den in der äusseren Luft vorhandenen Wasserdampf so vollständig abgeschlossen werden, dass sie selbst bei grossem Durchmesser des Stöpsels und in einer mit Wasserdampf ganz gesättigten Atmosphäre im Laufe von 24 Stunden noch nicht ein Milligramm schwerer wird. Wenn daher Wasser in einer nur ähnlich verschlossenen Flasche verdunstet, so ist auf den Dampfdruck innerhalb derselben die atmosphärische Feuchtigkeit ganz ohne Einfluss und man kann ihn auf einer konstanten minimalen Höhe erhalten, wenn nur dafür gesorgt wird, dass die Oberfläche der absorbierenden Schwefelsäure hinreichend gross ist. Umgekehrt erkennt man deshalb aus dem Gewichtsverlust der in der Atmosphäre der Schwefelsäure befindlichen Wasserbehälter, ob die Absorption unverändert fortdauert oder nicht. Durch den erwähnten Verschluss der Glasflaschen war übrigens nur der Uebertritt der Feuchtigkeit gehindert, jede Veränderung im äusseren Luftdruck hatte sich bald auf das Innere der Flasche übertragen.

In solche Flaschen von meist $\frac{1}{2}$ l Inhalt wurden nun einerseits offene Glasröhren gebracht, welche an der anderen Seite zur Aufnahme des Wassers kugelförmig aufgeblasen waren. Wenn man die Röhren in der Schwefelsäure ähnlich wie ein Aräometer schwimmen lassen will, so lässt man sie in geringer Entfernung von der erweiterten Oeffnung zu einer zweiten grösseren Kugel ausblasen. Am bequemsten für die Ausführung der Versuche ist es, in der Mitte der Flasche eine kurze, oben offene Röhre zu befestigen, welche einige Versuchsröhren aufnimmt und selbst keine Schwefelsäure enthält, so dass man jene Röhren ohne weiteres herausnehmen und auf die Wage setzen kann. Es genügen dann einfache Kugelröhren der ersten Art, und sie geben nach den vorliegenden Erfahrungen mindestens mit den anderen gleich gute Resultate. Die Weite der Versuchsröhren schwankte bei den nachstehenden Versuchen zwischen 5 und 7 mm, die Länge des engeren Teils zwischen 49 und 82 mm, die Röhren No. 1 bis 6 hatten eine zweite kugelförmige Erweiterung, die beiden letzten

nur eine einzige an dem geschlossenen Ende. Alle waren an der Kugel mit einer Marke versehen, welche den Wasserstand bestimmte; ist die Kugel hinreichend weit, so ändert sich die Entfernung bis zur nächsten Erweiterung der Röhre oder der Oeffnung durch den einzelnen Versuch nur wenig und es braucht erst nach längerer Zeit frisches Wasser nachgefüllt zu werden.

Bei einer derartigen Anordnung der Versuche ergaben sich für die Verdampfung des Wassers nach Massgabe der Temperatur so konstante Werte, wie ich sie nach der Schwierigkeit anderer Diffusionsversuche nicht annähernd erwartete. Die Diffusionskonstante erweist sich dabei mit der Temperatur stark veränderlich und wurde nach Maxwell dem Quadrate der absoluten Temperatur proportional gesetzt, so dass der als für eine bestimmte Temperatur konstant erkannte Gewichtsverlust des Wassers sich allgemein für alle Temperaturen berechnen liess. Nach der Formel

$$s_1 = \frac{s T^2 p_1}{T_1^2 p}$$

findet man demnach aus dem Wasserverlust p und p_1 wie den Quadraten der absoluten Temperatur für die Temperatur T_1 die Spannung s_1 , wenn sie für T durch s ausgedrückt wird. Aus der Spannung ergibt sich dann die durchschnittliche Temperatur während der Dauer des Versuchs. Sie ist nach diesem Verfahren durch die in der ganzen Zeit geleistete Arbeit der Wärme bestimmt und erfährt nur nach dem Durchschnitt des Barometerstandes noch eine geringe Korrektur.

Hat man für irgend eine Durchschnittstemperatur bei einer bestimmten Kugelhöhre den Wasserverlust festgestellt, so kann man mittels der Formel

$$p_1 = \frac{s_1 p T_1^2}{s T^2}$$

leicht für jede andere Temperatur den entsprechenden Verlust berechnen. Die auf solche Weise gefundenen Resultate lassen sich auf Versuchsrohren von anderen Dimensionen durch einfache Proportionalität übertragen, und es sind deshalb nachstehend nur die für die später beschriebene Versuchsrohre No. 8 in je 24 Stunden geltenden Wasserverluste angegeben.

| | | | |
|------------|-------------|--------------|--------------|
| 0° 3.42 mg | 10° 7.33 mg | 20° 14.89 mg | 30° 28.90 mg |
| 1° 3.70 " | 11° 7.88 " | 21° 15.95 " | 31° 30.82 " |
| 2° 4.00 " | 12° 8.47 " | 22° 17.07 " | 32° 32.86 " |
| 3° 4.33 " | 13° 9.10 " | 23° 18.27 " | 33° 34.93 " |
| 4° 4.68 " | 14° 9.79 " | 24° 19.53 " | 34° 37.21 " |
| 5° 5.05 " | 15° 10.52 " | 25° 20.86 " | 35° 39.60 " |
| 6° 5.44 " | 16° 11.29 " | 26° 22.32 " | 36° 42.10 " |
| 7° 5.85 " | 17° 12.12 " | 27° 23.81 " | 37° 44.75 " |
| 8. 6.30 " | 18° 12.97 " | 28° 25.40 " | 38° 37.56 " |
| 9. 6.80 " | 19° 13.92 " | 29° 27.10 " | 39° 50.55 " |

| | | | |
|--------------|--------------|--------------|---------------|
| 40° 53.72 mg | 44° 67.94 mg | 48° 85.49 mg | 52° 106.93 mg |
| 41° 56.99 " | 45° 72.02 " | 49° 90.49 " | 53° 113.08 " |
| 42° 60.38 " | 46° 76.28 " | 50° 95.74 " | 54° 119.39 " |
| 43° 64.06 " | 47° 80.78 " | 51° 101.19 " | 55° 126.15 " |

Bei gleichmässiger Verteilung durch graphische Ergänzung erhält man die folgende nur wenig abweichende Reihe.

| | | | |
|------------|-------------|--------------|--------------|
| 0° 3.42 mg | 14° 9.82 mg | 28° 25.38 mg | 42° 60.69 mg |
| 1° 3.70 " | 15° 10.55 " | 29° 27.10 " | 43° 64.18 " |
| 2° 4.00 " | 16° 11.32 " | 30° 28.92 " | 44° 68.11 " |
| 3° 4.32 " | 17° 12.14 " | 31° 30.84 " | 45° 72.23 " |
| 4° 4.66 " | 18° 13.01 " | 32° 32.86 " | 46° 76.54 " |
| 5° 5.02 " | 19° 13.93 " | 33° 34.98 " | 47° 81.04 " |
| 6° 5.41 " | 20° 14.91 " | 34° 37.20 " | 48° 85.73 " |
| 7° 5.83 " | 21° 15.95 " | 35° 39.53 " | 49° 90.61 " |
| 8° 6.28 " | 22° 17.06 " | 36° 41.98 " | 50° 95.68 " |
| 9° 6.77 " | 23° 18.24 " | 37° 44.59 " | 51° 100.95 " |
| 10° 7.30 " | 24° 19.49 " | 38° 47.38 " | 52° 106.55 " |
| 11° 7.87 " | 25° 20.82 " | 39° 50.36 " | 53° 112.75 " |
| 12° 8.48 " | 26° 22.24 " | 40° 53.53 " | 54° 119.25 " |
| 13° 9.13 " | 27° 23.76 " | 41° 56.89 " | 55° 126.15 " |

Diese Reihe hat zwar den Vorzug grösserer Regelmässigkeit, aber weil sich die Einzelwerte nicht so unmittelbar an die direkt beobachteten Dampfspannungen anschliessen, so habe ich nur die Angaben der ersten Tabelle benutzt.

Um die aus der Verdampfung abgeleiteten mit den durch das Thermometer gemessenen Temperaturen zu vergleichen, bediente ich mich für höhere Temperaturen meist eines verschliessbaren Kastens von 120 cm Länge, 70 cm Breite und 70 cm Höhle, welcher an beiden Seiten durch eiserne mit Gasbrennern versehene Röhren erwärmt werden konnte. In der Mitte des Raumes stand ein weiter Blecheimer, der mit trockenem Sande gefüllt wurde und die zu den Versuchen dienenden Glasflaschen aufnahm, so dass sie vom Sande ganz bedeckt wurden. Die Flaschen waren von drei Thermometern umgeben, deren Angaben wieder bei jeder Wägung der Glasröhren eine Messung der Temperatur von der in der Flasche befindlichen Schwefelsäure kontrollierte. In einzelnen Fällen, die an den grösseren Temperaturschwankungen kenntlich sind, wurde die Versuchsflasche frei in den erwärmten Kasten gebracht und die Temperatur an einem in der Schwefelsäure liegenden Thermometer abgelesen. Dieses Ablesen geschah bei allen Versuchen im erwärmten Raume mindestens sechsmal an einem Tage, nachdem vorher die Wendepunkte für die Zunahme oder Abnahme der Wärme festgestellt waren. Aus der Zwischenzeit zwischen den einzelnen Beobachtungen ergaben sich dann die mittleren Werte.

Für die Versuche bei gewöhnlicher Temperatur brachte ich die Versuchsflaschen in ein abgeschlossenes ungeheiztes Zimmer von möglichst gleichmässiger Temperatur und mass die letztere durch ein vorher geprüftes Sixthermometer, dessen Maximum und

Minimum in den meisten Fällen an einem Tage nicht über 0.7° , oft nicht 0.4° von einander abwichen. Als Durchschnittstemperatur nahm ich dann einfach das Mittel der täglichen Maxima und Minima, und ich habe zur besseren Beurteilung der Zuverlässigkeit der ermittelten Durchschnittstemperatur bei jedem Versuche die grössten dabei überhaupt beobachteten Unterschiede in den täglichen Angaben der Thermometer hinzugefügt. Es liegt wohl am nächsten, den Normalverlust der Glasröhren durch Beobachtungen bei 0° festzustellen, aber da es mir dazu an einer geeigneten Vorrichtung fehlte, so habe ich solche Versuche bei gewöhnlicher Luftwärme dazu benutzt, bei welchen die Temperaturschwankungen am geringsten waren. Dieselben sind in der nachstehenden Tabelle für jede Kugelhöhre zuerst angegeben.

| Bezeichnung der Glasröhren | Durchschnitts-temperatur | Grösste Ab-weichung der Temperatur | Wasserverlust in 24 Stunden | Versuchsdauer | Ohne Rücksicht auf den Druck berechnete Spannung | Nach dem Barometer-stande b korrigierte Spannung s | Der Spannung s entsprechende Temperatur |
|----------------------------|--------------------------|------------------------------------|-----------------------------|---------------|--|--|---|
| Nr. | Grad | Grad | mg | Tage | mm | | Grad |
| 1 | 11.2 | 0.8 | 4.54 | 7 | | $b = 761.0$ | |
| 1 | 4.9 | 0.7 | 2.77 | 6 | 6.45 | $b = 758.8$ $s = 6.43$ | 4.8 |
| 1 | 36.2 | 1.8 | 23.8 | 1 | 43.7 | $b = 765.2$ $s = 44.0$ | 35.9 |
| 1 | 45.7 | 2.6 | 44.5 | 1 | 71.9 | $b = 763.1$ $s = 72.4$ | 45.3 |
| 1 | 9.87 | 0.7 | 4.14 | 5 | 9.03 | $b = 774.7$ $s = 9.25$ | 10.1 |
| 1 | 11.8 | 0.7 | 4.62 | 6 | 10.1 | $b = 759.2$ $s = 10.1$ | 11.5 |
| 2 | 11.2 | 0.8 | 4.54 | 7 | | $b = 761.0$ | |
| 2 | 4.9 | 0.7 | 2.80 | 6 | 6.5 | $b = 758.8$ $s = 6.48$ | 4.9 |
| 2 | 45.7 | 2.6 | 41.1 | 1 | 71.2 | $b = 763.1$ $s = 71.4$ | 45.0 |
| 2 | 36.3 | 2.0 | 23.8 | 1 | 43.75 | $b = 766.7$ $s = 44.2$ | 36.0 |
| 2 | 27.7 | 0.8 | 14.2 | 1 | 27.6 | $b = 776.0$ $s = 28.1$ | 28.0 |
| 2 | 26.7 | 1.5 | 13.05 | 2 | 25.4 | $b = 777.2$ $s = 25.9$ | 26.6 |
| 2 | 9.87 | 0.7 | 4.06 | 5 | 8.9 | $b = 774.7$ $s = 9.08$ | 9.9 |
| 3 | 11.2 | 0.8 | 4.8 | 7 | | $b = 761.0$ | |
| 3 | 4.9 | 0.7 | 2.92 | 6 | 6.3 | $b = 758.8$ | 4.5 |
| 3 | 45.7 | 2.6 | 44.5 | 1 | 72.8 | $b = 763.1$ $s = 73.0$ | 45.3 |
| 3 | 36.3 | 2.0 | 24.3 | 1 | 42.4 | $b = 766.7$ $s = 42.7$ | 35.4 |
| 3 | 9.87 | 0.7 | 4.28 | 5 | 8.9 | $b = 774.7$ $s = 9.06$ | 9.8 |
| 3 | 11.8 | 0.7 | 5.07 | 6 | 10.4 | $b = 759.2$ | 11.9 |
| 3 | 9.8 | 2.5 | 4.56 | 4 | 9.3 | $b = 757$ $s = 9.3$ | 10.2 |
| 4 | 11.2 | | 4.0 | 7 | | $b = 761.0$ | |
| 4 | 4.9 | 0.7 | 2.52 | 6 | 6.47 | $b = 758.8$ | 4.9 |
| 4 | 36.2 | 1.8 | 21.2 | 1 | 44.3 | $b = 765.2$ $s = 44.7$ | 36.2 |
| 4 | 36.3 | 2.0 | 20.5 | 1 | 42.8 | $b = 766.7$ $s = 43.2$ | 35.6 |
| 5 | 11.2 | | 4.79 | 7 | | $b = 761.0$ | |
| 5 | 4.9 | 0.7 | 3.02 | 6 | 6.5 | $b = 758.8$ | 4.9 |
| 5 | 36.3 | 2.0 | 24.8 | 1 | 43.2 | $b = 766.7$ $s = 43.7$ | 35.8 |
| 5 | 27.3 | 1.6 | 14.3 | 1 | 26.5 | $b = 775.6$ $s = 27.1$ | 27.4 |
| 5 | 55.2 | 4.5 | 71.5 | 1 | 111.0 | $b = 779$ $s = 113.6$ | 54.3 |
| 5 | 51.8 | 5.5 | 60.0 | 1 | 94.8 | $b = 775$ $s = 96.5$ | 51.0 |
| 5 | 52.1 | 3.8 | 61.8 | 1 | 97.3 | $b = 770.5$ $s = 98.3$ | 51.3 |

| Bezeichnung der Glasröhren | Durchschnitts-temperatur | Grösste Ab-weichung der Temperatur | Wasserverlust in 24 Stunden | Versuchsdauer | Ohne Rücksicht auf den Druck berechnete Spannung | Nach dem Barometer-stande <i>b</i> korrigierte Spannung <i>s</i> | Der Spannung <i>s</i> entsprechende Temperatur |
|----------------------------|--------------------------|------------------------------------|-----------------------------|---------------|--|--|--|
| Nr. | Grad | Grad | mg | Tage | mm | | Grad |
| 6 | 11.2 | | 5.07 | 7 | | $b = 761.0$ | |
| 6 | 4.9 | 0.7 | 3.22 | 6 | 6.53 | $b = 758.8$ | 5.0 |
| 6 | 36.2 | 1.8 | 26.3 | 1 | 44.1 | $b = 765.2$ $s = 44.5$ | 36.1 |
| 7 | 11.2 | | 9.6 | 7 | | | |
| 7 | 16.0 | 1.4 | 13.5 | 4 | 13.4 | $b = 760.2$ $s = 13.4$ | 15.9 |
| 7 | 11.8 | 0.7 | 9.92 | 6 | 10.13 | $b = 759.2$ $s = 10.10$ | 11.6 |
| 7 | 9.87 | 0.7 | 8.6 | 5 | 8.96 | $b = 774.7$ $s = 9.14$ | 10.0 |
| 7 | 9.82 | 2.5 | 8.82 | 4 | 9.17 | $b = 757$ $s = 9.12$ | 9.9 |
| 8 | 11.2 | 0.8 | 8.0 | 7 | | | |
| 8 | 4.9 | 0.7 | 5.05 | 6 | 6.45 | $b = 758.8$ $s = 6.43$ | 4.8 |
| 8 | 45.7 | 2.6 | 75.0 | 1 | 73.0 | $b = 763.1$ $s = 73.2$ | 45.6 |
| 8 | 36.2 | 1.8 | 41.8 | 1 | 43.6 | $b = 765.2$ $s = 43.8$ | 35.8 |
| 8 | 36.3 | 2.0 | 42.0 | 1 | 44.6 | $b = 766.7$ $s = 45.0$ | 36.4 |
| 8 | 27.7 | 0.8 | 24.8 | 1 | 27.4 | $b = 776.0$ $s = 27.9$ | 27.9 |
| 8 | 15.7 | 2.4 | 10.7 | 6 | 12.9 | $b = 761.2$ | 15.3 |
| 8 | 16.2 | 2.2 | 11.2 | 7 | 13.4 | $b = 765.5$ $s = 13.5$ | 16.0 |
| 8 | 26.7 | 1.5 | 23.1 | 2 | 25.6 | $b = 777.2$ $s = 26.1$ | 26.8 |
| 8 | 10.3 | | 7.4 | 3 | 9.2 | $b = 777.0$ $s = 9.38$ | 10.4 |
| 8 | 9.87 | 0.7 | 7.1 | 5 | 8.8 | $b = 774.7$ $s = 8.96$ | 9.7 |
| 8 | 11.8 | 0.7 | 8.2 | 6 | 10.15 | $b = 759.2$ | 11.5 |
| 8 | 11.8 | 1.2 | 8.3 | 3 | 10.35 | $b = 753.0$ $s = 10.25$ | 11.7 |
| 8 | 9.8 | 2.5 | 7.32 | 4 | 9.15 | $b = 757$ $s = 9.1$ | 9.9 |

Die Versuche von den grössten Temperaturschwankungen, also zugleich der grössten Unsicherheit für die gefundene Durchschnittstemperatur, zeigen die bedeutendsten Abweichungen zwischen der nach der Verdampfung berechneten der letzten und der mit dem Thermometer gemessenen Temperatur der zweiten Spalte. Sie steigt für einige Versuche (über oder nahe an 50°) bis 0.9° , und zwar sind bei dieser Temperatur die von mir überhaupt erhaltenen Werte meist geringer, so dass es scheint, als ob bei höherer Temperatur die Absorption des Wasserdampfes durch die Schwefelsäure nicht mehr schnell oder vollständig genug erfolgt.

Für die gewöhnliche Lufttemperatur kommt nur bei der Glasröhre Nr. 3, mit welcher überhaupt die grössten Unterschiede gefunden wurden, zweimal eine Abweichung bis 0.4° vor, während in vielen Fällen die Abweichungen geringer sind, als sie beispielsweise im Sommer zwischen dem Mittel aus wiederholten Ablesungen und dem des Sixthermometers in einem ungeheizten Zimmer sich ergeben. Die Korrektur nach dem Barometerstande betrug bis 0.4° , und man erhält deshalb schon ohne dieselbe für viele Zwecke genügende Resultate, die bei Beobachtungen über eine längere Reihe von Tagen durch den gewöhnlichen Wechsel im Luftdruck noch genauer werden. Das unregelmässige Steigen und Fallen der Temperatur in kürzeren Zwischenzeiten bleibt bei der gewöhn-

lichen Messung unbeachtet, bei der Verdunstung dagegen kommt es zur vollen Geltung. Daher müssen sich geringe Unterschiede in der durchschnittlichen Temperatur des Erdbodens in verschiedener Tiefe oder des Waldes und des freien Feldes durch gleichzeitige Beobachtung der Verdampfungs menge mit der grössten Sicherheit erkennen lassen. In welchem Grade die Temperaturmessungen durch Verdampfung mit den Angaben des Thermographen übereinstimmen, ist erst später festgestellt, doch konnten nach den mitgetheilten und anderen von mir ausgeführten Versuchen die Abweichungen nicht bedeutend sein, und ich konnte ohne weiteres nach meinen Erfahrungen allein meine Messungsmethode für meteorologische Zwecke überall da unbedingt empfehlen, wo es sich um Vorgänge mit geringen Temperaturschwankungen handelt.

So setzte ich für eine solche Beobachtung eine 16 cm hohe Versuchsflasche in die Erde, so dass sie eben bedeckt wurde und die Kugelhöhre mit dem verdunsteten Wasser 9 cm unter der Erdoberfläche lag. Vor dem Anfange dieses Versuches hatte ich durch gleich tief eingelassene Thermometer in zehntägiger Beobachtung festgestellt, dass zu jener Zeit und an jener Stelle das Mittel vom täglichen Maximum und Minimum zwischen 11 und 12 Uhr Vormittags annähernd erreicht wurde. Vom 28. Mai bis zum 24. Juni 1888, der Zeit des eigentlichen Versuches, wurden dann täglich um 11 $\frac{1}{2}$ Uhr Vormittags die Temperaturangaben der in der Erde steckenden Thermometer notiert und ausserdem möglichst die Grenztemperatur festgestellt. Die Schwankungen betragen bei vorwiegend kalter Witterung im Mittel nur 2°, der grösste beobachtete Unterschied im Stande des Thermometers an einem Tage war 4.2°, und an vier Tagen macht er noch nicht einen Grad aus. Daher war das aus der Verdunstung gefundene Resultat ohne weitere Korrektur zu benutzen, aus demselben ergab sich eine Temperatur von 14.0°, während aus der direkten Messung die mittlere Temperatur von 14.2 berechnet wurde.

Für weiter abstehende Temperaturgrenzen lässt sich natürlich die mittlere Temperatur auf die angegebene Weise ohne weiteres nicht ableiten, weil die Verdunstung zu der Temperatur nicht in linearer Abhängigkeit steht. Sind jedoch wie bei der Lufttemperatur jene Grenzen annähernd bekannt, so lässt sich mit Hilfe eines Abzugsgliedes der wirkliche Mittelwert ebenfalls bestimmen. Nach 13jähriger Beobachtung sind in Bremen die täglichen Temperaturschwankungen im Mai und Juni mit einem Betrage von 10.3° und 10.2° am höchsten, und ich wählte deshalb diese ungünstigste Jahreszeit aus, um vergleichende Messungen der Lufttemperatur anzustellen. Die Abweichungen müssen in den übrigen Monaten entsprechend geringer ausfallen. In der Nähe der Stelle des Gartens, die bei dem vorher beschriebenen Versuche benutzt wurde, stellte ich, vor direkten Sonnenstrahlen geschützt, die für das Messen der Verdampfung bestimmte Flasche, ein gewöhnliches, in $\frac{1}{10}$ ° geteiltes und ein Sixthermometer auf.

Die Beobachtungszeit erstreckte sich wie bei dem früheren Versuche auf die Zeit vom 28. Mai bis zum 24. Juni 1888. Ich fand nun nach zwei in derselben Flasche aufgestellten Versuchsröhren von verschiedenen Dimensionen 15.2° und 15.3° als Durchschnittstemperatur. Die mittlere Temperaturschwankung betrug in diesem Jahre abweichend wenig und nur 8° , bringt man daher bei der mittleren Temperatur von 15° für die Hälfte des Tages in gleicher Dauer Wärmegrade von 15° bis 19° und für die andere Hälfte des Tages Temperaturen bis 11° in Anrechnung, so erhält man als Mittel eine Verdunstung von 10.67 mg, welche 15.19° statt 15.0° anzeigen würde. Das Abzugsglied betrug also 0.19° , so dass meine Beobachtung eine Durchschnittswärme von 15.0° bis 15.1° ergab. Für die normale Wärmeschwankung von 10° wäre 0.25° das Abzugsglied gewesen und der Fehler meiner Messung hätte demnach bei Annahme derselben, ohne eigene Bestimmung der Schwankung, in diesem ungünstigen Falle 0.06° betragen. Eine Korrektur wegen des Luftdrucks erwies sich wegen des mittleren Barometerstandes von 761.5° nicht erforderlich, und sie wird bei länger dauernden Versuchen niemals beträchtlich sein. Die direkte Beobachtung am Thermometer ergab statt 15.1° und 15.2° , als Mittel vom täglichen Maximum und Minimum 15.3° , als Mittel der für die Durchschnittstemperatur am hiesigen Orte bewährten Ablesungen um 8 Uhr Abends 15.2° . Es scheint fast als wenn das Abzugsglied nicht ganz in Anrechnung zu bringen wäre, und es sind unten noch weitere Beobachtungen darüber mitgeteilt. In einem anderen Falle fand ich nach der Formel $\frac{1}{2}$ $\left(\frac{8a + 2p + 8p}{3} + \frac{\text{Min} + \text{Max.}}{2} \right)$ am Thermometer das Mittel 17.2° und aus zwei Beobachtungen der Verdunstung mit verschiedenen Flaschen und Röhren 17.0° und 17.2° .

Nachdem so die neue Bestimmungsmethode der unmittelbaren Temperaturmessung gegenüber in zahlreichen Fällen sich bewährt hatte, habe ich noch vielfache Beobachtungen über den Grad der Uebereinstimmung der einzelnen Bestimmungen mit verschiedenen Versuchsröhren nach der Verdampfung allein angestellt. Die Resultate konnten natürlich nach den vorausgegangenen Erfahrungen nicht bedeutend von einander abweichen, aber es erschien nur den verschiedenartigen beim Justieren der Röhren möglichen Fehlern gegenüber von Wichtigkeit, die Grösse der Abweichung festzustellen. Ich fand dabei eine ähnlich befriedigende Uebereinstimmung wie in den früheren Versuchen, die geringeren Abweichungen scheinen hauptsächlich von dem nach der Aufstellung der Röhren innerhalb der Flaschen verschiedenen Abstände ihrer Oeffnungen von der Oberfläche der Schwefelsäure herzurühren. Ein Beispiel mag von diesen Versuchen genügen. In einem kleineren abgeschlossenen Raume einer Kirche mit sehr dicken Mauern wurden zwei Kugelhöhren mit einer Verdampfungs- menge von 8 und von 2.96 mg Wasser in 24 Stunden bei 11.2° an der Innenseite der Kirche, und zwei andere von 9.43 und

3.17 mg Verdunstung 6 Meter von den ersteren entfernt unmittelbar an der äusseren Umfassungsmauer aufgestellt. Sie blieben dort vom 13. Juli bis zum 23. August, und der Wasserverlust ergab nachher für die beiden Röhren an der Innenseite der Kirche eine Durchschnittswärme von 15.51° und 15.47° , für die beiden anderen von 15.8° und 15.7° . In dieser Jahreszeit der zunehmenden Wärme war also nach der Aussenseite der Kirche hin eine etwas höhere Temperatur nachgewiesen und der grösste wahrgenommene Unterschied für neben einander stehende Apparate betrug $\frac{1}{10}$ Grad.

Wie bereits bemerkt, wichen die zu den beschriebenen Versuchen benutzten Kugelhöhren sowohl im Durchmesser als namentlich in der Länge bedeutend von einander ab, da sie jedoch übereinstimmende Temperaturen ergaben, so kann ich mich darauf beschränken, über eine derselben genauere Angaben zu machen. Die Glasröhre Nr. 8 mit einer Kugel hatte einen inneren Durchmesser von $6\frac{1}{2}$ mm, in der Kugel von 18 mm, die Länge des engeren Teils der Röhre betrug 82 mm und die Entfernung der Wasserstandsmarke in der Kugel von der Oeffnung der Röhre 91 mm. Wie aus der Tabelle ersichtlich ist, verliert diese Kugelhöhre bei 11.2° und einem Barometerstande von 761 mm in 24 Stunden 8 mg an trockene Luft. Auch die Röhre Nr. 7 war, wie schon erwähnt wurde, eine einfache Kugelhöhre, sie stimmt in ihren Resultaten besonders gut mit Nr. 8 überein, und die aus beiden in verschiedenen Flaschen, aber unter übrigens gleichen Umständen verdunstenden Wassermengen hielten sich in allen Versuchen innerhalb der Grenzen von 1 zu 1.211 und zu 1.205. Da man geringe Aenderungen im Querschnitt der Röhren schwer erkennt, so ist es unerlässlich, für alle zu genauen Versuchen bestimmten Röhren durch etwa achttägige Beobachtung unter gleichzeitiger Wärmemessung oder mit Hülfe einer schon justierten Röhre die Menge des in 24 Stunden verdunstenden Wassers direkt zu bestimmen.

Für länger dauernde Beobachtungen bis zu einem Zeitraume von vier Wochen empfehle ich Kugelhöhren von ungefähr 70 mm Länge, 6 mm innerer Weite und einem Kugeldurchmesser von 20 mm, für Beobachtungen bis zu 12 Wochen eine Länge der Röhren von 60 mm, eine Weite von 3 mm und einem Kugeldurchmesser von 30 mm. Für Beobachtungen von einem oder einigen Tagen nimmt man dagegen der grösseren Genauigkeit wegen kürzere und weitere Röhren.

Die zur Bestimmung der Temperatur der äusseren Luft mit dem Wasser-Thermointegrator in Bremen erforderlichen Abzugsglieder berechnen sich für die einzelnen Monate des Jahres auf: Januar -0.1° , Februar -0.1° , März -0.2° , April -0.2° , Mai -0.2° , Juni -0.25° , Juli -0.3° , August -0.25° , September -0.2 , Oktober -0.2° , November -0.1° , Dezember -0.1° .

Mit leichter verdunstenden Flüssigkeiten, wie mit Aether, lässt sich unzweifelhaft eine grössere Empfindlichkeit für Temperatur-

unterschiede erreichen, aber die grössere Menge der verdampfenden Flüssigkeiten ändert die Entfernung ihrer Oberfläche von der Oeffnung der Röhre weit schneller, und es wird deshalb nötig, für solche Messungen engere Röhren mit grösseren Kugeln zu verwenden. Nach den bisherigen Versuchen erwies sich der Aether selbst für konstante Verdampfungswerte unbrauchbar, wahrscheinlich weil seine Anziehung zum Wasserdampf hinderlich wird. Auch mit Schwefelkohlenstoff konnten anfangs übereinstimmende Resultate nicht erhalten werden, als ich die Kugelhöhre in freier Luft in einem geheizten Zimmer neben einem empfindlichen Quecksilberthermometer aufgestellt hatte. Der auf den Schwefelkohlenstoff wirksame Wechsel in der Temperatur ist dabei zu gross, um durch die Beobachtung des Quecksilberthermometers gleichartig festgestellt werden zu können. Als aber die Kugel des Integrators neben zwei gleichzeitig benutzte Thermometer in einen grösseren mit Sand gefüllten Behälter gebracht wurde, erhielt ich bei sehr viel geringeren Schwankungen in der Temperatur auch im geheizten Zimmer gute Resultate.

Geht man von dem bekannten von Graham aufgestellten Gesetze aus, dass die Ausströmungsgeschwindigkeiten verschiedener Gase bei gleichem Dampfdruck den Quadratwurzeln aus ihren spezifischen Gewichten umgekehrt proportional sind, so erhält man

die Gleichung $\frac{v_s}{v_w} = \sqrt{\frac{d_w}{d_s}}$, wenn v_s und v_w die Volumina des

Schwefelkohlenstoffs und des Wasserdampfs, d_s und d_w ihre spezifischen Gewichte bedeuten. Setzt man ferner in der von mir angegebenen Weise*) eine einfache Abhängigkeit der Diffusion von dem Dampfdruck und dem Quadrate der absoluten Temperatur voraus, so findet man für dieselbe Temperatur und die Dampfspannungen p_s und p_w des Schwefelkohlenstoffs und Wassers

$\frac{v_s}{v_w} = \frac{p_s}{p_w} \sqrt{\frac{d_w}{d_s}}$ oder für die Gewichtsmengen g_s und g_w an

Stelle der Volumina $\frac{g_s}{g_w} = \frac{p_s}{p_w} \frac{d_s}{d_w} \sqrt{\frac{d_w}{d_s}} = \frac{p_s}{p_w} \sqrt{\frac{d_s}{d_w}}$. Nun er-

gab nach meinen Beobachtungen dieselbe Kugelhöhre bei einer Temperatur von 4° in 24 Stunden einen Gewichtsverlust von 1.767 mg, wenn sie mit Wasser gefüllt war, bei der Verdunstung von Schwefelkohlenstoff dagegen unter gleichen Umständen einen Gewichtsverlust von 94.08 mg. Nach Regnault's**) Formel

$$\log F = a + b \alpha^t + c \beta^t$$

beträgt der Dampfdruck des Schwefelkohlenstoffs bei 4° 153.3 mm, sein spezifisches Gewicht nach Gay-Lussac 2.6447, während für Wasserdampf bei 4° eine Dampfspannung von 6.097 mm und das spezifische Gewicht 0.6235 angegeben werden. Berechnet man

*) Wiedem. Ann. 34, 1047.

**) Mem. de l'acad. 1862, 26, 335.

demnach das Verhältnis $\frac{g_s}{g_w}$, so findet man den Wert 51.8, welcher mit dem thatsächlich beobachteten $53.2 = \frac{94.08}{1.767}$ annähernd übereinstimmt. Berücksichtigt man die noch vorhandene Unsicherheit wegen der Dampfspannung des Schwefelkohlenstoffs, so muss die Uebereinstimmung als eine hinreichend befriedigende bezeichnet werden. Die Diffusionskonstante erweist sich demnach für die beiden fraglichen Dämpfe in Wirklichkeit der Quadratwurzel aus den Dichten umgekehrt proportional. Die Abweichung der unter dieser Annahme berechneten und der durch die Beobachtung gefundenen Zahl würde nämlich höchstens 3 Prozent betragen, und zwar für den Fall, dass die Dampfspannung des Schwefelkohlenstoffs durch 153.3 mm ganz genau ausgedrückt sein sollte.

Die Gleichmässigkeit, mit welcher die Verdunstung und Diffusion des Schwefelkohlenstoffs erfolgt und die Empfindlichkeit dieser Vorgänge gegen geringe Veränderungen in der Temperatur gaben sich bei allen Versuchen mit genau kontrollirbarer Temperatur sehr deutlich zu erkennen, so dass der Schwefelkohlenstoff als ein für thermographische Zwecke besonders geeignete Flüssigkeit angesehen werden muss. Zwei Kugelhöhren, welche in einem ungeheizten Zimmer 15 cm von einander und möglichst vor Luftbewegung geschützt aufgestellt waren, zeigten bei Wägungen nach einem und nach zwei Tagen in einer elftägigen Beobachtungsreihe das Verhältnis der Gewichtsverluste 1 : 1.0223 — 1.0211 — 1.0218 — 1.0222 — 1.0217 — 1.0218 für Temperaturen von 10° bis 15° und Barometerstände von 754 bis 767 mm, während der ganze Verlust am Ende des Versuchs 1 : 1.0217 ergab. Die grösste Abweichung betrug demnach 0.0006 vom Gewichtsverluste der ersten Röhre, was nach der Verdampfungs menge eines Tages einer Genauigkeit von $\frac{1}{79}^{\circ}$ C. entsprach. Dieser Fehler scheint ausserdem noch vorwiegend von der Ungenauigkeit des Wägens abhängig zu sein, denn die Abweichungen nach der einen Richtung wechseln mit den entgegengesetzten fast regelmässig ab. Je längere Zeit der Versuch dauert, um so genauer wird das Resultat; die obige Grenze bezieht sich, wie bemerkt, auf Zeiträume von einem und meistens zwei Tagen. Wegen der geringeren Menge des verdunstenden Wassers ist für dieses, selbst bei erheblich grösserer Weite der Verdunstungsröhren, die Empfindlichkeit wesentlich geringer und die Abweichungen betragen bei möglichst gleicher Erwärmung der Röhren nach besonders ausgeführten Versuchen für den einzelnen Tag immer noch $\frac{1}{8}^{\circ}$ C. Für einen Zeitraum von 2 bis 4 Tagen sinken sie dagegen schon auf $\frac{1}{11}^{\circ}$ bis $\frac{1}{20}^{\circ}$.

Der Gewichtsverlust des verdunstenden Schwefelkohlenstoffs wird nach Regnault's Angaben über die Dampfspannung in derselben Weise berechnet wie beim Wasser, nur macht sich für die dem Siedepunkte schon näheren Temperaturen über $+ 5^{\circ}$ noch ein additives Glied an der Funktion bemerklich. Ich habe das-

selbe empirisch unter Anwendung von graphischer Interpolation bestimmt, bis zu 14° ist es noch gering, aber bei 22° macht es schon einen Unterschied von einem Zentesimalgrad aus. Das additive Glied lässt sich durch α^{t-c} mit den Werten $\log \alpha = 0.10296$ und $c = 23$ hinreichend genau ausdrücken, und es ergibt sich demnach die Formel für die Berechnung des Gewichtes vom

$$\text{verdampfenden Schwefelkohlenstoff } p_1 = \frac{s_1 p T_1^2}{s T^2} + \alpha^{t-c}.$$

Berechnet man dasselbe Gewicht nach Stefan's*) Formel

$p_1 = \frac{d}{l} \log \frac{b}{b-s_1}$ für die Diffusionskonstante d , die Länge der Röhre l und den Barometerstand b , so findet man etwas kleinere

Werte als durch $p_1 = \frac{s_1 p T_1^2}{s T^2}$ allein. Für den Ausdruck $\frac{p}{s T^2}$

erhielt ich nach der Methode der Wahrscheinlichkeitsrechnung aus einer Reihe von Beobachtungen an der oben erwähnten Kugelhöhre den Wert 0.0000003344 mit dem wahrscheinlichen Fehler 7 in der letzten Stelle. Nach demselben kann man die Gewichtsverluste für Temperaturen bis 5° genau berechnen, für höhere Temperaturen kommt der Ausdruck α^{t-c} hinzu. Ein dem letzteren entsprechender Wert fand sich bei der Wasserdunstung nicht angezeigt, sie erfolgte also nach einem einfacheren Vorgange, was vielleicht darauf beruht, dass die Versuchstemperaturen vom Siedepunkte des Wassers noch weit abstanden.

Wie schon erwähnt, erhielt ich mit dem S. J.***) wegen seiner grossen Empfindlichkeit erst dann übereinstimmende Resultate, als ich denselben mit dem Vergleichsthermometer im ungeheizten Zimmer aufstellte. Später habe ich den schon geprüften W. J. zur Kontrolle benutzt und auf diese Weise die folgenden Resultate erhalten. Bei denselben sind die Barometerstände mit berücksichtigt, die Zunahme im Luftdruck erwies sich nach einigen Versuchen der Abnahme der Verdunstung ziemlich genau proportional.

| Temper. nach d. W. J. | Temper. nach d. S. J. | Abweichung des S. J. |
|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| 4.4° | 4.4° | 0° |
| 3.3° | 3.25° | -0.05° |
| 9.1° | 9.0° | -0.1° |
| 10.35° | 10.35° | 0° |
| 10.0° | 10.0° | 0° |
| 9.5° | 9.4° | -0.1° |
| 10.0° | 9.9° | -0.1° |
| 14.7° | 14.5° | -0.2° |
| 15.0° | 14.8° | -0.2° |
| 13.8° | 13.6° | -0.2° |

*) Wien. Ac. Ber. 68, 385. 1873.

**) Abkürzung S. J. für Schwefelkohlenstoff-Thermointegrator, W. J. für Wasser-Thermointegrator.

Auf meinen Wunsch hatte der Direktor der Hamburger Seewarte, Herr Geh. Admiralitätsrat G. Neumayer zu meiner grossen Dankverpflichtung die Gefälligkeit, eine Vergleichung meiner Apparate mit dem Thermographen der Seewarte zu gestatten, und infolge davon sind von Herrn Dr. L. Grossmann mit aller Sorgfalt eingehende Versuche und Berechnungen mit dem Integrator angestellt. Diese Unterstützung war für mich um so wertvoller, als dadurch neben dem Vergleiche des Integrators mit einem erprobten Thermographen zugleich eine Bestätigung meiner eigenen Beobachtungen möglich geworden ist.

Für die Prüfung der Genauigkeit des Integrators hat Herr Grossmann im Keller der Seewarte, wo die Temperatur sich nur wenig änderte, während eines Zeitraums von 17 Tagen den Integrator mit dem Quecksilberthermometer verglichen. In den drei ersten Tagen betrug die Durchschnittstemperatur nach dem Quecksilberthermometer 15.15° , nach dem Schwefelkohlenstoff-Integrator 15.20° , nach dem Wasser-Integrator 15.43° , in den folgenden 14 Tagen nach dem Quecksilberthermometer 15.53° , nach dem Schwefelkohlenstoff-Integrator 15.48° , nach dem Wasser-Integrator 15.51° . Die Uebereinstimmung ist noch grösser als bei meinen Versuchen im ungeheizten Zimmer und eine so vollständige, dass der Integrator zur Ermittlung der Durchschnittstemperaturen namentlich auch für wissenschaftliche Zwecke vorzugsweise als geeignet angesehen werden muss. Jedenfalls wird er in betreff der Genauigkeit von keinem bekannten Apparate übertroffen, und es ist für die praktische Ausführung sehr wesentlich, dass speziell der Wasser-Integrator es ermöglicht, durch wenige Wägungen die Durchschnittstemperatur für Wochen und Monate in vollkommener Uebereinstimmung mit dem Quecksilberthermometer festzustellen. Die mühsame Berechnung der thermographischen Kurven fällt vollständig fort und man erhält trotzdem das Resultat mindestens in gleicher Zuverlässigkeit, wie mit dem besten Thermographen.

Die Ermittlung der Durchschnittstemperatur der äusseren Luft wird, wie oben erwähnt, durch die Wärmeschwankungen derselben beeinflusst. Wenn jedoch das Verdunstungsgefäss, wie beim Wasser-Integrator, in eine Glasflasche eingeschlossen ist, so wird dadurch der Zutritt der Wärme verzögert, die Extremtemperaturen werden garnicht erreicht, aber die ganze Leistung der vorhandenen Wärme zeigt sich trotzdem in der Verdunstungsmenge. Daher bleibt beim Wasserintegrator die wirkliche Abweichung etwas hinter der nach den Wärmeschwankungen berechneten Korrektur zurück, aber dieser Unterschied kann bei dem geringen Betrage des Abzugsgliedes an sich nur verschwindend klein sein. Selbst die ohne alle Korrektur wegen der Wärmeschwankung gefundenen rohen Werte weichen von den Angaben des Quecksilberthermometers meist noch nicht so weit ab als die Resultate anderer Thermographen. Beim Schwefelkohlenstoff-Integrator sind nach dem Dampfdruck des Schwefelkohlenstoffs

die zur Korrektur nötigen Abzugsglieder etwas grösser und müssen sich wegen der Empfindlichkeit des Apparats voll geltend machen. Sie berechnen sich bei 22° für eine Schwankung von

| | | |
|--------------|----|-----------------|
| 3° | zu | 0.016° |
| 4° | „ | 0.04° |
| 5° | „ | 0.08° |
| 6° | „ | 0.11° |
| 7° | „ | 0.16° |
| 8° | „ | 0.20° |
| 9° | „ | 0.28° |
| 10° | „ | 0.38° |
| 11° | „ | 0.55° |

In einer über mehr als 100 Tage ausgedehnten Beobachtungsreihe mit Mitteltemperaturen von -8° bis zu $+23^{\circ}$ hat Herr Grossmann vergleichende Beobachtungen der beiden Integratoren mit dem Quecksilberthermometer und der Hipp'schen Spirale als einem der besten Thermographen angestellt. Nähere Angaben über diese interessante Beobachtungsreihe sind in Aussicht gestellt, doch kann ich über das Endresultat die Mitteilung machen, dass die oft ganz geringen Abweichungen beim Schwefelkohlenstoff-Integrator in einem Falle bis zu 0.68° , beim Wasser-Integrator ebenso einmal auf 0.65° ansteigen. Bei der Hipp'schen Spirale betrug die grösste Abweichung vom Quecksilberthermometer 0.80° und bei allen Apparaten kamen positive wie negative Schwankungen neben einander vor. Zur Beobachtung der Mitteltemperatur in der freien Luft ist demnach der Integrator mindestens ebenso brauchbar wie die Hipp'sche Spirale.



ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Abhandlungen des Naturwissenschaftlichen Vereins zu Bremen](#)

Jahr/Year: 1889-1890

Band/Volume: [11](#)

Autor(en)/Author(s): Müller-Erzbach W.

Artikel/Article: [Die Verdampfung als Mittel der Wärmemessung. 221-234](#)