[Aus dem hygienischen Institut der Universität Breslau.]

Ueber den Einfluss des Windes auf die Wärmeabgabe todter Objecte.

Von

Dr. Bruno Heymann,
Assistenten am Institut.

Dass die Bewegung der uns umgebenden Luft einen wesentlichen Einfluss auf unsere Körperwärme ausübt, ist eine längst bekannte, geradezu volkstümliche Erfahrungsthatsache: Die angenehm kühlende Wirkung bewegter Fächer oder Tücher, die belebende Kraft eines Luftzuges an schwülen Sommertagen sind Jedermann ebenso geläufig wie die unerwünschte Steigerung des Kältegefühls durch heftigen Wind im Winter oder die vielgefürchtete schnelle Abkühlung einer umschriebenen Körperstelle durch „Zugluft“. Auch der rasche Eintritt allgemeiner starker Kälteempfindung bei schneller Fortbewegung, z. B. bei rascher Fahrt in ungeschlossenem Wagen oder auf dem Deck eines Dampfers, weisen unzweifelhaft darauf hin, dass unser Körper bei raschem Wechsel der uns umgebenden Luft eine weit stärkere Entwärmung erleidet als in ruhiger oder wenig bewegter Luft.

Diese Beobachtungen unter den relativ engbegrenzten Witterungsschwankungen unserer Zone werden in interessanter Weise durch Reiseberichte aus Gegenden mit extremen klimatischen Verhältnissen ergänzt. So berichtet Adolf Erman und Payer, dass selbst in den Polargegenden Sibiriens die höchsten Kältegrade ohne Beschwerde zu ertragen wären, wenn keine stärkeren Winde herrschten, und andererseits erklärt Blandford¹ in seinen „*Climates and Weather of India*“, dass die Fahrt durch

¹ Citirt nach van Bebbber, *Hygienische Meteorologie*. Stuttgart 1895.

das rothe Meer bei 32° und Windstille viel drückender und unerträglicher gewesen sei, als der Aufenthalt im nordwestlichen Indien bei Temperaturen von 44° bis 48° während des Wehens warmer Winde.

So werthvoll nun aber zweifellos alle solche Hinweise auf die erwärmende Wirkung der bewegten Luft auch sind, so gestatten sie gleichwohl keinerlei Schlüsse auf die Grösse dieses Einflusses im Wettstreit mit den anderen, gleichzeitig wirksamen, meteorologischen Factoren. Bei der grossen Mannigfaltigkeit derselben wird Seitens des Beobachters stets die Neigung bestehen, die wahrgenommenen, angenehmen oder unangenehmen Empfindungen lediglich auf das hervorstechendste Witterungsmoment zu beziehen, die anderen Factoren aber, wie den Wechsel der Luft- und Bodentemperaturen, der Luftfeuchtigkeit, der Sonnenstrahlung u. s. f., unberücksichtigt zu lassen.

Ein weit besserer Einblick in den ursächlichen Zusammenhang zwischen Windbewegung und Wärmeabgabe wird offenbar von Versuchen derart zu erwarten sein, dass unter Beibehaltung sonst völlig gleicher Bedingungen ausschliesslich die Luftbewegung in der Umgebung eines warmen Körpers geändert und seine jeweilige Wärmeabgabe bestimmt wird.

Zunächst liegt es nahe, solche Versuche an todtten Objecten anzustellen. Solche physikalische Untersuchungen hat von bau- und gewerbetechnischen Gesichtspunkten aus schon vor Jahrzehnten Schinz¹ in Angriff genommen und in seinem Werke „Die Wärme-Messkunst“ berichtet. Seine Versuchsanordnung war folgende: Ein 3 Zoll hoher und 2 Zoll weiter Cylinder, in dessen Axe ein Thermometer angebracht war, wurde mit warmem Wasser gefüllt und auf Füßen in einen zweiten Cylinder von 4 Zoll Höhe und 3 Zoll Durchmesser gestellt, welcher durch eine centrale Düse am unteren Boden mit einem Gasometer in Verbindung stand. Vermittelst desselben konnte ein gemessenes Volum Luft pro Secunde durch den Apparat geführt und die Geschwindigkeit der dadurch erzeugten Luftströmung genau bestimmt werden. Mit Hülfe einer Secundenuhr wurden sodann auch die Zeiten notirt, die verflossen, bis das Thermometer um einen oder mehrere Grade sank. Da das Gewicht des Wassers in dem inneren Cylinder bekannt war, so ergab sich dann durch einfache Rechnung die transmittirte Wärmemenge.

Zur Erweiterung seiner Versuche benützte Schinz in der einen Versuchsreihe einen blanken Weissblech-Cylinder, in einer weiteren Versuchsreihe denselben, aber mit Kienruss und Mohnöl übertünchten Cylinder.

¹ Schinz, *Die Wärme-Messkunst*. Stuttgart 1858.

Da das Original nicht leicht zugänglich ist, so mögen die von Schinz gewonnenen Ergebnisse in der beigegebenen Tabelle I vollständig Platz finden. Leider ist die Beurtheilung derselben in Folge der gar zu knappen Darstellung der Versuchsbedingungen erschwert. Von ganz besonderer Bedeutung wäre die Angabe gewesen, ob für eine gründliche Durchmischung des Wassers in dem Abkühlungsobjecte Sorge getragen wurde. Des Weiteren vermisst man Angaben über die Dauer jedes Versuchs, über die absoluten Temperaturen der bewegten Luft und des Wassers, über die Lage der Thermometerkugel in dem letzteren u. a. m.

Tabelle I.

**Wärmeabgabe eines Metalcyinders in Windstille und Wind
von verschiedener Stärke (nach Schinz).**

Bei Luftströmungen		19' pro Sec.	2·2' pro Sec.	1·16' pro Sec.	Ohne Strömung
Temperaturdifferenz zwischen Luft und dem Wasser im Cylinder		Wärme-Einheiten	Wärme-Einheiten	Wärme-Einheiten	Wärme-Einheiten
A. Blanker Cylinder (Weissblech)	67°	136	118	115	113
	57	110	104	102	92
	47	92	78	76	73
	37	72	60	58	55
	27	68	48	46	40
	17	43	30	28	22
	7	18	15	14	9
B. Derselbe, mit Kienruss und Mohnöl übertünchte Cylinder	67°	513	300	240	231
	57	360	212	210	186
	47	300	172	168	145
	37	212	138	136	106
	27	132	100	98	72
	17	90	62	60	41
	7	40	22	20	13

Gleichwohl lassen sich, in Uebereinstimmung mit Schinz, aus der Tabelle zwei wichtige Thatsachen mit Sicherheit ableiten, nämlich erstens, dass bewegte Luft eine grössere Wärmeabgabe bewirkt als gleichwarme ruhende Luft, und zweitens, dass schnellere Luftströme die Wärmeabgabe steigern, aber nicht proportional ihrer Geschwindigkeit, sondern mit stetig abnehmender Intensität. Ein mathematisch formulirtes Gesetz für diese Beziehungen wurde von Schinz nicht aufgestellt und ist, bei dem bereits berührten Mangel einiger wesentlichen Angaben, nachträglich nicht mehr herauszufinden.

In Würdigung der grossen Bedeutung, welche der Luftbewegung in hygienischer und praktisch-medicinischer Hinsicht zukommt, hat weiterhin Hiller¹ einige diesbezügliche, physikalische Beobachtungen angestellt. Seine Versuchsanordnung war folgende: Eine mit warmem Wasser von 45° C. gefüllte Glasflasche, durch deren Kautschukstopfen ein empfindliches Thermometer eingeführt war, wurde freischwebend im Zimmer aufgehängt und mittels einer kleinen, nach dem Takte eines Metronoms gedrehten, Handwindmühle Winden verschiedener Stärke (1, 2, 3 und 4^m pro Sec.) jedes Mal so lange ausgesetzt, bis das Thermometer auf 30° gesunken war.

Die Ergebnisse dieser Versuche stellen im Wesentlichen eine Bestätigung der bereits von Schinz beobachteten Erscheinungen dar.

Die Abkühlung der Glasflasche von 44° auf 30° erfolgte:

Tabelle II.

bei Windstille	und + 17° C. in 116 Min.
„ Wind von 1 ^m pro Sec.	„ + 19° C. „ 72 „
„ „ „ 2 ^m „ „ „	„ + 13° C. „ 44 „
„ „ „ 3 ^m „ „ „	„ + 17° C. „ 37 „
„ „ „ 4 ^m „ „ „	„ + 17° C. „ 29 ¹ / ₂ „

Auch hier springt zunächst der mächtige Einfluss der Luftbewegung auf die Wärmeabgabe in die Augen: In Windstille erfolgt die Abkühlung in 116 Minuten; in Wind von nur 4^m, wie er im Freien sehr häufig herrscht, in 29¹/₂ Minuten, also vier Mal so schnell. Des Weiteren zeigt sich auch hier und zwar mit noch grösserer Deutlichkeit wie in den Schinz'schen Versuchen die relativ grösste Wirkung bei den schwächeren Luftströmen, während bei den höheren Geschwindigkeiten zwar auch noch eine Beschleunigung der Abkühlung gegenüber den weniger schnellen zu Stande kommt, nicht aber proportional der Steigerung der Luftbewegung, sondern in einem weit geringeren, abnehmenden Maasse.

Zu ganz ähnlichen, nur in den absoluten Zahlen abweichenden Ergebnissen gelangte Hiller an der bekleideten oder stark angefeuchteten Glasflasche.

Bei seinen vornehmlich praktischen Gesichtspunkten hat Hiller keinen Versuch gemacht, die beobachteten Erscheinungen in ein Gesetz zusammenzufassen. Allerdings würde hierzu seine Versuchsanordnung auch kaum hingereicht haben. Der bedeutsamste Mangel derselben be-

¹ Hiller, Ueber Erwärmung u. Abkühlung des Infanteristen auf dem Marsche und den Einfluss der Kleidung darauf. *Deutsche militär-ärztliche Zeitschrift*. 1885. XIV. Jahrg. S. 362.

steht darin, dass keinerlei Maassregel zur gründlichen Durchmischung der erkaltenden Wassermasse getroffen war. In Folge dessen mussten die kühleren Wassertheilchen nach unten sinken, die wärmeren die obere Hälfte der Kugel erfüllen und hierdurch die Gesamtwärmeabgabe, welche ja ausschliesslich von der Temperatur der Oberfläche abhängt, in uncontrolirbarer Weise beeinflusst werden. Aus demselben Grunde gestatten auch die Angaben des Thermometers keinen Rückschluss auf die Gesamtwärmeabgabe des Körpers, sondern nur auf die Temperaturerniedrigung einer Schicht.

Sodann herrscht bezüglich der zur Einwirkung gekommenen Luftströme insofern eine gewisse Unsicherheit, als erstens die Windgeschwindigkeit nicht mittels Anemometers in möglichster Nähe der Glasflasche bestimmt, sondern als Mittelwerth aus der Zahl der Umdrehungen und der Schaufelgrösse berechnet wurde, und zweitens der mühsame Handbetrieb der Mühle während der ganzen Versuchsdauer wohl kaum mit der erforderlichen Gleichmässigkeit durchzuführen war. Die Verwerthbarkeit der Beobachtungen leidet ferner darunter, dass die Differenzen zwischen der Anfangstemperatur der Kugel und der Lufttemperatur nicht in allen Versuchen übereinstimmen. Endlich ist auch ihre Anzahl und Variirung zu begrenzt, als dass die Ableitung gesetzmässiger Relationen möglich gewesen wäre.

Unbeabsichtigter, ja unerwünschter Weise hat weiterhin noch Pouillet Gelegenheit gehabt, im Verlaufe von Untersuchungen über die directe Sonnenstrahlung den entwärmenden Einfluss des Windes zu beobachten. Stellte er sein Pyrheliometer, einen mit Wasser gefüllten Kupfercylinder, im Freien ohne jeden Windschutz auf, so bemerkte er bei stärkerer Luftbewegung nicht unerhebliche Schwankungen in den Angaben seines Apparates. Zahlenmässige Belege für die Grösse dieses Einflusses finden sich in Cramer's Arbeit über „die Messung der Sonnenstrahlung in hygienischer Hinsicht“. Cramer¹ verglich die Angaben eines Pouillet'schen Pyrheliometers und eines Vacuumthermometers und konnte feststellen, dass das erstere bei gleicher Insolation im Wind wesentlich zu niedrige Angaben machte, während das Vacuumthermometer fast völlig unbeeinflusst blieb und daher eine directe Ablesung der durch die Luftbewegung bedingten Abweichung der Pyrheliometer-Angaben von dem wahren Werthe ermöglichte. In dem einen, hierüber angestellten Versuche ergab sich, dass bei einer Differenz der Sonnen- und Schattentemperatur von ca. 24° das Thermometer des Wassergefässes in unbewegter Luft 3.43°, in bewegter

¹ Cramer, Die Messung der Sonnenstrahlung in hygienischer Hinsicht. *Archiv für Hygiene*. Bd. XX. S. 313.

Luft von 1 bis 2^m Geschwindigkeit nur 2.07° bis 3.15° Erhöhung aufwies. —

Damit sind meines Wissens die bisherigen Beobachtungen über erhöhte Wärmeabgabe tochter Objecte im Winde erschöpft. Sie beweisen insgesamt den mächtigen Einfluss der Luftbewegung für die Entwärmung; sie lassen auch eine gewisse Gesetzmässigkeit zwischen dem Grade der Wärmeabgabe und der Windgeschwindigkeit vermuthen, haben jedoch ein exactes Gesetz hierfür nicht zu erbringen vermocht.

Auf Anregung von Herrn Geh.-Rath Flügge hat daher neuerdings von Schuckmann in den vorstehenden Versuchen die Frage wieder aufgenommen. Seine Versuchsanordnung hatte mit der oben erwähnten Hiller's grosse Aehnlichkeit.

Mit zwei tubusartigen Ansätzen versehene Blechcylinder oder Glaskugeln, welche mit warmem Wasser gefüllt waren, wurden mittels eines, durch ein Tretwerk in Bewegung gesetzten Ventilators Winden verschiedener Stärke ausgesetzt und die im Verlaufe von 5 Minuten erfolgende Abkühlung des Kugelinhaltes an einem, durch den einen Tubus eingeführten Thermometer gemessen. Die Durchmischung des Wassers wurde mittels einer, in dem anderen Tubus befestigten, kleinen leierartigen Kurbel vorgenommen, deren ins Wasser ragendes Ende zwei schaufelartige Flügel trug. Die Kurbel wurde nach 1½, 3 und 4½ Minuten Versuchsdauer je ¼ Minute lang in Bewegung gesetzt.

Als zusammenfassendes Ergebniss seiner Versuche stellte von Schuckmann den Satz auf, dass „die Wärmeabgabe, nach Abzug des auf Ausstrahlung entfallenden Anthells, ceteris paribus, der Quadratwurzel aus der Windgeschwindigkeit proportional ist.“

Indess erschien diese Schlussfolgerung doch noch einer gewissen Bestätigung zu bedürfen. Ein nahliegender Einwand gegen die Beweiskraft der von Schuckmann'schen Versuche besteht darin, dass von Schuckmann die von dem Thermometer angezeigte Temperaturerniedrigung der Gesamtwärmeabgabe des Abkühlungskörpers direct proportional setzte. Die Aufstellung dieser Relation ist nur unter der Voraussetzung berechtigt, dass die intermittirende Durchmischung völlig ausreichte, um eine während der ganzen Versuchsdauer in allen Theilen gleichmässig erkaltende Masse herzustellen. Ob diese Annahme in der That richtig wäre, bedurfte weiterer Versuche mittels einer ausgiebigeren, womöglich dauernden Rührvorrichtung. Dieselbe war auf folgende Weise (s. Fig. 1) leicht anzubringen:

Ich befestigte mittels eines scharfgeschnittenen Schraubengewindes in dem Verschlussstopfen einer Glaskugel ein möglichst glatt polirtes, verti-

cales Messinglager, welches einem gleichfalls sorgfältigst polirten Messingstab zur Führung diente. Derselbe trug an seinem freien Ende ein kleines, aus Aluminium hergestelltes Robinson'sches Schalenkreuz von 30^{mm} Armlänge und 37^{mm} Schalendurchmesser, an seinem anderen, in's Kugelinnere ragenden Ende eine bohnenförmig gestaltete Aluminium-Schaufel von ca. 5^{cm} Länge und ca. 1^{cm} Breite. Dieses (automatische) Rührwerk war so leicht, dass es schon bei Wind von geringer Geschwindigkeit in lebhaftere Drehung gerieth.

Zum Versuch wurde der Hals der Kugel in eine Schlinge aus Draht gelegt, deren um einander gedrehte Enden in S-förmiger Krümmung weiterliefen und mittels Oesen an dem horizontalen Halter eines Stativs

befestigt wurden, so dass das Abkühlungsobject frei schwebend dem Winde ausgesetzt war.

In allen anderen Versuchsbedingungen habe ich mich an die von Schuckmann's möglichst enge angelehnt. Meine Glaskugel hatte genau gleichen Durchmesser wie die seinige, ihr Inhalt betrug in versuchsfertigem Zustande 212^{grm}, also nur 3^{grm} weniger als die von Schuckmann's; Beobachtungsdauer, Temperaturdifferenz zwischen Abkühlungsobject und Zim-

Fig. 1.

merluft, Versuchsraum, Tretwerk und Ventilator, ja sogar der das Tretwerk versehende Diener waren die gleichen; ebenso waren Temperatur und Feuchtigkeit im Versuchsraum dieselben wie zur Zeit der früheren Versuche.

Tabelle III.

$v =$	23	30	38	51	
$T = 15^{\circ}$	2.5	2.6	2.9	3.6	= ϑ
25	4.1	4.6	5.4	6.1	= ϑ
35	6.4	6.6	7.8		= ϑ

Die Ergebnisse meiner Versuche sind in Tabelle III zusammengestellt.

In derselben bedeutet, nach dem Vorgange von Schuckmann's, T die Differenz zwischen Object- und Zimmertemperatur, ϑ die in Celsiusgraden ausgedrückte Temperaturerniedrigung des Objectes, v die Windgeschwindigkeit in Decimetern.

Vergleicht man von Schuckmann's und meine Ergebnisse, so fällt auf, dass die letzteren durchwegs höhere Werthe aufweisen. Da mit Ausnahme der Rührvorrichtung alle Versuchsbedingungen durchaus übereinstimmen, so ist zweifellos der Mehrbetrag in meinen Versuchen auf die gründlichere Durchmischung des Kugelinhaltes zurückzuführen, während von Schuckmann's nur zeitweilig in Bewegung gesetztes Rührwerk offenbar keine so grosse Wirkung hatte. Wird durch diese Differenz von Schuckmann's Schlussatz in Frage gestellt oder nicht? Um dies zu entscheiden, muss zunächst, in Analogie mit von Schuckmann's Berechnungen, der auf die Strahlung entfallende Theil der Wärmeabgabe von der Gesamtwärmeabgabe in Abzug gebracht werden. Diese Reduction ist in Tabelle IV, worin ϑ_L Temperaturerniedrigung durch Leitung bedeutet, geschehen.

Tabelle IV.

$v =$	23	30	38	51	
$T = 15^0$	2.2	2.3	2.6	3.3	$= \vartheta_L$
25	3.6	4.1	4.9	5.6	$= \vartheta_L$
35	5.6	5.8	7.0		$= \vartheta_L$

Sollte von Schuckmann's Gesetz Gültigkeit auch für diese Werthe haben, so musste für alle Versuche mit gleichem T der Quotient $\frac{\vartheta_L}{\sqrt{v}}$ gleich sein. Diese Forderung ergibt sich aus folgender Ueberlegung: Gesetzt, die Wärmeabgabe im Wind gegen die in Windstille würde proportional der Wurzel aus der Windgeschwindigkeit gesteigert, so wäre, wenn man die Wärmeabgabe in der Windstille k (d. i. Konstante) nennt, z. B. für die Versuche mit $T = 15^0$ folgende Reihe von Gleichungen aufzustellen:

$$2.2 = k\sqrt{23} \quad \text{oder} \quad \frac{2.2}{\sqrt{23}} = k$$

$$2.3 = k\sqrt{30} \quad \text{,,} \quad \frac{2.3}{\sqrt{30}} = k$$

$$2.6 = k\sqrt{38} \quad \text{,,} \quad \frac{2.6}{\sqrt{38}} = k$$

$$3.3 = k\sqrt{51} \quad \text{,,} \quad \frac{3.3}{\sqrt{51}} = k,$$

d. h. für alle Versuche mit gleichem T müsste $\frac{\vartheta_L}{\sqrt{v}}$ konstant sein.

Führt man die Berechnung dieser Quotienten aus, so ergeben sich die in Tabelle V eingetragenen Werthe.

Tabelle V.

$v =$	23	30	38	51	
$T = 15^{\circ}$	0.46	0.42	0.42	0.46	$= \frac{\partial L}{\sqrt{v}}$
25	0.76	0.75	0.79	0.78	$= \frac{\partial L}{\sqrt{v}}$
35	1.19	1.07	1.12		$= \frac{\partial L}{\sqrt{v}}$

Demnach zeigt sich zwar bei $T = 15$ und $T = 25^{\circ}$ eine befriedigende Uebereinstimmung der Quotienten $\frac{\partial}{\sqrt{v}}$ und eine annähernde Analogie mit von Schuckmann's Werthen, aber nicht ganz bei $T = 35^{\circ}$. Hier treten Abweichungen von 0.05 und 0.06 vom Mittelwerth auf und legen den Gedanken nahe, dass der Versuchsanordnung, ausser dem oben erhobenen Einwand unzureichender Durchmischung, noch geringfügige weitere Mängel anhaften, die bei höherem T vielleicht deutlicher hervortreten könnten.

Der nächstliegende Einwand betrifft die Kürze der Beobachtungszeit. Es könnte vermuthet werden, dass die Ergebnisse bei grösserer Versuchsdauer andere gewesen wären. Allein diese Verlängerung wurde absichtlich vermieden, um die Reactionstemperatur des Körpers nicht allzu sehr von seiner Anfangstemperatur zu entfernen. Hierin aber liegt der schwerwiegendste, principielle Fehler der Anordnung: T ist keine konstante Grösse, sondern erleidet eine stetige Aenderung. Der Wind trifft demnach im Laufe des Versuches nicht einen gleichen, sondern in jedem Augenblicke bezüglich seiner Wärmeabgabe anders beschaffenen Körper und wird demgemäss auch anders wirken. Wenn auch durch Festsetzung der Beobachtungszeit auf nur 5 Minuten der Fehler möglichst verringert wurde, so war er doch nie auszuschalten und musste bei besserer Durchmischung und steigendem T sogar an Einfluss gewinnen. Hieraus folgt, dass die aus diesen Versuchen abgeleitete Gesetzmässigkeit noch nicht als völlig erwiesen gelten kann. Da sie jedoch weiteren, bedeutsamen Folgerungen zur Grundlage dienen sollte, so erachtete Herr Geimrath Flüge ihre Nachprüfung unter Ausschaltung der besprochenen Mängel für unerlässlich und gab die Anregung zu einer weiteren Versuchsreihe nach anderem Princip, über die im Folgenden berichtet werden soll.

Der leitende Gedanke des neuen Versuchsplanes war, die wärme-entziehende Wirkung des Windes nicht, wie bisher, an dem Temperaturabfall eines abkühlenden Körpers zu messen, sondern vielmehr ein Object von constant bleibender Temperatur dem Winde auszusetzen und den erhöhten Wärmeverbrauch zu bestimmen, den es im Kampfe mit dem Windanfall zur Erhaltung seiner Wärme benöthigte. Der Ueberschuss von Calorien, welcher sich, unter sonst ganz gleichen Versuchsbedingungen, im Wind gegenüber der Windstille ergab, musste dann genau der Wärmemenge entsprechen, welche dem Körper durch den Wind entzogen worden war. —

Das Versuchsobject bestand aus einem, mit warmem Wasser gefüllten, vertical aufgestellten Cylinder von 147.5^{mm} Durchmesser und 201^{mm} Höhe, welcher aus 1^{mm} starkem Messingblech hergestellt und aussen glatt polirt war (s. Fig. 2). Seine untere ebene Fläche hatte einen runden Ausschnitt von 39^{mm} Durchmesser, über dem sich nach einer geringen Verjüngung ein 3.5^{cm} im Durchmesser haltendes, in mehreren zickzackförmigen Windungen nach oben durch den Körper ziehendes Messingrohrerhob, durch die Cylinderdecke hindurchtrat und, noch 35^{cm} frei fortgeführt, wie ein schräger Schornstein mit einer Neigung von ca. 60° über den Körper emporragte. In der Wand des Schornsteins befand sich dicht oberhalb seines Ursprunges eine Durchbohrung, in welcher ein Thermometer luftdicht angebracht war. Die Schornsteinaussenfläche war mit einer dicken Schicht von Kieselguhrmasse sorgfältig umkleidet. —

Fig. 2.

Ausser der Durchtrittsöffnung der Heizschlange war der Deckel noch mit einer Reihe von Durchbohrungen für Thermometer, Thermoregulatoren, sowie für die Ein- und Ausströmungsrohre der zur Durchmischung des Wassers durchgetriebenen Luft versehen, wovon unten noch ausführlich die Rede sein wird. — Der Cylinder war stets mit der gleichen Wassermasse, 2500^g, gefüllt. Er ruhte auf einem weiten Ringe aus schmalen Eisen auf, welcher an einem Stativ mit beschwertem Fuss angebracht

war. Im Uebrigen hielt sich der Körper völlig frei in seiner Stellung, auf deren Constanz während der ganzen Dauer der Versuche aufmerksam geachtet wurde. —

Die Erwärmung des Versuchsubjectes geschah mittels Leuchtgas, welches vorher eine grosse, frisch geprüfte Elster'sche Gasuhr (s. Fig. 3, G_1) passirte.

Fig 3

G_1 Grosse Gasuhr. G_2 Kleine Gasuhr. K Versuchskörper. W Warmwasserbad. E Exhaustor. S Blechschirm.

Aus der Gasuhr trat das Gas in einen, im Wasser des Versuchskörpers (K) versenkten Aether-Quecksilberregulator eigenartiger Form und Construction (s. Fig. 2), der nach meinen Angaben in zweckentsprechender Weise von Dr. Rohrbeck, Berlin, angefertigt war. Aus dem Regulator strömte das Gas in einen kleinen Bunsenbrenner, welcher in einem, luftdicht an den Versuchskörper anschliessenden und windgeschützt endendem, Rohre geborgen war und mit kleiner, blauer, ruhiger, nie russender Flamme brannte. Die hierbei entwickelten Heizgase zogen durch die Zickzackschlange empor und verliessen den Körper durch den Schornstein.

Die Durchmischung des Wassers im Abkühlungskörper geschah bei den höheren, der Körperwärme des Menschen naheliegenden Temperaturen in sehr einfacher Weise durch Einblasen von Luft mit dem Munde. Bei

niedrigerer Einstellung des Thermostaten wurde im Warmwasserbade (W) vorgewärmte Luft mit Hülfe eines starken Gummidruckballes durch angefeuchtete Gummischläuche in das Wasser hineingetrieben. Die Durchmischung erfolgte mit peinlicher Regelmässigkeit jede halbe Minute ca. 10 Sec. lang.

Nach Herstellung eines geeigneten Versuchsobjectes und einwandsfreier Vorrichtungen zur Bestimmung der Wärmeproduction erforderte nunmehr die Bestimmung der in den Schornsteingasen ungenutzt abziehenden Wärmemenge, des Wärmeverlustes, noch die Zuziehung weiterer, complicirter Apparate. Wie leicht verständlich, liess sich der calorische Werth der Schornsteingase aus ihrer Masse und ihrer Temperatur berechnen. Während die letztere an dem Schornsteinthermometer ohne Weiteres abzulesen war, war die für die Bestimmung der Luftmenge einfachste, anemometrische, Methode nicht anwendbar; denn einerseits war unter gewissen Versuchsbedingungen der Auftrieb der Heizgase ein so geringer, dass selbst ein feines Recknagel'sches Anemometer noch nicht in Rotation gerieth, andererseits aber wurde, sobald die Flamme und damit auch die Geschwindigkeit der Heizgase wuchs, die Hitze der letzteren eine so hohe, dass die Einführung von Präcisionsanemometern auf längere Zeit ausgeschlossen war. Versuche mit Recknagel's Differential-Manometer führten gleichfalls zu keinem befriedigenden Ergebniss. Wollte man an dem Princip der Wärmeberechnung aus Luftmenge und Temperatur überhaupt festhalten und nicht etwa die calorimetrische oder anthracometrische Methode einschlagen, so blieb daher nichts übrig, als die Schornsteingase durch eine 2. Gasuhr zu leiten. Allerdings machte sich auch hier der Uebelstand geltend, dass der Druck der Heizgase zur Drehung der Gasuhr nicht ausreichte; doch war diese Schwierigkeit dadurch zu beseitigen, dass die Abströmungsöffnung der Gasuhr noch mit einer Aspirationsvorrichtung verbunden wurde, mit deren Hülfe nunmehr der Widerstand der Gasuhr überwunden wurde.

Die Anordnung gestaltete sich demnach folgendermaassen: Aus dem Schornstein traten die Gase durch einen dickwandigen Gummischlauch in eine kleine Elster'sche Gasuhr (G_2) von 6.5 Liter Capacität, welche mit Thermometern zur Beobachtung der Temperatur des Wassers und der austretenden Gase versehen war. Dieselben wurden sodann nach einem, an die Wasserleitung angeschlossenen Trommelwassergebläse angesogen, aus dem sie schliesslich, zusammen mit dem durchströmenden Wasser, austraten. Die von dem Aspirator geförderte Luftmenge war ausreichend regulirbar; sie betrug, je nach den Versuchsbedingungen, 8 bis 12 Liter pro Minute.

Zur Erregung des Windes waren die für die Kugelversuche benutzten einfachen Vorrichtungen nicht anwendbar. Die Grösse des Abkühlungskörpers erforderte einen grösseren Querschnitt des Luftstromes, dieser wiederum einen stärkeren Motor, wenn man gleichzeitig auch höhere Geschwindigkeiten erzielen wollte. Gerade bei diesen aber erwies sich die Anwendung eines Schraubenventilators als grober Fehler. Denn die, schon früher etwas störend empfundene, Centrifugalwirkung seiner zur Axe schräg gestellten Flügel äusserte sich dann derart, dass in der Verlängerung der Axe geradezu eine windstille Zone, ja eine Umkehr der Luftbewegung auftrat, während von da bis zur Peripherie die Bewegung von sehr geringen bis ausserordentlich grossen Geschwindigkeiten schnell anstieg. Nach zahlreichen zeitraubenden Vorversuchen erwies sich schliesslich folgende Anordnung brauchbar, bei deren Einrichtung mich die Herren Abtheilungsvorsteher der Firma Gebr. Körting in dankenswerther Weise mit ihrem fachmännischen Rath unterstützten.

Die Erzeugung des Windes geschah durch einen tangential wirkenden Exhaustor folgender Construction (s. Fig. 3, *E*). In einem 55^{cm} hohen, gusseisernen Gehäuse bewegte sich ein mühlradartiges Flügelrad von 40^{cm} Durchmesser; die Schaufeln hatten eine Breite von 46^{mm}, eine Länge von 102^{mm}. In dem Centrum der einen Gehäusefläche befand sich eine runde Oeffnung von 147^{mm} Durchmesser (die „Saugeöffnung“), in der Peripherie des Gehäuses eine gleich weite, nach oben gerichtete (die „Ausblaseöffnung“). Letztere war mit einem kurzen Rohransatz versehen; auf denselben wurde ein knieförmig gebogenes Blechrohr von 165^{mm} lichter Weite und je 44^{cm} Schenkellänge aufgesteckt, dessen freie Oeffnung einem, in einer Entfernung von 1^m vertical aufgestellten, grossen Blechschirm (*S*) genau centrirt gegenüberlag. Derselbe stellte den Mantel eines abgestumpften Kegels von 25^{cm} Höhe dar, dessen grössere, dem Exhaustor zugewandte Grundfläche einen Durchmesser von 100^{cm} hatte, während der Durchmesser der kleineren nur 40^{cm} betrug. Dieser Schirm hatte die Aufgabe, die peripheren, langsameren Strahlen des von der Ausblaseöffnung ausgehenden Kegels bewegter Luft in einem engeren Querschnitt zu sammeln und mit dem schnelleren Axenstrom zu vereinigen. Derselbe trat durch die kleinere Grundfläche des Kegels in ein 15^{cm} langes, horizontales Ansatzrohr, an dessen Ausgang der Abkühlungskörper aufgestellt war und hier auf seiner gesammten, dem Exhaustor zugewandten Oberfläche von Luftströmen nahezu gleicher Geschwindigkeit getroffen wurde.

Der Antrieb des Exhaustors geschah durch einen Elektromotor von 1 P.S., welcher mit der Flügelradaxe durch Riementransmission indirect verkuppelt war. Durch geeignete Vorschaltwiderstände (Glühlampen ver-

schiedener Kerzenstärke) konnte seine Tourenzahl nach Belieben regulirt und die Geschwindigkeit der den Versuchskörper treffenden Luftströme durch alle Stufen von 0.80^m bis 9^m pro Secunde gewechselt werden. Für noch langsamere Luftströme wurde statt des oben beschriebenen Ansatzrohres von gleichbleibendem Querschnitt ein trompetenartig sich erweiterndes Rohr aufgesetzt, welches eine Verlangsamung der Luftströme bis zu 0.40 bis 0.50^m pro Secunde ermöglichte.

Vergegenwärtigt man sich nun nochmals, was dieser complicirte Apparat zu leisten hatte, so ergeben sich folgende Anforderungen:

Es musste möglich sein,

1. langdauernde Versuche in Windstille und Wind an einem Körper von constant bleibender, in allen Theilen gleichmässiger Temperatur auszuführen;
2. die jeweils zugeführte Gasmenge zu bestimmen und ihren calorischen Werth unter den jeweiligen Versuchsbedingungen zu berechnen;
3. die Menge und Temperatur der gleichzeitig abziehenden Schornsteingase zu bestimmen und den durch sie bedingten Calorienverlust zu berechnen;
4. Luftströme von gleichbleibender und im Querschnitt gleichstarker Geschwindigkeit auf das Versuchsobject wirken zu lassen und die Geschwindigkeit von Versuch zu Versuch nach Belieben zu wechseln. —

Wie weit meine Versuchsanordnung diesen Aufgaben gerecht wurde, ergibt sich aus den beigefügten Protokollen, zu deren besserem Verständniss ich die kurze Beschreibung von der Ausführung eines einzelnen Versuches vorausschicke:

Zunächst wurde der Thermostat auf eine gewisse Temperatur eingestellt. Hielt sich dieselbe constant, so wurde minutenweise, vorerst ohne Wind, folgende Reihe von Ablesungen in regelmässiger Folge ausgeführt: der Stand des Thermostatthermometers, des Schornsteinthermometers, der kleinen Gasuhr, der grossen Gasuhr. Nach Kurzem war ich soweit geübt, dass diese Ablesungen innerhalb von 15 Secunden, im 1. Viertel jeder Minute, erledigt waren. Im 2. Viertel wurde eine gründliche Durchmischung des Thermostatwassers vorgenommen; die nun folgende Pause des 3. Minutenviertels konnte zur Feststellung der Temperatur und Feuchtigkeit des Versuchsraumes mittels Assmann's Aspirations thermometer und Koppe'schen Haarhygrometers benutzt werden, während im 4. Viertel nochmals gründlich durchgemischt wurde.

Waren diese Beobachtungen ohne Störung, zumeist 1 Stunde lang, fortgeführt, so wurde nunmehr der Motor in Bewegung gesetzt, seine Geschwindigkeit auf eine gewisse Stärke regulirt und, nach dem zunächst

Tabelle VI.

Nr. des Ver- suchs	Zimmer- Temp.	Thermostat- Temp.	Windge- schwindigkeit in pro Sec.	Calorien-Zufuhr im Leuchtgas		Calorien-Verlust durch den Schornstein		Calorien- verbrauch zur Erhaltung der Temp. Constanz
				Gasverbr. =	Calorien	Liter Luft	= Calorien	
				Liter pro	pro	von ... °	pro 10 Min.	
				10 Min.	10 Min.	pro 10 Min.	pro 10 Min.	
I	15.0	32.0	5	5.050	= 26.76	133 von 194-15°	= 4.23	22.48
	15.5	31.7		4.700	= 24.91	134 „ 193-15	= 4.29	20.62
		31.6		5.200	= 27.56	134 „ 194-15	= 4.31	23.25
		31.6		5.000	= 26.50	136 „ 194-15	= 4.37	22.13
	15.5	31.5	5	5.100	= 27.03	136 „ 193-15	= 4.36	22.67
	15.5	31.6						22.23
II	13.0	32.3	4	5.100	= 27.03	124 von 188-13°	= 3.95	23.08
		32.1		4.950	= 26.23	120 „ 186-13	= 3.79	22.44
		32.1		5.100	= 27.03	125 „ 189-13	= 4.01	23.02
	13.2	32.1		4.800	= 25.44	122 „ 188-13	= 3.89	21.55
		32.1		5.150	= 27.29	124 „ 189-13	= 3.96	23.33
		32.1		4.950	= 26.23	128 „ 191-13	= 4.12	22.11
	13.3	32.1	4	4.900	= 25.97	131 „ 193-13	= 4.24	21.73
	13.2	32.1						22.46
III		33.2	0	1.350	= 7.15	126 von 86-14°	= 2.12	5.03
	14.4	33.3		1.200	= 6.36	127 „ 85-14	= 2.12	4.24
		33.4		1.150	= 6.09	127 „ 85-14	= 2.12	3.97
		33.3		1.400	= 7.42	126 „ 84-14	= 2.07	5.35
		33.3		1.250	= 6.62	129 „ 84-14	= 2.12	4.50
	14.4	33.3		1.300	= 6.89	129 „ 85-14	= 2.14	4.75
	14.4	33.3	0					4.62
								4.62
IV		30.6	0	1.000	= 5.30	133 von 74-15°	= 1.89	3.41
		30.6		0.970	= 5.14	133 „ 73-15	= 1.87	3.27
	14.8	30.6		0.880	= 4.66	136 „ 74-15	= 1.94	2.72
		30.6		1.250	= 6.62	136 „ 74-15	= 1.94	4.68
	14.8	30.6	0					3.52
V		31.4	0	1.100	= 5.83	101 von 73-15°	= 1.42	4.41
	14.7	31.4		0.950	= 5.03	103 „ 73-15	= 1.44	3.59
	15.0	31.2		1.050	= 5.56	124 „ 74-15	= 1.77	3.79
	15.0	31.0		0.800	= 4.24	126 „ 75-15	= 2.12	2.12
	15.0	31.2	0					3.47

¹ In den Versuchen mit geringem Gasverbrauch sind mehrfach zur Bildung des Mittels 2×10 Minuten zusammengezogen, weil die innerhalb von 10 Minuten verbrauchte geringe Gasmenge eine gleichmässige Drehung der Gasuhr nicht bewirkte und erst in den nächsten 10 Minuten der Gesamtverbrauch beider Versuchsperioden

Tabelle VI. (Fortsetzung.)

Nr. des Ver- suchs	Zimmer- Temp.	Thermostat- Temp.	Windge- schwindigkeit in pro Sec.	Calorien-Zufuhr im Leuchtgas		Calorien-Verlust durch den Schornstein		Calorien- verbrauch zur Erhaltung der Temp.- Constanz
				Gasverbr. = Calorien Liter pro 10 Min.	pro 10 Min.	Liter Luft von ...° pro 10 Min.	= Calorien pro 10 Min.	
VI	11.2	30.1	3	4.500	= 24.75	135 von 181-11° =	4.24	20.51
	11.2	30.0		4.950	= 27.22	136 „ 181-11 =	4.27	22.95
		30.0		4.600	= 25.30	134 „ 183-11 =	4.24	21.06
	11.2	30.1		5.000	= 27.50	138 „ 181-11 =	4.34	23.16
		30.4	4.850	= 26.67	135 „ 184-11 =	4.29	22.38	
	11.2	30.1	3					22.01
VII	16.6	26.6	6	4.400	= 23.32	141 von 149-17° =	3.70	19.62
		26.6		3.550	= 18.81	140 „ 151-17 =	3.71	15.10
	16.6	26.7		3.550	= 18.81	141 „ 152-17 =	3.76	15.05
	16.8	26.7	3.900	= 20.67	141 „ 150-17 =	3.72	16.95	
	16.6	26.6	6					16.63
VIII		27.4	8	4.500	= 23.85	145 von 186-15° =	4.53	19.32
	15.1	27.3		5.200	= 27.56	147 „ 185-15 =	4.58	22.98
	15.2	27.2		4.600	= 24.38	148 „ 186-15 =	4.62	19.76
		27.2		4.900	= 25.97	146 „ 185-15 =	4.55	21.42
		27.2		4.450	= 23.58	148 „ 187-15 =	4.64	18.94
	15.2	27.3		5.150	= 27.29	146 „ 188-15 =	4.59	22.70
	15.2	27.2	8					20.85
	IX	15.8	28.0	6	4.400	= 23.32	145 von 165-16° =	4.14
16.0		28.0	4.050		= 21.46	147 „ 166-16 =	4.21	17.25
		28.1	4.050		= 21.46	144 „ 168-16 =	4.16	17.30
16.0		28.2	4.300		= 22.79	146 „ 166-16 =	4.18	18.61
16.3		28.3	4.000		= 21.20	145 „ 168-16 =	4.19	17.01
16.5		28.4	4.500	= 23.85	146 „ 169-16 =	4.24	19.61	
16.0		28.1	6					18.16
X		25.8	6	3.900	= 20.67	130 von 141-15° =	3.32	17.35
		25.7		3.300	= 17.49	130 „ 143-15 =	3.36	14.13
		25.7		3.350	= 17.75	129 „ 144-15 =	3.35	14.40
		25.7		3.750	= 19.87	125 „ 146-15 =	3.28	16.59
		25.8		3.400	= 18.02	125 „ 146-15 =	3.28	14.74
		25.9		3.300	= 17.49	125 „ 146-15 =	3.28	14.21
	15.5	26.0		4.000	= 21.20	125 „ 146-15 =	3.28	17.92
	15.5	25.9	6					15.62

zum maassgebenden Ausschlag führte. Dass gleichwohl in den einzelnen Versuchsperioden die Verbrennung eine gleichmässige war, geht aus den wenig schwankenden Werthen für den Calorienverlust hervor.

Tabelle VI. (Fortsetzung.)

Nr. des Ver- suchs	Zimmer- Temp.	Thermostat- Temp.	Windge- schwindigkeit m pro Sec.	Calorien-Zufuhr im Leuchtgas		Calorien-Verlust durch den Schornstein		Calorien- verbrauch zur Erhaltung der Temp.- Constanz
				Gasverbr. =	Calorien Liter pro 10 Min.	Liter Luft von ...° pro 10 Min.	= Calorien pro 10 Min.	
XI	13.5	30.3	7	5.900	= 31.27	129 von 196-14°	= 4.20	27.07
	13.5	30.2		5.750	= 30.47	130 „ 197-14	= 4.25	26.22
	13.7	30.1		6.250	= 33.12	131 „ 198-14	= 4.29	28.83
		30.1		6.100	= 32.33	129 „ 203-14	= 4.30	28.03
		30.3		6.250	= 33.12	131 „ 205-14	= 4.39	28.73
	13.7	30.5		5.800	= 30.74	130 „ 206-14	= 4.37	26.73
	13.6	30.2	7					27.54
XII	13.8	31.5	3	4.000	= 21.20	128 von 174-14°	= 3.84	17.36
	14.0	31.4		4.750	= 24.70	127 „ 175-14	= 3.83	20.34
	14.0	31.4		4.400	= 23.32	128 „ 177-14	= 3.89	19.43
	14.0	31.4		4.550	= 24.11	130 „ 177-14	= 3.95	20.16
	14.0	31.4	3					19.32
XIII	13.8	31.4	2	3.450	= 18.28	121 von 150-14°	= 3.26	15.02
	13.9	31.3		3.550	= 18.81	122 „ 152-14	= 3.33	15.48
	13.8	31.3		3.700	= 19.61	124 „ 153-14	= 3.40	16.21
	13.8	31.3		3.900	= 20.67	123 „ 155-14	= 3.40	17.27
	13.8	31.3		3.750	= 19.87	125 „ 158-14	= 3.50	16.37
	13.8	31.3	2					16.07
XIV	13.5	33.5	2	4.100	= 21.73	122.5 v. 174-13.5°	= 3.71	18.02
		33.4		4.150	= 21.99	124.5 „ 177-13.5	= 3.79	18.20
		33.4		4.400	= 23.32	125 „ 175-13.5	= 3.78	19.54
	13.5	33.4		4.150	= 21.99	126 „ 176-13.5	= 3.83	18.16
		33.4		4.250	= 22.52	124 „ 176-13.5	= 3.75	18.77
	13.8	33.4		4.650	= 24.64	126 „ 178-13.5	= 3.86	20.78
	13.6	33.4	2					18.91
XV	14.0	33.8	3	4.850	= 25.70	128 von 192-14°	= 4.10	21.60
		33.6		4.700	= 24.91	127 „ 189-14	= 4.04	20.87
		33.6		4.700	= 24.91	127 „ 184-14	= 3.96	20.95
	14.0	33.7	3					21.14

Tabelle VI. (Fortsetzung.)

Nr. des Ver- suchs	Zimmer- Temp.	Thermostat- Temp.	Winde- geschwindigkeit m pro Sec.	Calorien-Zufuhr im Leuchtgas		Calorien-Verlust durch den Schornstein		Calorien- verbrauch zur Erhaltung der Temp.- Constanz
				Gasverbr. =	Calorien	Liter Luft	= Calorien	
				Liter pro	pro	von ...°	pro 10 Min. pro 10 Min.	
XVI	14·6	34·3	0	1·490	= 7·89	122 von 89-15°	= 2·09	5·80
		34·4		1·280	= 6·78	119 „ 90-15	= 2·06	4·72
	14·8	34·5		0·950	= 5·03	113 „ 85-15	= 1·85	3·18
		34·4		1·450	= 7·68	114 „ 85-15	= 1·60	6·08
		34·4		1·350	= 7·15	113 „ 84-15	= 1·83	5·32
	14·9	34·3		1·150	= 6·09	117 „ 83-15	= 1·87	4·22
	14·8	34·4	0					4·88
XVII	14·4	30·4	8	6·200	= 32·86	144 von 225-15°	= 5·12	27·74
		30·4		6·450	= 34·18	147 „ 226-15	= 5·22	28·96
		30·4		6·000	= 31·80	147 „ 226-15	= 5·22	26·85
	14·5	30·4		6·750	= 34·77	147 „ 226-15	= 5·22	29·55
		30·4		6·100	= 32·35	148 „ 226-15	= 5·25	27·10
	14·5	30·4		5·900	= 31·27	146 „ 226-15	= 5·18	26·09
	14·5	30·4	8					27·71
XVIII	14·5	32·9	3	4·300	= 21·79	110 von 162-14°	= 3·14	18·65
		32·9		4·000	= 21·20	113 „ 159-14	= 3·18	18·02
	14·7	32·9		3·850	= 20·40	110 „ 159-14	= 3·10	17·30
		32·7		3·650	= 19·34	114 „ 161-14	= 3·24	16·10
		32·7		4·450	= 23·58	115 „ 167-14	= 3·36	20·22
	14·5	32·8		3·850	= 20·40	116 „ 166-14	= 3·37	17·03
	14·5	32·8	3					17·88
XIX	14·3	33·0	4	5·200	= 27·56	122 von 197-14°	= 3·99	23·57
		32·8		5·250	= 27·82	120 „ 197-14	= 3·92	23·90
	14·4	32·7		4·800	= 25·44	121·5 „ 195-14	= 3·93	21·51
	14·4	32·6		5·250	= 27·82	122 „ 191-14	= 3·90	23·92
	14·4	32·8	4					23·22
XX	10·8	17·0	6	2·100	= 11·13	130 von 92-11°	= 2·42	8·71
	11·2	17·1		2·000	= 10·60	130 „ 91-11	= 2·39	8·21
	11·4	17·2		1·850	= 9·80	127 „ 92-11	= 2·36	7·44
		17·3		1·800	= 9·54	125 „ 91-11	= 2·30	7·24
	11·5	17·3		1·850	= 9·80	123 „ 91-11	= 2·26	7·54
		17·4		1·650	= 8·74	116 „ 91-11	= 2·14	6·60
	11·3	17·2	6					7·62

Tabelle VI. (Fortsetzung.)

Nr. des Ver- suchs	Zimmer- Temp.	Thermostat- Temp.	Windge- schwindigkeit m pro Sec.	Calorien-Zufuhr im Leuchtgas		Calorien-Verlust durch den Schornstein		Calorien- verbrauch zur Erhaltung der Temp.- Constanz
				Gasverbr. =	Calorien Liter pro 10 Min.	Liter Luft von ...° pro 10 Min.	= Calorien pro 10 Min.	
XXI	13.8	21.4	8	2.350	= 12.45	127 von 114-14°	= 2.75	9.70
		21.3		2.800	= 14.84	128 „ 114-14	= 2.77	12.07
		21.2		2.500	= 13.25	134 „ 114-14	= 2.90	10.35
		21.0		2.250	= 11.92	136 „ 112-14	= 2.90	9.02
	13.8	21.2	8					10.28
XXII	12.6	27.4	1	2.050	= 10.86	124 von 108-13°	= 2.59	8.27
	13.0	27.4		2.000	= 10.60	128 „ 108-13	= 2.67	7.93
		27.2		2.450	= 12.98	129 „ 109-13	= 2.72	10.26
	13.0	27.1		1.850	= 9.80	134 „ 110-13	= 2.85	6.95
	13.0	27.2	1					8.35
XXIII	11.5	28.8	3	3.900	= 20.67	138 von 169-12°	= 4.11	16.56
	12.0	28.6		4.550	= 24.11	141 „ 172-12	= 4.25	19.86
		28.7		4.050	= 21.46	137 „ 174-12	= 4.16	17.30
	12.0	28.8		5.050	= 26.76	140 „ 178-12	= 4.32	22.44
	12.0	28.7	3					19.04
XXIV		31.8	0	1.100	= 5.83	75 von 64-12°	= 0.97	4.86
		31.7		1.000	= 5.30	75 „ 64-12	= 0.97	4.33
	12.2	31.5		1.000	= 5.30	74 „ 64-12	= 0.95	4.35
		31.2		0.950	= 5.03	74 „ 64-12	= 0.95	4.08
		31.2		0.950	= 5.03	74 „ 64-12	= 0.95	4.08
XXV	12.2	31.4	0					4.34
	12.8	23.5	3	2.050	= 10.86	138 von 104-13°	= 2.79	8.07
		23.2		2.200	= 11.66	139 „ 104-13	= 2.81	9.85
	13.0	23.1		2.000	= 10.60	139 „ 103-13	= 2.79	7.81
	13.0	23.0		2.400	= 12.72	140 „ 103-13	= 2.81	9.91
XXVI	13.0	23.2	3					8.91
	14.0	27.7	0.8	2.000	= 10.60	134 von 94-14°	= 2.45	8.15
		27.7		1.650	= 8.74	134 „ 94-14	= 2.45	6.29
		27.7		1.800	= 9.54	135 „ 95-14	= 2.49	7.05
		27.7		1.450	= 7.68	136 „ 94-14	= 2.49	5.19
		27.7		1.600	= 8.48	136 „ 94-14	= 2.49	5.99
		27.7		1.900	= 10.07	135 „ 96-14	= 2.51	7.56
	14.0	27.7	0.8					6.70

Tabelle VI. (Fortsetzung.)

Nr. des Ver- suchs	Zimmer- Temp.	Thermostat- Temp.	Winde- schwindigkeit m pro Sec.	Calorien-Zufuhr im Leuchtgas		Calorien-Verlust durch den Schornstein		Calorien- verbrauch zur Erhaltung der Temp.- Constanz
				Gasverbr. =	Calorien	Liter Luft von ...°	= Calorien	
				Liter pro 10 Min.	pro 10 Min.	pro 10 Min.	pro 10 Min.	
XXVII	12.0	27.2	3	3.050	= 16.16	94 von 109-12°	= 2.00	14.16
		27.2		3.050	= 16.16	95 „ 112-12	= 2.07	14.09
		27.2		2.800	= 14.84	96 „ 112-12	= 2.09	12.75
		27.2		3.250	= 17.22	97 „ 112-12	= 2.11	15.11
		27.2		3.050	= 16.16	97 „ 111-12	= 2.10	14.05
	12.0	27.2		2.800	= 14.84	94 „ 109-12	= 2.00	12.84
	12.0	27.2	3					13.83
XXVIII		26.9	5	4.230	= 22.44	131 von 147-12°	= 3.53	18.91
	12.2	27.0		4.770	= 25.28	141 „ 147-12	= 3.80	21.48
		27.0		4.450	= 23.58	134 „ 146-12	= 3.59	19.99
	12.2	27.0		4.650	= 24.64	128 „ 151-12	= 3.52	21.12
	12.2	27.0	5					20.37
XXIX	11.6	29.5	0	1.200	= 6.36	140 von 75-12°	= 2.12	4.24
		29.6		1.250	= 6.62	139 „ 75-12	= 2.11	4.51
		29.6		1.150	= 6.09	141 „ 76-12	= 2.17	3.92
		29.7		1.150	= 6.09	141 „ 76-12	= 2.17	3.92
		29.8		1.150	= 6.09	142 „ 76-12	= 2.18	3.91
	11.6	29.6	0					4.10
XXX	13.0	24.1	2	2.200	= 11.66	124 von 105-13°	= 2.53	9.13
		24.3		2.100	= 11.13	124 „ 104-13	= 2.51	8.62
		24.3		1.850	= 9.80	125 „ 103-13	= 2.51	7.29
		24.5		2.400	= 12.72	122 „ 103-13	= 2.45	10.27
	13.0	24.6		2.050	= 10.86	122 „ 104-13	= 2.47	8.39
	13.0	24.3	2					8.74
XXXI		27.2	0.8	1.900	= 10.07	119 von 83-13°	= 1.96	8.11
	13.0	27.4		2.050	= 10.86	120 „ 85-13	= 2.02	8.84
	13.2	27.3		2.850	= 15.10	121 „ 88-13	= 2.11	12.99
	13.2	27.3		1.650	= 8.74	120 „ 91-13	= 2.15	6.59
	13.2	27.3	0.8					9.14
XXXII	13.4	28.8	0	1.000	= 5.30	100 von 54-14°	= 1.02	4.28
	13.5	28.8		0.750	= 3.97	97 „ 54-14	= 0.99	2.98
	13.7	28.8		0.900	= 4.77	100 „ 55-14	= 1.15	3.62
	13.5	28.8	0					3.62

Tabelle VI. (Schluss.)

Nr. des Ver- suchs	Zimmer- Temp.	Thermostat- Temp.	Windge- schwindigkeit m pro Sec.	Calorien-Zufuhr im Leuchtgas		Calorien-Verlust durch den Schornstein		Calorien- verbrauch zur Erhaltung der Temp.- Constanz
				Gasverbr. = Calorien Liter pro 10 Min.	pro 10 Min.	Liter Luft von ... ° pro 10 Min.	= Calorien pro 10 Min.	
XXXIII	14.4	26.5	0.6	2.200	= 11.66	110 von 74-14°	= 1.59	10.07
		26.5		1.000	= 5.30	109 „ 72-14	= 1.53	3.77
		26.4		1.850	= 9.80	110 „ 72-14	= 1.54	8.26
	14.4	26.4		1.150	= 6.09	110 „ 73-14	= 1.57	4.52
	14.4	26.4	0.6					6.65

erfolgenden Temperaturabfall des Thermostaten, seine Wiedereinstellung auf eine constante, der früheren meist naheliegende Temperatur abgewartet. War dieselbe erfolgt, so wurde wiederum in der oben beschriebenen Weise die Beobachtung mindestens 1 Stunde lang ausgeführt.

In den beigegebenen Versuchsprotokollen sind nun die Beobachtungen von 10 Minuten immer zu einem Werthe zusammengefasst, derart, dass Columnne 1 die Zimmertemperatur während der Beobachtungszeit angiebt, Columnne 2 das Mittel sämmtlicher in 10 Minuten beobachteter Thermostattemperaturen, Columnne 3 die Windbewegung in Metern pro Secunde, Columnne 4 die in 10 Minuten zugeführte Gasmenge, bezw. die ihr entsprechende Calorienzahl, für deren Berechnung auf Grund der täglichen Bestimmungen durch das städtische chemische Untersuchungsamt ein Durchschnittswerth von 5300 Calorien pro Cubikmeter zu Grunde gelegt wurde. Columnne 5 enthält die Menge und Temperatur der in 10 Minuten abziehenden Schornsteingase, sowie die hieraus berechneten, in Verlust gerathenen Calorien. Columnne 6 giebt schliesslich die Differenz der unter 4 und 5 resultirenden Calorien an, d. h. die von dem Körper zur Erhaltung seiner Temperatur benöthigte Wärmemenge.

Kehren wir nunmehr zu der oben beregten Frage über die Leistungsfähigkeit der Versuchsanordnung zurück, so ergiebt sich aus den Protokollen:

1. Die geforderte Constanz und gleichmässige Vertheilung der Temperatur des Versuchskörpers ist in befriedigender Weise erreicht worden. Der Thermostat hielt sich oft während der ganzen Dauer eines Versuches auf völlig gleicher Wärme; in den anderen Versuchen betragen die Temperaturschwankungen nur wenige Zehntel eines Grades. Beobachtungen, welche unter einander um mehr als 5 Zehntel eines Grades abwichen,

wurden nicht verworthen. Dass auch die Durchmischung des Wassers eine ausreichende war, liess sich aus der Temperaturconstanz schliessen, welche das Thermometer auch in den Durchmischungspausen, also im 1. und 3. Viertel jeder Beobachtungsminute anzeigte. Uebrigens trat auch hier wieder die grosse Bedeutung der ausgiebigen Durchmischung auf's Deutlichste hervor; wurde gelegentlich, in Folge einer Störung, die Durchmischung auch nur 1 Minute lang unterbrochen, so konnte das bis dahin tadellos constant erhaltene Thermometer um $\frac{1}{2}$ bis 1 Grad steigen und kehrte erst nach gründlicher Durchmischung wieder allmählich in seine constante Lage zurück.

2. Die zugeführte Gasmenge war an der Gasuhr ohne Weiteres abzulesen. Fraglich war nur, ob es statthaft sei, für die Berechnung der dem Körper zugeführten Calorien den mit dem Calorimeter bei vollständiger Verbrennung festgestellten Wärmewerth in die Rechnung einzusetzen, oder ob nicht vielmehr ein Theil des Leuchtgases unverbrannt in den Schornsteingasen entwich. Bei einigen Versuchen wurden daher noch gewisse Mengen Schornsteinluft mittelst einer Nebenleitung durch Kaliapparate hindurchgeführt und die absorbierte Kohlensäure gewichtsanalytisch bestimmt. Es ergab sich, dass die Verbrennung auch unter sehr verschiedenen Versuchsbedingungen eine gleich intensive und nahezu vollständige war. Dieses günstige Resultat war vermuthlich auf die überaus reichliche Luftzufuhr zu dem Bunsenbrenner zurückzuführen, welche mit Hülfe der Aspiration bewirkt werden konnte.

3. Die Menge und Temperatur der Schornsteingase ergaben sich aus den Thermometer- und Gasometerablesungen. Die Berechnung der in Verlust gerathenden Calorien (W) geschah aus diesen Daten mit Hülfe der Formel:

$$W = C P t,$$

worin C die specifische Wärme der Luft = 0.238 ;

P das Gewicht der Luft in Kilogramm bei der beobachteten Temperatur;

t die Temperaturdifferenz zwischen den Schornsteingasen und dem Zimmer bedeutet; der für t in Frage kommende Subtrahend ist daher jedes Mal zu der Temperatur der Schornsteingase mit beigefügt.

Wie ersichtlich, tritt in diese Berechnung auch die Zimmertemperatur als Factor ein, so dass eine möglichst weitgehende Constanz derselben für die ganze Versuchsreihe wünschenswerth war. Dieses Desiderat war in dem saalartigen, von drei freien Mauern umschlossenen, im Dachgeschoss belegenen Versuchsraum nicht völlig zu erfüllen. Immerhin konnten weitaus die meisten Versuche zwischen 13 und 15° C. durchgeführt

werden; von den übrigen sind einige bei 11 und 12°, einige bei 16°, ein einziger bei 17° angestellt, so dass selbst die Extreme nur um 3° vom Mittelwerth abweichen. Zudem ist die Constanz der Aussentemperatur durchaus kein dringendes Erforderniss, weil in dem Product CPt eine Ungenauigkeit von 0.5 bis 1 für t wenig bedeutet und zweitens für die späteren Berechnungen nicht die absolute Lufttemperatur, sondern die Temperaturdifferenz zwischen Versuchsobject und Versuchsraum in Frage kommt.

4. Die Gleichmässigkeit der Luftbewegung während eines Versuches ist durch die Constanz der Triebkraft gewährleistet. Hingegen gelang es nicht, für alle Windstärken auch Gleichmässigkeit im ganzen Querschnitt des bewegten Luftstromes zu erzielen; trotz der complicirten, zweifellos auch zweckmässigen Vorrichtungen herrschten in dem für das Abkühlungsobject in Betracht kommenden Bereich bei den grösseren Windgeschwindigkeiten noch Unterschiede von ca. $\frac{1}{2}$ m. Gleichwohl konnte man hoffen, durch recht zahlreiche Versuche unter möglichst exacten Bedingungen zu brauchbaren Mittelwerthen zu gelangen. —

Zur Erleichterung der weiteren Berechnungen und Folgerungen habe ich aus den Protokollen nochmals lediglich die Endresultate herausgezogen und in Tabelle VII zusammengestellt. Dieselbe enthält in der obersten Horizontalcolumnne die Benennung der Windgeschwindigkeit (v), in der ersten Verticalcolumnne die für die Wärmeabgabe des Objectes wesentlich interessirende Temperaturdifferenz (T) zwischen Object und Versuchsraum, während die Zahlen im Schnittpunkte einer Horizontal- und Verticalcolumnne die unter den einschlägigen Bedingungen von dem Versuchskörper aufgewendeten Calorien angeben, wie sie im Versuche gefunden wurden. Die Tabelle ermöglicht also einen directen Vergleich der in Windstille und Wind unter sonst ganz gleichen Verhältnissen abgegebenen Wärmemengen. Die in der Windstille abgegebene Wärmemenge hätte eigentlich auf theoretischem Wege mit Hülfe der Péclet'schen Tabellen für die constanten Strahlungs- und Leitungscoefficienten bestimmt werden können. Wie zu erwarten, betrug aber die auf diesem Wege berechnete Calorienmenge mehr als die im Versuch direct beobachtete; beziehen sich doch Péclet's Constantenformeln auf mathematisch geschlossene Idealkörper, während mein Versuchsobject noch zahlreiche Durchbohrungen, Unebenheiten und Trübungen seiner Oberfläche aufwies. Ueberdies äussert sich Ferrini¹ bezüglich der von Péclet aufgestellten, für uns besonders wichtigen Leitungscoefficienten so kritisch, dass ich es vorzog, von einer theoretischen Berechnung der Wärmeabgabe mit Hülfe von Péclet's

¹ Ferrini, *Technologie der Wärme*. Jena 1878.

Constanten ganz Abstand zu nehmen und mich lediglich an die im Versuch gewonnenen Zahlen zu halten. Aus diesen war dann unter Benutzung von Péclet's Annäherungsformel: $W = (i + k)\tau T$, — wo W die abgegebene Wärme in Calorien in der Zeit τ , i den Strahlungscoëfficienten, k den Leitungscoëfficienten, T die Temperaturdifferenz zwischen Körper und Umgebung bedeutet —, $i + k$ leicht zu berechnen und der Mittelwerth aus allen im Versuch gefundenen Summen $i + k$ zur Aufstellung einer Tabelle (VII) verwerthbar, welche für alle in Betracht kommenden Temperaturdifferenzen T die Wärmeabgabe des Versuchskörpers in der Windstille anzeigt und zwar die berechneten in Parenthese.

Betrachtet man nun die im Wind gefundenen Calorienzahlen, so fällt zunächst der Anstieg in die Augen, den jede Verticalcolumnne proportional dem wachsenden T aufweist, wie dies nicht anders zu erwarten war. Weit interessanter sind die Ergebnisse der Horizontalcolumnnen. Auch hier zeigt sich ein Anstieg der Wärmeabgabe, der aber nicht ohne Weiteres der Windgeschwindigkeit proportional gesetzt werden kann, sondern zu derselben in einem anderen, mit wachsender Windstärke zwar auch ansteigendem, aber an Zuwachs relativ stetig abnehmendem Verhältniss steht. So bewirkt z. B. unter sonst sehr ähnlichen Bedingungen ein Wind von:

1^m pro Sec. eine Wärmeabgabe von 8.35 Calorien pro 10 Min.

3 „ „ „ „ „ „ 13.83 „ „ 10 „

5 „ „ „ „ „ „ 20.37 „ „ 10 „

Weit deutlicher mussten diese Beziehungen noch hervortreten, wenn man von den absoluten Werthen absah und sämtliche Zahlen einer Horizontalcolumnne auf die in der Windstille abgegebene Calorienmenge als Einheit bezog, d. h. die Quotienten Wärmeabgabe im Wind (W_w): Wärmeabgabe in der Windstille (W_{st}) berechnete. Diese Berechnung ist in der Tabelle VIII ausgeführt. Dieselbe ergibt, dass die Werthe einer Verticalcolumnne einander ausserordentlich nahe liegen, ja vereinzelt übereinstimmen, dass also die relative Erhöhung der Wärmeabgabe bei wachsendem Winde, wie sie sich in den Horizontalcolumnnen ausspricht, stets die gleiche ist. Es war demnach wohl gestattet, aus sämtlichen Werthen jeder Verticalcolumnne den Mittelwerth zu ziehen und mit dieser neuen Horizontalcolumnne die Betrachtungen weiter fortzuführen. Dieselben hatten zum Ziele, die gefundenen Werthe in eine gesetzmässige Relation zur Geschwindigkeit des Windes zu bringen. Im Hinblick auf die an den Glaskugeln von von Schuckmann und mir festgestellte Gesetzmässigkeit war das Nächstliegende, zu versuchen, ob auch die neugewonnenen Ergebnisse der Quadratwurzel aus der Windgeschwindigkeit proportional zu setzen seien. War dies der Fall, so musste, nach der schon früher aus-

Tabelle VIII.

$v =$	Windstille	0.6	0.8	1	2	3	4	5	6	7	8
$T = 5.0$	1										
5.5	1								5.95		
6.0	1										
6.5	1										
7.0	1										
7.5	1										
8.0	1										
8.5	1										
9.0	1										
9.5	1										
10.0	1					3.82			6.92		
10.5	1										
11.0	1				3.41						
11.5	1										
12.0	1	2.38							6.49		7.46
12.5	1										
13.0	1										
13.5	1										
14.0	1		2.43	2.56							
14.5	1										
15.0	1					3.96		6.03			
15.5	1										7.67
16.0	1							5.96			
16.5	1					4.95					
17.0	1					4.88				7.16	
17.5	1				3.94						
18.0	1					4.26	5.54				
18.5	1						5.21				
19.0	1					4.97					
19.5	1				4.16	4.65					
20.0	1										
Mittel	1	2.38	2.43	2.56	3.83	4.50	5.38	5.99	6.45	7.16	7.56

geführten Deduction, der Quotient $\frac{\text{Calorienmenge im Wind}}{\sqrt{v}}$ für alle Windstärken constant sein.

Führt man diese Berechnung aus, so ergibt sich:

$$\begin{aligned} \frac{2.38}{\sqrt{0.6}} &= \frac{2.38}{0.8} = 2.97 \\ \frac{2.43}{\sqrt{0.8}} &= \frac{2.43}{0.9} = 2.70 \\ \frac{2.56}{\sqrt{1}} &= \frac{2.56}{1} = 2.56 \\ \frac{3.83}{\sqrt{2}} &= \frac{3.83}{1.41} = 2.71 \\ \frac{4.50}{\sqrt{3}} &= \frac{4.50}{1.73} = 2.60 \\ \frac{5.38}{\sqrt{4}} &= \frac{5.38}{2.00} = 2.69 \\ \frac{5.99}{\sqrt{5}} &= \frac{5.99}{2.23} = 2.69 \\ \frac{6.45}{\sqrt{6}} &= \frac{6.45}{2.44} = 2.64 \\ \frac{7.16}{\sqrt{7}} &= \frac{7.16}{2.64} = 2.71 \\ \frac{7.56}{\sqrt{8}} &= \frac{7.56}{2.82} = 2.68 \\ \hline &\text{Mittel } 2.69 \end{aligned}$$

Es zeigt sich also, dass thatsächlich die gefundenen Werthe proportional der $\sqrt{v}$, dass also bei gleicher Temperaturdifferenz zwischen Abkühlungsobject und umgebender Luft die Wärmeabgabe im Wind proportional der Quadratwurzel aus der Windgeschwindigkeit zu setzen ist. Es ergibt sich demnach auf diesem Wege das gleiche Resultat wie in den früheren Glaskugelversuchen, nur dass es nunmehr auch für längere Versuchsdauer und an einem Objecte von constanter Temperatur erwiesen ist. Eine grössere Genauigkeit konnte allerdings auch mit dieser Versuchsanordnung wegen der Inconstanz der Windgeschwindigkeit und der dadurch bewirkten Fehlerquellen nicht erzielt werden.

Die soeben ausgeführte Berechnung ist aber im Stande, uns einen noch klareren mathematischen Einblick in die hier waltende Gesetzmässigkeit zu verschaffen. Nennen wir die im Wind (von v Metern pro Sec.) abgegebene Wärmemenge W_w , die in der Windstille abgegebene W_{st} , so würden unsere Versuchsergebnisse zu folgender Gleichung führen:

$$\begin{aligned}\frac{W_w}{W_{st}} &= 2.69 \sqrt{v} \\ &= \sqrt{7.24} \cdot \sqrt{v}\end{aligned}$$

oder

$$\begin{aligned}\left(\frac{W_w}{W_{st}}\right)^2 &= 7.24 \cdot v \\ &= 2 \times 3.62 \times v.\end{aligned}$$

Dies ist aber nichts anderes als der Ausdruck für eine reguläre Parabel vom Halbparameter 3.62. Ihr Brennpunkt muss also vom Scheitel 1.81 entfernt sein. Errichtet man zwei auf einander senkrechte Coordinaten, trägt auf der y -Axe als Ordinate die abgegebenen Wärmemengen in regelmässigen Abständen aufsteigend von 0 an auf, auf der x -Axe die Windstärken von 0 nach rechts aufsteigend in gleichen regelmässigen, je 1^m pro Sec. entsprechenden Abständen und zeichnet die Parabel ein (s. Fig. 4), so bedeutet

jeder Parabelpunkt dasjenige Vielfache von der Wärmeabgabe in der Windstille, welches unter dem Einfluss einer gewissen (durch Projection des Punktes auf die x -Axe auffindbaren) Windgeschwindigkeit eintritt und durch den zugehörigen Ordinate werth auf der y -Axe angezeigt wird. Man übersieht demnach mit Hülfe dieser

Fig. 4.

analytisch-geometrischen Darstellung den Gang der Wärmeabgabe weit besser als durch die rein formale Angabe des Gesetzes. Besonders verständlich wird hierdurch auch die relativ viel stärkere Wirkung der schwächeren Winde gegenüber den stärkeren: Ein Blick auf die Eigenart der Parabelcurve macht es begreiflich, dass ein Wind von 0.5^m pro Sec. die Wärmeabgabe schon um das 2fache, ein Wind von 10 Mal grösserer Geschwindigkeit, d. i. von 5^m nur um das 6fache, ein Wind von 20 Mal grösserer Geschwindigkeit, d. i. von 10^m sogar nur um das 8½fache steigert.

Es war nun zu prüfen, wie sich die im Versuch direct gefundenen Zahlen bezw. ihre relativen Werthe in diese Curve einfügten. Ich habe daher die Zahlen der letzten Horizontalcolumnne aus Tabelle VIII an die entsprechende Stelle als kleine $\times$ in die Figur 4 eingetragen. In der That

zeigt sich, dass diese aus den Versuchsergebnissen direct abgeleiteten Werthe zum Theil in dichter Nähe der Kurve liegen, zum Theil ihr geradezu angehören; die mathematische Reflexion steht demnach mit der experimentellen Beobachtung im Einklang: die im Wind beobachtete Erhöhung der Wärmeabgabe folgt dem Gange einer regulären Parabel. —

Hat nun diese Thatsache nur für unsere besonderen Versuchsverhältnisse Gültigkeit, oder liegt hier eine allgemeine Gesetzmässigkeit vor? Man wird nicht fehlgehen, die letztere für die aufgefundenen Beziehungen in Anspruch zu nehmen. Wie aus dem Früheren hervorgeht, ist stets der Quotient $\frac{W_W}{W_{St}} =$ einer constanten Zahl c mal $\sqrt{v}$, und es muss immer möglich sein, den constanten Factor c , welchen Werth er auch haben möge, $= \sqrt{2 \cdot \frac{c^2}{2}}$ zu setzen und damit die Formel einer regulären Parabel aufzustellen.

Schwieriger ist die Frage, was die Constante c bedeutet. Das Verständnis hierfür wird erleichtert, wenn wir von den relativen Werthen nochmals zu den absoluten zurückkehren und der Formel eine allgemeinere Fassung geben.¹ Wie dargethan, ist

$$\frac{W_W}{W_{St}} = c \sqrt{v},$$

also auch

$$W_W = c \sqrt{v} \cdot W_{St},$$

oder

$$W_W = c \sqrt{v} \cdot (i + k) \tau T,$$

oder, wenn man $c(i + k) = C$ setzt,

$$W_W = C \tau T \sqrt{v}.$$

Es ist also die Constante C abhängig von den Eigenschaften des abkühlenden Körpers, seiner Grösse, Form, Oberfläche und Substanz, sowie von seiner Aufstellung.

Die Formel $W_W = C \tau T \sqrt{v}$ ist der allgemeinste Ausdruck für die gefundenen Relationen; sie besagt, dass die Wärmeabgabe eines warmen Objectes in bewegter Luft direct proportional ist dem Product aus einer constanten Zahl, aus der Dauer der Entwärmung, aus der Temperaturdifferenz seiner Oberfläche mit der umgebenden Luft und aus der Quadratwurzel der Windgeschwindigkeit (Windgesetz).

¹ Für freundliche Unterstützung bei Ableitung der Formeln bin ich Hrn. Prof. Neumann zu grossem Danke verpflichtet.

Bei einem homogenen Körper, z. B. einer mit Wasser gefüllten Glaskugel, ist die Temperaturabnahme ϑ der Wärmeabgabe proportional, also auch der Differenz seiner Eigentemperatur mit der Lufttemperatur mal der Quadratwurzel aus der Windgeschwindigkeit proportional, d. h. es ist stets

$$\vartheta = c T \sqrt{v}.$$

Legen wir nun eine bestimmte (die kleine Versuchs-) Glaskugel zu Grunde und setzen ihre Anfangstemperatur mit 30° fest, so ist ihre Temperaturabnahme bei einer Lufttemperatur t und einem Wind von v Metern stets

$$\vartheta = c (30 - t) \sqrt{v},$$

worin nur noch c unbekannt ist. Dasselbe ist aus den Versuchsergebnissen leicht berechenbar. Ich habe die Berechnung für meine sämtlichen Versuche ausgeführt und in Tabelle IX zusammengestellt.

Tabelle IX.

$v =$	23	30	38	51	M i t t e l
$T = 15$	0.097	0.088	0.088	0.097	$= c = 0.092$
25	0.095	0.094	0.100	0.097	$= c = 0.096$
35	0.106	0.095	0.088		$= c = 0.096$

Gesamt-Mittel = 0.094

Nennen wir den Temperaturabfall unserer Glaskugel bei einer Lufttemperatur t und einem Wind v innerhalb 5 Minuten ϑ und setzen ihre Anfangstemperatur zu 30° fest, so ist stets

$$\vartheta = 0.094 (30 - t) \sqrt{v}.$$

Es ist also möglich, für jede beliebige Temperatur und jede Windgeschwindigkeit den Temperaturabfall der Kugel in Celsius-Graden anzugeben. Die resultierenden Werthe stellen die gemeinsame Wirkung der herrschenden Lufttemperatur und des Windes dar, es sind „combinirte“ Ziffern, welche zur Charakteristik der jeweils herrschenden Witterung dienen können. Welche grosse Bedeutung dieselben für meteorologische und klimatologische Beobachtungen haben, wird an anderer Stelle ausführlich dargelegt werden. (Zur besseren Uebersicht und eventuell praktischen Verwendung habe ich in Tabelle X die combinirten Ziffern bis zur Lufttemperatur -5° und bis zur Windgeschwindigkeit 15^m pro Sec. zusammengestellt.) —

Tabelle X.

Abkühlung einer 30° warmen Glaskugel um ... °C. bei t^0 Lufttemperatur
und v Meter Wind innerhalb 5 Minuten.

$v =$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$t = 29^0$	0.09	0.13	0.16	0.19	0.21	0.23	0.25	0.27	0.28	0.30	0.31	0.32	0.34	0.35	0.36
28	0.19	0.26	0.32	0.28	0.42	0.46	0.50	0.53	0.56	0.59	0.62	0.65	0.68	0.70	0.73
27	0.23	0.40	0.49	0.56	0.63	0.69	0.74	0.79	0.85	0.89	0.93	0.98	1.01	1.05	1.09
26	0.33	0.53	0.65	0.75	0.84	0.92	0.99	1.06	1.13	1.19	1.24	1.30	1.35	1.40	1.45
25	0.47	0.66	0.81	0.94	1.05	1.15	1.24	1.33	1.41	1.49	1.56	1.63	1.69	1.76	1.82
24	0.56	0.79	0.97	1.13	1.25	1.37	1.49	1.59	1.69	1.78	1.87	1.95	2.03	2.11	2.18
23	0.66	0.92	1.13	1.32	1.46	1.60	1.74	1.86	1.97	2.08	2.18	2.28	2.37	2.46	2.54
22	0.75	1.06	1.30	1.50	1.67	1.83	1.98	2.12	2.26	2.38	2.49	2.60	2.70	2.81	2.90
21	0.85	1.19	1.46	1.69	1.88	2.06	2.23	2.39	2.54	2.67	2.80	2.93	3.04	3.16	3.27
20	0.94	1.32	1.62	1.88	2.09	2.29	2.48	2.65	2.82	2.97	3.11	3.25	3.38	3.51	3.63
19	1.03	1.45	1.78	2.07	2.30	2.52	2.73	2.92	3.10	3.27	3.42	3.58	3.72	3.86	3.99
18	1.13	1.58	1.94	2.26	2.51	2.75	2.98	3.19	3.38	3.56	3.73	3.90	4.06	4.21	4.46
17	1.22	1.72	2.11	2.44	2.72	2.98	3.22	3.45	3.67	3.86	4.04	4.23	4.39	4.56	4.72
16	1.32	1.85	2.27	2.63	2.93	3.21	3.47	3.71	3.95	4.16	4.35	4.55	4.73	4.91	5.08
15	1.41	1.98	2.43	2.82	3.14	3.44	3.72	3.98	4.23	4.46	4.67	4.88	5.07	5.27	5.45
14	1.50	2.11	2.59	3.01	3.34	3.66	3.97	4.24	4.51	4.75	4.98	5.20	5.41	5.62	5.81
13	1.60	2.24	2.75	3.20	3.55	3.89	4.22	4.51	4.79	5.05	5.29	5.53	5.75	5.97	6.17
12	1.69	2.38	2.92	3.38	3.76	4.12	4.46	4.79	5.08	5.35	5.60	5.85	6.08	6.32	6.53
11	1.79	2.51	3.08	3.55	3.97	4.35	4.71	5.04	5.36	5.64	5.91	6.18	6.42	6.67	6.90
10	1.88	2.64	3.24	3.76	4.18	4.58	4.96	5.30	5.64	5.94	6.22	6.50	6.76	7.02	7.26
9	1.97	2.77	3.40	3.95	4.39	4.81	5.21	5.57	5.92	6.24	6.53	6.83	7.10	7.37	7.62
8	2.07	2.90	3.56	4.14	4.60	5.04	5.46	5.83	6.20	6.53	6.84	7.15	7.44	7.72	7.99
7	2.16	3.04	3.73	4.32	4.81	5.27	5.70	6.10	6.49	6.80	7.15	7.48	7.77	8.07	8.35
6	2.26	3.17	3.89	4.51	5.02	5.50	5.95	6.36	6.77	7.13	7.46	7.80	8.11	8.42	8.71
5	2.35	3.30	4.05	4.70	5.23	5.73	6.20	6.63	7.05	7.43	7.78	8.13	8.45	8.78	9.08
4	2.44	3.43	4.21	4.89	5.43	5.95	6.45	6.89	7.33	7.72	8.09	8.45	8.79	9.13	9.44
3	2.54	3.56	4.37	5.08	5.64	6.18	6.70	7.16	7.61	8.02	8.40	8.78	9.13	9.48	9.80
2	2.63	3.70	4.54	5.26	5.85	6.41	6.94	7.42	7.90	8.32	8.71	9.10	9.46	9.83	10.16
1	2.73	3.83	4.70	5.45	6.06	6.64	7.19	7.69	8.18	8.61	9.02	9.43	9.80	10.18	10.53
0	2.82	3.96	4.86	5.64	6.27	6.87	7.44	7.95	8.46	8.91	9.33	9.75	10.14	10.53	10.89
— 1	2.91	4.09	5.02	5.83	6.48	7.10	7.69	8.22	8.74	9.21	9.64	10.08	10.48	10.88	11.25
— 2	3.01	4.22	5.18	6.07	6.69	7.33	7.94	8.48	9.02	9.50	9.95	10.40	10.82	11.23	11.62
— 3	3.10	4.36	5.35	6.20	6.90	7.56	8.18	8.75	9.31	9.80	10.26	10.73	11.15	11.58	11.98
— 4	3.20	4.49	5.51	6.40	7.11	7.79	8.43	9.01	9.59	10.10	10.57	11.05	11.49	11.93	12.34
— 5	3.29	4.62	5.67	6.59	7.32	8.02	8.68	9.26	9.87	10.40	10.89	11.38	11.83	12.29	12.71

Ebenso sei hier nur kurz darauf hingewiesen, dass sich an der Hand des Windgesetzes auch die Wirkung der stossweisen Winde, welche ja gerade im Freien die grösste Rolle spielen, in einfacher und übersichtlicher Weise zur Darstellung bringen lässt. —

Es erübrigt nun noch, die Gültigkeit des Gesetzes auch für die Grenzwerte von v zu untersuchen. Gehen wir wiederum von der Formel

$$\frac{W_W}{W_{St}} = c \sqrt{v} = \sqrt{c^2 v}$$

aus; wird die Windgeschwindigkeit v immer kleiner, so wird sie zunächst den reciproken Werth von c^2 erreichen, also

$$\frac{W_W}{W_{St}} = \sqrt{c^2 \cdot \frac{1}{c^2}}$$

sein, also

$$\frac{W_W}{W_{St}} = 1$$

oder

$$W_W = W_{St}.$$

Es würde also unter unseren Versuchsbedingungen bei einem Wind von $\frac{1}{7.24} = 0.13^m$ pro Sec., mithin bei relativ starkem Wind, nur dieselbe Wärmeabgabe stattfinden, wie in Windstille. Die Formel würde also für alle der 0 benachbarten Werthe von v ungültig sein. Dieser Widerspruch ist jedoch lösbar; er beruht darauf, dass der in den Tabellen als „Windstille“ bezeichnete Zustand der Luft kein idealer Beharrungszustand ist, keine mathematische Windstille, in welcher $v = 0$ zu setzen ist, sondern eine, wenn auch geringe, so doch unter natürlichen Verhältnissen durch Heizung, Ventilation, Erschütterungen u. s. w. stets vorhandene Bewegung der Luft, welche nur im Gegensatz zu den starken, mit Hülfe des Ventilators erzeugten Luftströmen als Windstille aufgefasst werden konnte. Diese natürliche Luftbewegung muss aber noch eine besondere Steigerung in der Nähe des warmen Objectes erfahren, längs dessen je nach Temperaturdifferenz, Lage und Form ein mehr oder minder lebhafter Ventilationsstrom hinstreichen wird und in unserem besonderen Falle mit durchschnittlich 13^m pro Sec. vielleicht nicht zu hoch gefunden ist. Setzen wir statt des, in den Tabellen als Windstille bezeichneten, Zustandes der Luft die eben genannte Luftbewegung ein, so ist die Formel auch für sehr kleine Werthe von v brauchbar, ja selbst bis an die äussersten Grenzwerte einer Deutung zugänglich. Wird nämlich $v = 0$, so wird — in der Scheitelformel der Parabel — auch $y = 0$, d. h. der gesuchte Werth liegt im Schnittpunkt der x - und y -Axe. Unter realen Verhältnissen ist $v = 0$ nur denkbar, wenn sich das Object im luftleeren Raume oder in

Luft von einer, mit der Oberflächentemperatur des Körpers übereinstimmenden Temperatur befindet, also unter Verhältnissen, wo die Wärmeabgabe durch Leitung überhaupt ausgeschlossen ist. — Wird hingegen die Windgeschwindigkeit v immer grösser, so flacht sich die Curve mehr und mehr ab, bis sie schliesslich bei $v = \infty$ der Abscisse parallel läuft. Interessanter Weise existiren zwei real denkbare Möglichkeiten, wo selbst eine solche, unendlich starke Bewegung des Mediums keine Multiplikation der Wärmeabgabe zu Stande bringt, nämlich wiederum im luftleeren Raum und im gleichwarmen Luftbade, also wiederum unter Bedingungen völlig behinderter Wärmeleitung. —

Schliesslich will ich noch der bemerkenswerthen Thatsache Erwähnung thun, dass Schierbeck¹ die austrocknende Wirkung des Windes gleichfalls proportional der Quadratwurzel aus seiner Geschwindigkeit gefunden hat, eine Analogie, welche bei der Aehnlichkeit des Verdunstungs- und Abkühlungsprocesses gewiss im Sinne einer Bestätigung des Windgesetzes verwerthet werden darf. —

Die Verfolgung des Windeinflusses auch auf lebende Wesen, insbesondere auf den Menschen, ist weiteren Versuchen vorbehalten, mit deren Ausführung ich beschäftigt bin.

¹ Schierbeck, Ueber die Bestimmung des Feuchtigkeitsgrades der Luft für physiologische und hygienische Zwecke. *Archiv für Hygiene*. 1895. Bd. XXV. S. 196.