Verschiedene Konstruktionen

Scholtz, Adolf

Leipzig, 1900

Drittes Kapitel. Transmission der Wärme durch feste Wände.

Drittes Kapitel.

Transmission der Wärme durch feste Wände.

§ 13.

Vorbemerkungen.

Wenn zwei elastische oder tropfbare Flüssigkeiten von verschiedener Temperatur durch eine feste Wand von gleicher Dicke getrennt sind, so geht in einer bemessenen Zeit eine bestimmte Wärmemenge von der wärmeren zur kälteren Flüssigkeit über. Die Größe des Wärmeüberganges ist einerseits abhängig von dem Material, der Form und Lage und den Abmessungen der Wand, andererseits von der Art der sie berührenden Flüssigkeiten, deren Temperaturen und den Bewegungen, welche dieselben längs der Wand hin haben können.

Mit Bezug auf letzteren Umstand können wir als häufig vorkommend unterscheiden:

a) Den Wärmeübergang ohne Strom, wenn beide Flüssigkeiten stagnieren, d. h. keine Bewegung längs der Wand haben, als etwa die durch Ungleichheit der Temperatur hervorgerufene. Dieser Fall liegt vor bei jedem geschlossenen Raume, in dem die Luft wärmer ist als außen; ein Teil der Wärme geht fortwährend durch die umschließenden Wände verloren.

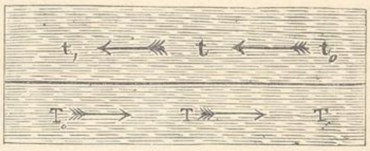
b) Der Wärmeübergang mit einfachem Strome kommt bei Dampfkesseln vor, wo eine Seite der Kesselwandung durch das Wasser berührt wird, während die heißen Feuergase die äußere Seite der Kesselwand bestreichen.

c) Wärmeübergang mit Parallelstrom ist u. a. vorhanden, wenn ein Ventilationskamin durch einen darin central aufgestellten und von Heizgasen durchströmten eisernen Schornstein erwärmt wird; dadurch soll eine aufwärts und parallel gerichtete Bewegung der Ventilationsluft hervorgerufen werden.

d) Der Wärmeübergang mit Gegenstrom wird dargestellt durch Fig. 29.

Um zu einem analytischen Ausdruck zu gelangen für den Zustand einer ruhig stehenden Flüssigkeit in Berührung mit einer Wand, wird man die Temperatur an allen Punkten derselben als gleich ansehen dürfen. Außerdem läßt sich annehmen, daß der stagnierenden Flüssigkeit durch eine geeignete Wärmequelle unaufhörlich so viel Wärme zugeführt wird, als sie selbst an die Wand abgiebt, und daß daher die betreffende Flüssigkeit nicht nur in allen Teilen gleich, sondern auch in Bezug auf die Zeitdauer konstant sei.

Fig. 29.



Beharrungszustand. Betrachten wir nun eine homogene Wand von gleicher Dicke, welche einen geschlossenen Wohnraum von der äußeren atmosphärischen Luft trennt, und soll dieser Raum auf einer gegebenen konstanten Temperatur T erhalten werden; ist auch die Temperatur t der Außenluft überall gleich und konstant und $T > t$, so wird die innere Fläche F_1 der Wand (die wir als eben voraussetzen) mit der Luft von der Temperatur T in Berührung kommen. Hierdurch werden deren Moleküle erwärmt, und sobald ihre Temperatur steigt, teilen sie den unmittelbar dahinter gelegenen Molekülen die Wärme mit. Dieser Vorgang wiederholt sich und setzt sich fort bis zur äußeren Wandfläche F_2, die mit der Luft von der Temperatur t in Berührung ist; auch werden die Erscheinungen sich in jedem beliebigen Stück der homogenen Wand zwischen den beiden Begrenzungsflächen wiederholen und es wird endlich ein Zeitpunkt eintreten, wo nicht nur die Begrenzungsflächen F_1 und F_2, sondern auch alle damit parallelen Durchschnittsebenen F_x im Innern der Wand isothermische Flächen bilden.

Denkt man die Wand durch eine Reihe solcher Flächen, die gleich weit voneinander abstehen, in eine große Anzahl dünner Schichten oder Elementarplatten geteilt, so werden offenbar die Temperaturen dieser Schichten anfänglich von F_1 nach F_2 hin progressiv abnehmen. Auch die Temperaturdifferenzen zweier benachbarten isothermischen Flächen werden allmählich von F_1 nach F_2 hin abnehmen, weil die zwischenliegenden Schichten von der einen Seite mehr Wärme aufnehmen, als sie an die benachbarte Schicht abgeben, einen Teil also festhalten und dadurch ihre Temperatur erhöhen. Mit dem Anwachsen der Temperatur nehmen aber die vorgenannten Differenzen mehr und mehr ab und mit ihnen auch die Differenzen der Wärmemengen, welche von den einzelnen Schichten aufgenommen und abgegeben wurden. So tritt schließlich ein Zustand ein, wo jede Schicht von der vorhergehenden gerade so viel Wärme empfängt, als sie in derselben Zeit an die folgende abgiebt, d. h. die Wärmemenge, welche innerhalb gegebener Zeit durch irgend eine isothermische Fläche hindurchgeht, ist konstant. Solange also die Temperaturen T und t sich nicht ändern, bleiben die Temperaturen der isothermischen Flächen stationär. Diese Grenze ist der Beharrungszustand.

Sobald man aufhört, die Temperatur der Zimmerluft mittels der Wärmequelle auf T zu erhalten, nehmen die Temperaturen der Wandmoleküle wieder ab. Man nennt diese Phase wohl auch den Endzustand. Die, dem Beharrungszustande vorhergehende Phase des Wärmeüberganges, während welcher die Temperaturen der Wandmoleküle allmählich und bis zur Grenze steigen, wird als Anfangszustand unterschieden.

§ 14.

Wärmeverluste bei konstanten Temperaturen.

Zur Bestimmung der Wärmemenge, welche durch eine ebene Wand von gleicher Dicke hindurchgeht, wenn die berührenden Medien auf konstanter Temperatur gehalten werden, hatte Péclet, unter Zugrundelegung des bekannten Gesetzes von Dulong und Pétit, eine Reihe von Versuchen über die Abkühlung dünnwandiger Gefäße aus Metall angestellt und 1854 veröffentlicht. Er kam dabei zu folgenden Resultaten[1]):

1) Die Abkühlung eines Körpers ist abhängig von seiner Strahlung gegen die umgebende Luft und von dem Kontakt desselben mit der Luft, d. h. von der Leitung.

2) Die durch Strahlung emittierte Wärmemenge R ist gegeben durch die Formel:
$$R = K\,\Theta\,(1 + 0{,}0056\,\Theta).$$

3) Die durch Leitung verlorene Wärmemenge A drückt sich aus durch:
$$A = K^1\,\Theta\,(1 + 0{,}0075\,\Theta).$$

In diesen Formeln bezeichnet:

Θ die Temperaturdifferenz zwischen dem erkaltenden Körper und seiner Umgebung, und

K einen Koeffizienten, welcher abhängig ist von der Natur der Oberfläche, während

K^1 einen von der Form und den Dimensionen des Körpers abhängigen Koeffizienten bezeichnet.

Wenn man statt der beiden Koeffizienten 0,0056 und 0,0075 das arithmetische Mittel aus beiden setzt, so erhält man mit hinreichender Genauigkeit für den totalen Wärmeverlust W die Gleichung:
$$W = R + A = (K + K_1)\,.\,\Theta\,.\,(1 + 0{,}0065\,\Theta).$$

Für schwache Temperaturdifferenzen ($\Theta < 20^0$) kann man die Glieder zweiten Grades vernachlässigen und hat dann:
$$W = R + A = (K + K^1)\,\Theta \quad . \; . \; . \quad (1)$$

Der Ausdruck 1) heißt das Gesetz von Newton; es gilt nur innerhalb der Grenzen $\Theta > 25$ und $< 65^0$ und für eine Lufttemperatur $T = 12^0$. Für höhere Temperaturdifferenzen muß man die Formeln von Dulong und Pétit benutzen.

Um den Ausdrücken für R und A eine allgemeine Form zu geben und die Koeffizienten K und K^1 feststellen zu können, betrachten wir nunmehr:

I. Die Emission der Wärme.

Auf Grund seiner Versuche kam Péclet zu folgenden Resultaten:

a) Die Quantität der durch die Flächeneinheit **gestrahlten** Wärme ist unabhängig von der Form und Größe des Körpers, dagegen abhängig von der Natur der Oberfläche, von der absoluten Temperatur derselben und von der Temperaturdifferenz zwischen dem Wärme abgebenden Körper und der ihn umgebenden Luft.

Die Quantität der pro Quadratmeter und Stunde gestrahlten Wärme ist gegeben durch die Formel:
$$R = 124{,}72\,K\,a^t\left(a^{\Theta} - 1\right) \quad . \; . \; . \quad (2)$$

worin:

Θ die Temperaturdifferenz zwischen der Wärme abgebenden Fläche und der umgebenden Luft bezeichnet,

t die Temperatur der äußeren Luft,

a die konstante Zahl 1,007 und

K das Strahlungsvermögen, d. h. eine von der Natur der Oberfläche abhängige Zahl.

Tabelle IV enthält die Werte von K für die in der Praxis vorkommenden wichtigeren Substanzen.

Tabelle IV. Werte K des Strahlungsvermögens für verschiedene Substanzen.

Kupfer	0,16	Sand, feinkörnig	3,62
Messing	0,26	Bausteine	3,60
Zinn	0,21	Glas	2,91
Zink	0,24	Holz	3,60
Blech, poliert	0,45	Wolle	3,68
Weißblech	0,65	Seide	3,71
Blech, oxydiert	3,36	Ölfarbenanstrich	3,71
Gußeisen, neu	3,17	Papier	3,77
„ oxydiert	3,36	Wasser	5,31

1) Péclet. Traité de la chaleur. Tome III, Note X.

b) Der Wärmeverlust durch **Leitung** ist unabhängig von der Natur der Oberfläche des Körpers und von der Temperatur der Umgebung; aber er ist abhängig von der Temperaturdifferenz des Wärme abgebenden Körpers gegen die ihn umgebende Luft, auch von der Form und den Dimensionen des Körpers.

Der Wärmeverlust durch Leitung ist pro Quadratmeter und Stunde gegeben durch die Formel:

$$A = 0{,}552\, K^1\, \Theta^{1{,}233} \quad . \; . \; . \; . \quad (3)$$

Hierin bedeutet:

Θ die Temperaturdifferenz zwischen dem Körper und der umgebenden Luft, und

K^1 eine Zahl, welche mit der Form und den Dimensionen des Körpers wechselt.

Für den Koeffizienten K^1 fand Péclet aus seinen Versuchen folgende empirische Formeln für Körper in Berührung mit Luft.

Tabelle V.

Kugelfläche vom Halbmesser r	$K^1 = 1{,}778 + \frac{0{,}13}{r}$	a.
Horizontale Cylinderfläche vom Halbmesser r	$K^1 = 2{,}058 + \frac{0{,}0382}{r}$	b.
Vertikaler Cylinder vom Halbmesser r und von der Höhe h	$K^1 = \left(0{,}726 + \frac{0{,}0345}{\sqrt{r}}\right) \cdot \left(2{,}43 + \frac{0{,}8758}{\sqrt{h}}\right)$	c.
Vertikale ebene Fläche von der Höhe h	$K^1 = 1{,}764 + \frac{0{,}636}{\sqrt{h}}$	d.

Anm. Die Formel d ergiebt sich aus c, wenn $r = \infty$ gesetzt wird.

In Tabelle V^a sind die Werte von K^1 für ebene vertikale Flächen und für verschiedene Werte von h berechnet.

Tabelle V^a.

Werte von h in Metern	Werte von K^1	Werte von h in Metern	Werte von K^1
0,10	3,775	2,00	2,21
0,20	3,186	3,00	2,13
0,30	2,926	4,00	2,08
0,40	2,770	5,00	2,05
0,50	2,663	10,00	1,96
0,60	2,585	15,00	1,92
1,00	2,400	20,00	1,90

c) Die Resultate seiner Versuche faßt Péclet endlich zusammen in der Formel:

$$W = 124{,}72\, K\, a^t \left(a^{\Theta} - 1\right) + 0{,}552\, K^1\, \Theta^{1{,}233} \quad . \quad (4)$$

oder auch:

$$W = S \,.\, K + L K^1,$$

wenn man setzt:

$$124{,}72\, a^t \left(a^{\Theta} - 1\right) = S \text{ und } 0{,}552\, \Theta^{1{,}233} = L.$$

In Tabelle VI sind für verschiedene Temperaturdifferenzen die entsprechenden Werte von S und L für Intervalle von 10° zusammengestellt, wobei die Temperatur des umgebenden Raumes t = 15° angenommen wurde.

Tabelle VI.

Temperaturdifferenz Θ	Werte von S	$\triangle'$	L	$\triangle'$	Temperaturdifferenz Θ	Werte von S	$\triangle'$	L	$\triangle'$
10°	11,2	12,0	9,4	12,8	140°	269,5	32,6	244,4	21,7
20°	23,2	12,9	22,2	14,4	150°	302,1	36,9	266,1	22,0
30°	36,1	14,0	36,6	15,6	160°	339,0	38,4	288,1	22,4
40°	50,1	15,2	52,2	16,4	170°	377,4	41,1	310,5	22,7
50°	65,3	16,4	68,6	17,4	180°	418,5	44,7	333,2	22,9
60°	81,7	17,6	86,0	18,0	190°	463,2	48,0	356,1	23,3
70°	99,3	19,2	104,0	18,6	200°	511,2	51,9	379,4	23,5
80°	118,5	20,2	122,6	19,1	210°	563,1	55,9	402,9	23,8
90°	138,7	22,6	141,7	19,8	220°	619,0	60,5	426,7	24,0
100°	161,3	24,0	161,5	20,0	230°	679,5	65,3	450,7	24,3
110°	185,3	26,0	181,5	20,6	240°	744,8	69,9	475,0	23,6
120°	211,3	28,0	202,1	21,0	250°	814,7		498,6	
130°	239,3	30,2	223,1	21,3					

Anm. Wenn die Temperatur t des umgebenden Raumes mehr oder weniger als 15° ist, so sind die Werte von S in vorstehender Tabelle mit den in Tabelle VII enthaltenen Korrektions-Faktoren zu multiplizieren.

Tabelle VII.

t =	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°	100°
Korrekt.-Faktor	0,89	0,96	1,04	1,12	1,21	1,31	1,41	1,52	1,65	1,78	1,92

Liegt die Temperaturdifferenz Θ zwischen zwei Werten der Tabelle VI, so wird zur Entnahme der entsprechenden Werte von S und L eine kleine Interpolation erforderlich, bei welcher, da die Funktionen S und L nicht proportional mit dem Argument Θ anwachsen, neben der ersten Differenzreihe, welche in der Tabelle beigefügt ist, auch noch die zweite, die Differenzen dieser Differenzen zu berücksichtigen ist.

Es werde angenommen, das Argument Θ liege zwischen den Tafelwerten Θ_0 und Θ_1, welchen die Funktionen S_0

und S_1 entsprechen. Man nimmt zu diesen noch das nächstfolgende S_2 und bildet die Differenzen:

$$\begin{matrix} S_1 - S_0 = \triangle'_0 \\ S_2 - S_1 = \triangle'_1 \end{matrix} \quad \triangle'_1 - \triangle'_0 = \triangle''.$$

Für das Argument $\Theta = \Theta_0 + n$ (wo n von 0 bis 10 variiert) hat man dann zu rechnen:

$$S = S_0 + \frac{n}{10}\triangle'_0 + \frac{n(n-10)}{200}\triangle''$$

und ganz analog:

$$L = L_0 + \frac{n}{10}\triangle'_0 + \frac{n(n-10)}{200}\triangle''.$$

Zu dem Werte $\Theta = 35^0$ findet man z. B. die entsprechenden S und L folgendermaßen:

$$\begin{matrix} \Theta_0 = 30 & S_0 = 36{,}1 \\ \Theta_1 = 40 & S_1 = 50{,}1 \\ \Theta_2 = 50 & S_2 = 65{,}3 \end{matrix} \quad \begin{matrix} \triangle'_0 = +14{,}0 \\ \triangle'_1 = +15{,}2 \end{matrix} \quad \triangle'' = +1{,}2$$

$$n = 5 \quad \frac{n(n-10)}{200} = -\frac{1}{8}$$

$$S = 36{,}1 + \frac{1}{2}\cdot 14{,}0 - \frac{1}{8}\cdot 1{,}2 = 43{,}0$$

$$\begin{matrix} L_0 = 36{,}6 \\ L_1 = 52{,}2 \\ L_2 = 68{,}6 \end{matrix} \quad \begin{matrix} \triangle'_0 = +15{,}6 \\ \triangle'_1 = +16{,}4 \end{matrix} \quad \triangle'' = +0{,}8$$

$$L = 36{,}6 + \frac{1}{2}\cdot 15{,}6 - \frac{1}{8}\cdot 0{,}8 = 44{,}3.$$

Es sei ferner gegeben $\Theta = 212^0$, dann ergiebt sich, da $\Theta_0 = 210$, $S_0 = 563{,}1$, $L_0 = 402{,}9$, $n = 2$

$$S = 563{,}1 + \frac{2}{10}\cdot 55{,}9 - \frac{16}{200}\cdot 4{,}6 = 573{,}9$$

$$L = 402{,}9 + \frac{2}{10}\cdot 23{,}8 - \frac{16}{200}\cdot 0{,}2 = 407{,}6.$$

Bei Benutzung der Tabelle VII genügt es, linear zu interpolieren, also nur die ersten Differenzen zu berücksichtigen; so ergiebt sich für 67^0 der Korrektions-Faktor:

$$1{,}41 + \frac{7}{10}(1{,}52 - 1{,}41) = 1{,}49.$$

Bezeichnen also S und L ganz allgemein zwei aus Tabelle VI und VII entnommene Zahlen, so hat man als Ausdruck für die Emission durch Strahlung und Leitung (Formel (4) der Péclet'schen Resultate)

$$W = \left(\frac{S.K + L.K^1}{\Theta}\right)\Theta \quad . \; . \; . \quad (4^a)$$

worin Θ der Temperaturunterschied zwischen dem abkühlenden Körper und seiner Umgebung. Der Ausdruck

$$\frac{S.K + L.K^1}{\Theta}$$

wird der äußere Wärmeleitungs-Koeffizient, auch der Wärmeabgabe-Koeffizient genannt. Bezeichnet man denselben mit Q, so ist $W = Q\,\Theta$, und setzt man $\Theta = 1^0$, so ist

$$W = Q,$$

d. h. der **äußere Wärmeleitungs-Koeffizient** ist die Anzahl der Wärmeeinheiten, welche von den beiden Begrenzungsflächen einer Wand pro Quadratmeter und Stunde aufgenommen oder abgegeben werden, wenn die Temperaturdifferenz Θ zwischen Wand und berührender Flüssigkeit 1^0 C. beträgt.

Anwendung der Formeln.

1. Beispiel. Ein häufig vorkommender Fall ist die Berechnung der Wärmeabgabe von Dampfheizröhren. Es soll die Anzahl von Wärmeeinheiten gesucht werden, welche ein Quadratmeter gußeisernes horizontales Heizrohr stündlich emittiert, wenn dasselbe durch Dampf von 100^0 erhitzt wird und die Temperatur der Umgebung 15^0 beträgt.

Nach den Resultaten von Péclet bestimmt sich die Emission durch Strahlung und Leitung mittels der Formel (4)

$$W = S.K + L.K^1.$$

Aus Tabelle IV findet man für Gußeisen $K = 3{,}36$.

Zur Berechnung von K^1 dient die Formel b der Tabelle V

$$K^1 = 2{,}058 + \frac{0{,}0382}{r},$$

worin r den Durchmesser des horizontalen Cylinders bezeichnet. Setzt man für r nacheinander die Werte

0,05 0,10 0,15,

so findet man $K^1 =$

2,82 2,44 2,31.

Θ ist im vorliegenden Falle $= 85^0$, also nach vorstehender Anleitung:

$$S = 128{,}3; \quad L = 132{,}1.$$

Nunmehr findet man:

für $r = 0{,}05$ $W = 128{,}3 . 3{,}36 + 132{,}1 . 2{,}82 = 804$ Wärmeeinh.,
„ $r = 0{,}10$ $W = 128{,}3 . 3{,}36 + 132{,}1 . 2{,}44 = 753$ „
„ $r = 0{,}15$ $W = 128{,}3 . 3{,}36 + 132{,}1 . 2{,}30 = 735$ „

Wird das cylindrische Rohr jedoch vertikal angebracht, so ist zur Bestimmung von K^1 die Formel c zur Anwendung zu bringen:

$$K^1 = \left(0{,}726 + \frac{0{,}0345}{\sqrt{r}}\right)\cdot\left(2{,}43 + \frac{0{,}8758}{\sqrt{h}}\right);$$

unter r den Radius und unter h die Höhe des Cylinders verstanden.

Die nachstehende Tabelle VIII enthält für eine gewisse Anzahl von Höhen und Halbmessern die zugehörigen Werte von K^1.

Tabelle VIII.

Halbmesser des Cylinders	Höhe des Cylinders in Metern					
	0,50	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00
0,025	3,55	3,20	2,95	2,84	2,79	2,73
0,05	3,22	2,90	2,68	2,57	2,52	2,48
0,10	3,05	2,75	2,54	2,44	2,39	2,35
0,20	2,93	2,65	2,45	2,35	2,30	2,26
0,30	2,88	2,60	2,40	2,31	2,26	2,22

2. Beispiel. Es ist die totale Emission eines 4 m langen, vertikalen, gußeisernen, cylindrischen Rohres zu berechnen, dessen Temperatur durch Dampf auf 100° gehalten wird, während die umgebende Luft 10° beträgt.

Aus Tabelle VIII findet man:

für $h = 4{,}0$ m und $r = 0{,}05$, $K^1 = 2{,}52$,
„ $h = 4{,}0$ „ „ $r = 0{,}10$, $K^1 = 2{,}39$.

Der Strahlungs-Koeffizient für Gußeißen ist: $K = 3{,}36$.

Da die Temperaturdifferenz im vorliegenden Falle 90° beträgt, so hat man nach Tabelle VI:

$$S = 138{,}7 \text{ und } L = 141{,}7.$$

Weil aber die Temperatur t der Luft nur 10° ist, so haben wir den Wert von S zu multiplizieren mit dem Korrektionsfaktor 0,96 (Tabelle VII), so daß

$$S = 133{,}15 \text{ und } L = 141{,}7 \text{ (wie oben).}$$

Endlich findet man:

für $r = 0{,}05$ $W = 133{,}15 \,.\, 3{,}36 + 141{,}7 \,.\, 2{,}52 = 804$ Wärmeeinh.
„ $r = 0{,}10$ $W = 133{,}15 \,.\, 3{,}36 + 141{,}7 \,.\, 2{,}39 = 786$ „

Bestände das cylindrische Rohr aus Kupfer, so ist unter sonst gleichen Verhältnissen nur der betreffende Koeffizient K einzusetzen. Nach Tabelle IV ist das Strahlungsvermögen des Kupfers 0,16, daher

für $r = 0{,}05$ $W = 133{,}15 \,.\, 0{,}16 + 141{,}7 \,.\, 2{,}52 = 378$ Wärmeeinh.

Vertikale Flächen endlich geben Leitungs-Koeffizienten, welche der Formel d in Tabelle V entsprechen. Ist nämlich h die Höhe der Fläche, so ist

$$K^1 = 1{,}764 + \frac{0{,}636}{\sqrt{h}}.$$

3. Beispiel. Ein gußeisernes Reservoir von rechteckiger Grundform wird mittels zuströmender Dämpfe auf einer Temperatur von 100° erhalten. Die Temperatur der Umgebung beträgt 0°; es soll der totale Wärmeverlust durch die Wandungen pro Quadratmeter und Stunde gefunden werden.

Für die Temperaturdifferenz $\Theta = 100°$ ist nach Tabelle VI und VII:

$$S = 161{,}3 \,.\, 0{,}89 = 143{,}5 \text{ und } L = 161{,}5.$$

Für Gußeisen ist $K = 3{,}36$ und K^1 bei 1 m Höhe $= 2{,}40$ (Tabelle Va), daher

$W = 143{,}5 \,.\, 3{,}36 + 161{,}5 \,.\, 2{,}40 = 482{,}1 + 387{,}6 = 869{,}7$ W.-E.

Alle diese Formeln beziehen sich auf Fälle, wo der emittierende Körper konstant dieselbe Wärmemenge inne hat, wie dies bei Dampfgefäßen geschieht, in denen immer frischer Dampf nachströmt und die abgegebene Wärme ersetzt. Auch wenn Wasser der Wärme abgebende Körper ist, können diese Formeln Anwendung finden, jedoch nur unter der Voraussetzung, daß die Masse der Flüssigkeit groß genug ist, um wenigstens für eine gewisse Zeit als konstante Wärmequelle angesehen werden zu können. — Jedenfalls ist in allen vorgeführten Beispielen die Annahme gemacht, daß die Transmission durch dünne Metallwände hindurch stattfinde, deren Leitungsvermögen größer ist oder ebenso groß als dasjenige des Wärme abgebenden Körpers.

Sind die Wände, durch welche der Wärmeverlust stattfindet, von einiger Dicke, so gelten zwar die Koeffizienten für Strahlung und Leitung an die Wärme aufnehmende Luft, aber es kommt alsdann ein neuer Faktor hinzu, die Leitungsfähigkeit desjenigen Materiales, aus dem die Wand hergestellt ist. Auch diesen Koeffizienten hat Péclet für eine große Anzahl von Körpern bestimmt.[1])

§ 15.

II. Transmission der Wärme.

Um zu einem Ausdruck zu gelangen für die Wärmemenge, welche in der Zeiteinheit die Flächeneinheit einer homogenen ebenen Wand von konstanter Dicke durchdringt, knüpfen wir wiederholt an die in § 12 aufgestellte Hypothese der Wärmefortpflanzung im Innern dieser Wand. Die im Beharrungszustande durch unendlich dünne Schichten transmittierte Wärmemenge ist nun direkt proportional der Oberfläche F und der Temperaturdifferenz der beiden Außenflächen τ_1 und τ_2 der

1) Péclet. Traité de la chaleur. Der Apparat bestand aus Gefäßen desjenigen Materiales, dessen Wärmeleitungsfähigkeit man suchte bei verschiedener Dicke, verschiedener Form und Dimensionen. Sie wurden bald von außen, bald von innen mit heißem Wasser oder Dampf in Berührung gebracht. Durchlässige und pulverförmige oder faserige Körper wurden mit dünnen Schichten einer dichten Substanz bekleidet. Da die entsprechenden Werte für die Oberflächen bekannt waren, konnte man die Leitungsfähigkeit der eingeschlossenen Substanz wohl berechnen.

Wand, aber umgekehrt proportional der Dicke e derselben; d. h. es ist der Wärmeverlust gegeben durch die Gleichung:

$$W = \lambda \left(\frac{\tau_1 - \tau_2}{e} \right) . F \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

Diese Formel ist durch die Erfahrung bestätigt und liefert Resultate von hinreichender Genauigkeit.

λ ist ein vom Material der Wand abhängiger Wert, er wird der innere Wärmeleitungs-Koeffizient der Substanz genannt.

Nimmt man als Längeneinheit das Meter, als Flächeneinheit das Quadratmeter und als Zeiteinheit die Stunde, so wird für $\tau_1 - \tau_2 = 1$, $F = 1$ und $e = 1$,

$$W = \lambda,$$

d. h. der innere Wärmeleitungs-Koeffizient einer Substanz ist die Anzahl von Wärmeeinheiten, welche in der Stunde durch das Quadratmeter einer ebenen, ein Meter dicken Wand von dieser Substanz hindurchgehen, wenn deren Begrenzungsebenen auf einen Grad Temperaturdifferenz gehalten werden.

Tabelle IX enthält die in der Technik am häufigsten vorkommenden Werte von λ, wie sie von Péclet auf Grund seiner Experimente und der Versuche von Despretz abgeleitet wurden,[1]) und die zugehörigen spezifischen Gewichte der Substanzen.

Tabelle IX.

Substanz	Spezifisches Gewicht	Wärmeleitungs-Koeffizient λ
Grauer Marmor, feinkörnig	2,68	3,48
Weißer Marmor, grobkörnig	2,77	2,78
Kalkstein, feinkörnig	2,34	2,08
" "	2,17	1,70
Lias-Kalkstein	2,24	1,32
Feiner Gips, zu Mörtel angerührt . .	1,25	0,52
Gebrannter Thon	1,98	0,69
" "	1,85	0,51
Tannenholz, senkrecht zu den Fasern . .	0,48	0,09
" parallel " " " . .		0,17
Eichenholz, senkrecht zu den Fasern . .	0,664	0,20
Glas	2,44	0,75
"	2,55	0,88
Quarzsand	1,47	0,27
Holzasche	0,45	0,06
Graues Papier, ungeleimt	0,48	0,034
Eisen	7,79	28,00
Kupfer	8,90	69,00
Zinn	7,29	22,00

1) E. Péclet. Traité de la chaleur.

Mittels der Gleichung (5) und der Tabelle IX läßt sich die Wärmemenge berechnen, welche in der Zeiteinheit (Stunde) durch eine Wand bestimmten Materiales transmittiert wird, wenn man die Temperatur ihrer beiden Oberflächen kennt. Aber diese sind meist nicht bekannt und können nur durch Untersuchungen gefunden werden, welche in der Praxis schwer ausführbar sind. Man muß also suchen, zwei weitere Gleichungen zwischen τ_1 und τ_2 und den bekannten Temperaturen der Luft T und t herzustellen, mit deren Hilfe man τ_1 und τ_2 eliminiert und W als Funktion der Lufttemperaturen darstellt.

Da nun im Beharrungszustande (und innerhalb der Grenzen, für welche das Gesetz von Newton gilt) sich die Erwärmung der inneren Oberfläche und die Abkühlung der äußeren Oberfläche nach demselben Gesetz vollzieht, d. h. die Wärmemenge, welche in die innere Oberfläche der Wand eindringt, gleich derjenigen ist, welche in derselben Zeit durch die Außenfläche ausströmt, gleich derjenigen, welche durch irgend eine isothermische Fläche des betrachteten Wandstückes geht: so erhält man drei verschiedene Ausdrücke für die Wärmemenge W, welche pro Flächeneinheit und Stunde transmittiert wird. In dem obigen Ausdruck unter 4a erscheint W als Funktion des äußeren Wärmeleitungs-Koeffizienten, während Gleichung (5) den Wärmeverlust als Funktion des inneren Wärmeleitungs-Koeffizienten λ giebt. Zur Erzielung einfacher Resultate wendet nun Péclet nicht die Dulong'schen Formeln (2) und (3), auch nicht die einfacheren Formeln an, welche für den speziellen Fall $T = 12^{\circ}$ gelten, sondern die Gleichung (1), welche als „Gesetz von Newton" bezeichnet wurde:

$$W = (K + K^1)\, \Theta.$$

Dies Gesetz ist für schwache Temperaturdifferenzen hinreichend genau, um so mehr, als man in allen Rechnungen, die sich auf Transmission der Wärme beziehen, nur Näherungswerte erhalten kann und Nebenumstände, als Wirkung der Sonne und des Windes, nicht in Betracht gezogen werden können.

Der Wärmeverlust infolge der inneren Wärmeleitungsfähigkeit des Materiales berechnet sich also nach Gleichung (5) für die Flächeneinheit wie folgt:

$$W = \frac{\lambda\, (\tau_1 - \tau_2)}{e}.$$

Dagegen wird von der inneren Wandfläche nach dem Gesetz von Newton pro Quadratmeter und Stunde aufgenommen die Wärmemenge:

$$W = (K + K^1)\, (T - \tau_1) = Q\, (T - \tau_1)$$

und von der äußeren Fläche wird abgegeben die Wärmemenge

$$W = (K + K^1)\, (\tau_2 - t).$$

Im Beharrungszustande sind diese drei Wärmemengen gleich und es folgt durch Elimination:

$$\tau_1 = \frac{T(\lambda + Qe) + \lambda t}{2\lambda + Qe} \qquad \tau_2 = \frac{t(\lambda + Qe) + T\lambda}{2\lambda + Qe}$$

endlich ist

$$W = \frac{\lambda . Q}{2\lambda + Qe}(T - t)^{1)} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (6)$$

Setzt man $T - t = 1$, so ersieht man leicht, daß $\frac{\lambda Q}{2\lambda + Qe}$ die Anzahl Wärmeeinheiten angiebt, welche im Beharrungszustande pro Stunde durch das Quadratmeter der Begrenzungsfläche der Wand hindurchgehen, wenn die Temperaturdifferenz der berührenden Luftschichten 1° C. beträgt. Dieser Wert wird der „Transmissions-Koeffizient" oder der „Wärmedurchgangs-Koeffizient" genannt.

Ist der Ausdruck Qe sehr klein im Verhältnis zu 2λ, dann kann derselbe vernachlässigt werden und die Gleichung (6) erhält die einfachere Gestalt

$$W = \frac{Q}{2}(T - t) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (7)$$

d. h. der Wert von W wird unabhängig vom Material und der Wanddicke; ein Fall, der u. a. eintritt bei der Transmission der Glasscheiben.

Zahlenbeispiele.

1. Fall. Ein Raum, dessen Mauern 0,5 m dick und 5 m hoch sind, wird durch einen Heizapparat + 15° C. warm erhalten. — Die Lufttemperatur im Freien beträgt + 2°, das Material der Wand ist Kalkstein: es soll die Wärmetransmission der Mauern pro Quadratmeter und Stunde gefunden werden.

Dieselbe drückt sich aus durch Formel (6):

$$W = \frac{\lambda . Q . (T - t)}{2\lambda + Qe}.$$

Im vorliegenden Falle ist $T = 15°$, $t = 2°$, $T - t = 13°$.

Die Wärmeleitungsfähigkeit des Kalksteines findet man nach Tabelle IX . . . . $\lambda = 1{,}70$.

Der Koeffizient der Leitung für 5 m hohe Flächen ist . . . . $K^1 = 2{,}05$.

Der Koeffizient der Strahlung (Tabelle IV) $K = 3{,}60$.

$Q = K + K^1 = 5{,}65$.

$e = 0{,}50$.

Hiernach ist

$$W = \frac{1{,}70 . 5{,}65 . 13}{2 . 1{,}70 + 5{,}65 . 0{,}5} = 20{,}05 \text{ Wärmeeinheiten.}$$

1) Schinz in seiner Wärmemeßkunst S. 214 bestimmt unter der Annahme, daß in vielen Fällen $\tau_1 = T$ sei, den Wert

$$W = \frac{Q . (T - t)}{1 + Q\frac{e}{\lambda}} = \frac{\lambda . Q (T - t)}{\lambda + Qe}.$$

Wenn dagegen das Material der Wand Backstein ist, dessen Wärmeleitungsfähigkeit $\lambda = 0{,}69$ oder rund $= 0{,}70$, so hat man unter denselben Bedingungen für eine 2 Stein starke Wand ($e = 0{,}52$):

$$W = \frac{0{,}7 . 5{,}65 . 13}{2 . 0{,}7 + 5{,}65 . 0{,}52} = 11{,}85 \text{ Wärmeeinheiten.}$$

Die Backsteine sind also ein geeigneteres Material zur Herstellung von Wohnräumen, als der Kalkstein.

Nasse Wände bedingen ebenfalls einen höheren Wärmeverlust, denn für eine vom Regen durchnäßte Mauer darf man nach Tabelle IV annehmen $K = 5{,}31$, während $K^1 = 2{,}05$ wie oben, $Q = 7{,}36$ und

$$W = \frac{0{,}7 . 7{,}36 . 13}{2 . 0{,}7 + 7{,}36 . 0{,}52} = 12{,}83 \text{ Wärmeeinheiten.}$$

Péclet hat die Transmissionsfähigkeit der Kalksteinmauern von 0,10 bis 1,00 m Stärke berechnet unter dem Gesichtspunkte, daß die Zimmertemperatur 15° beträgt und als Lufttemperatur + 6°, d. h. nahezu der Mittelwert der Lufttemperatur von Paris während der sieben Heizmonate zu Grunde liege. Da aber die Dimensionen 0,10 m, 0,20 m, 0,30 m, 0,40 m . . . unseren gebräuchlichen Mauerstärken nicht entsprechen, auch der Kalkstein in Deutschland nicht wie in Paris zu Frontmauern durchgängig zur Verwendung kommt, endlich die Maximaltemperatur des Winters nach anderen Gesichtspunkten zu bemessen ist, so können wir von diesen Werten der Péclet'schen Tabelle absehen.

Bei Anwendung der Formel (6) ist zu beachten, daß sie streng genommen nur anwendbar ist zur Berechnung der Transmission solcher Räume, bei denen nur eine Frontwand der äußeren Luft ausgesetzt ist, während die übrigen Wände an erwärmte Räume angrenzen, d. h. so angesehen werden können, als seien sie auf die Temperatur T des Raumes gebracht.

2. Fall. Sind alle Umschließungswände eines Raumes der äußeren Luft exponiert, wie bei Kirchen oder isolierten Pavillons, dann findet die Erwärmung der inneren Mauerflächen offenbar nur infolge der Luftbewegung, d. h. durch Leitung statt und die Bestrahlung der einen Wand durch die anderen fällt fort oder ist wenigstens ohne Einfluß, weil sämtliche Innenflächen sich auf gleicher Temperatur befinden müssen.

Unter Beibehaltung der früheren Annahmen wird dann der Wärmeverlust durch innere Leitungsfähigkeit des Materiales:

$$= \frac{\lambda}{e}(\tau_1 - \tau_2)$$

und derjenige durch Leitung der Innenluft an der inneren Wandfläche

$$= K^1 (T - \tau_1);$$

endlich derjenige durch Leitung und Strahlung an die äußere atmosphärische Luft

$$= (K + K^1) \cdot (\tau_2 - t) = Q \cdot (\tau_2 - t).$$

Für den Beharrungszustand sind diese Wärmemengen aber gleich, daher findet man durch Elimination von τ_1 und τ_2 die Gesamttransmission

$$W = \frac{K^1 \lambda Q (T - t)}{\lambda (Q + K^1) + Q e K^1} \quad . \quad . \quad . \quad (8)$$

Zahlenbeispiel. Wenden wir diese Formel zur Berechnung der Wärmetransmission eines 5 m hohen Raumes an, dessen Mauern wie vorher zwei Stein stark sind, während auch die Temperaturen der inneren und äußeren Luft dieselben bleiben wie in dem vorhergehenden Falle, so findet man — Backstein als Mauermaterial angenommen — die Transmission pro Quadratmeter und Stunde

$$W = \frac{2{,}05 \cdot 0{,}7 \cdot 5{,}65 \cdot 13}{0{,}7 (5{,}65 + 2{,}05) + 5{,}65 \cdot 0{,}52 \cdot 2{,}05} = 9{,}23 \text{ W.-E.}$$

Im ersten Falle fanden wir $W = 11{,}85$ Wärmeeinheiten; der Wert von W fällt also für freistehende Pavillons geringer aus, was daher rührt, daß die Temperatur der inneren Mauerflächen solcher Räume stets eine niedrigere ist als bei geschützter Lage zwischen bewohnten Räumen. Dieser Umstand tritt ganz besonders stark in Kirchen hervor, deren Wände aus einem gut leitenden Material hergestellt sind. Die an der inneren Wandfläche befindliche Luft ist dann bis auf eine gewisse Entfernung hin immer von geringerer Temperatur als die mittlere Temperatur des Lokales, folglich ist auch die Temperatur τ_1 der inneren Wandfläche niedriger als T.

Hätten die Mauern eine bedeutendere Höhe, etwa 20 m, so findet man aus Tabelle V für 20 m hohe Flächen $K^1 = 1{,}90$, also $Q = 3{,}60 + 1{,}90 = 5{,}50$. Die Werte $T - t$, λ, K und e bleiben unverändert und es ist

$$W = \frac{1{,}90 \cdot 0{,}7 \cdot 5{,}50 \cdot 13}{0{,}7 (5{,}50 + 1{,}90) + 5{,}50 \cdot 0{,}52 \cdot 1{,}90} = 8{,}96 \text{ W.-E.},$$

ein Resultat, welches nur geringe Abweichung zeigt, so daß die Höhe der Mauern nicht wesentlich deren Transmission beeinflußt.

3. Fall. Besteht die Wand aus zwei sich berührenden Schichten von ungleicher Leitungsfähigkeit λ und λ^1, deren Dicken durch e respektive e^1 bezeichnet seien, und ist ϑ die Temperatur ihrer Berührungsfläche, so hat man wiederum die Wärmeverluste infolge der Leitungsfähigkeit der Materialien beider Schichten:

$$W = \frac{\lambda}{e} (\tau_1 - \vartheta) \text{ und } = \frac{\lambda^1}{e^1} (\vartheta - \tau_2).$$

Der Wärmeverlust an der inneren und äußeren Fläche ist dagegen gegeben durch die Formeln:

$$W = K^1 (T - \tau_1) \text{ und } = Q (\tau_2 - t).$$

Diese vier Werte für W sind im Beharrungszustande gleichzusetzen, woraus folgt:

$$W = \frac{\lambda \cdot Q (T - t)}{Q + K^1 + K^1 Q \left(\frac{e}{\lambda} + \frac{e^1}{\lambda^1} \right)} \quad . \quad . \quad (9)$$

Mauern von Backstein, deren Außenseite mit Werkstücken beliebigen Materiales von der Dicke e^1 bekleidet ist, würden nach dieser Transmissionsformel zu berechnen sein, indem man für λ und λ^1 die entsprechenden Werte aus Tabelle IX substituiert und im übrigen wie oben verfährt.

Für eine größere Anzahl von Schichten verschiedenen Materiales erhält man den Wärmeverlust

$$W = \frac{\lambda \cdot Q (T - t)}{Q + K^1 + K^1 Q \left(\frac{e}{\lambda} + \frac{e'}{\lambda'} + \frac{e''}{\lambda''} + \ldots \right)} \quad (10)$$

4. Fall. Wenn endlich die Schichten gleichen oder verschiedenen Materiales durch Luftzwischenräume getrennt sind, dann wird die Quantität der transmittierten Wärme geringer als vorher ausfallen. Derartige Luftschichten nennt man „isolierende Luftschichten". Nimmt man an, daß die Intervalle breit genug sind, um eine Bewegung der Luft zuzulassen, so kann man, ohne sich von der Wahrheit allzuweit zu entfernen, annehmen, daß die, durch die gegenüberstehenden Seiten des Isolierraumes transmittierte Wärmemenge gleich ist

$$Q (x - x^1),$$

wobei unter x und x^1 die Temperaturen dieser Innenseiten des Luftraumes verstanden werden. Wenn dagegen statt des Hohlraumes eine Materie von der Leitungsfähigkeit λ und Dicke e angeordnet wäre, so ist der Wärmeverlust repräsentiert durch

$$\frac{\lambda}{e} (x - x^1).$$

Man erhält also den Wert von W, indem man in den allgemeinen Formeln den Wert $\frac{e}{\lambda}$ ersetzt durch $\frac{1}{Q}$ und findet dann:

$$W = \frac{Q (T - t)}{2 + Q \left(\frac{e}{\lambda} + \frac{1}{Q} + \frac{e'}{\lambda'} \right)};$$

$$W = \frac{Q (T - t)}{2 + Q \left(\frac{e}{\lambda} + \frac{1}{Q} + \frac{e'}{\lambda'} + \frac{1}{Q} + \frac{e''}{\lambda''} \right)} \quad . \quad (10a)$$

§ 16.

Transmission der Wärme durch Gläser.

Unsere Fensterglasscheiben sind ein besonderer Fall von den vorstehend abgehandelten Arten der Transmission, sie bilden dünne Wände von geringerer Leitungsfähigkeit als das Metall.

1. Fall. Sind die Gläser in einer Frontwand plaziert und ist nur diese Fensterwand der atmosphärischen Luft ausgesetzt, während die übrigen Wandflächen die Temperatur des Raumes zeigen, so werden die Glasscheiben sich von der inneren Seite durch Strahlung der erwärmten Wandflächen und durch Kontakt mit der warmen Luft des Raumes erhitzen und von der äußeren Seite durch analoge Ursachen abkühlen.

Da die Quantität der transmittierten Wärme in diesem Falle unabhängig von der Dicke ist, wie in Gleichung (7) gezeigt wurde, so erhält man unter Beibehaltung der früheren Werte

$$W = (T - x) \,.\, Q \text{ und } W = (x - t) \,.\, Q,$$

woraus die Temperatur der Scheiben folgt:

$$x = \frac{T + t}{2} \text{ und } W = (T - t) \,.\, \frac{Q}{2} \quad . \quad . \quad (11)$$

Der Ausdruck $\frac{Q}{2}$ heißt der Transmissions-Koeffizient der Glasscheiben.

Setzt man $T - t = 1$, so giebt der Koeffizient $\frac{Q}{2}$ die Anzahl Wärmeeinheiten an, welche im Beharrungszustande stündlich durch das Quadratmeter Glasfläche hindurchgehen, wenn die Temperaturdifferenz der berührenden Luftschichten 1° C. beträgt.

Um den Transmissions-Koeffizienten der Glasscheiben zu bestimmen, suche man den Wert von $K + K^1$ aus den Tabellen IV und Va. Aus ersterer findet man das Strahlungsvermögen des Glases $K = 2{,}91$. — Der Wert K^1 dagegen wechselt mit der Höhe der Gläser, wie nachstehende Ergänzung zu Tabelle V ergiebt.[1])

Tabelle X.

Höhe der Glasfläche	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m
Werte von K^1	2,40	2,21	2,13	2,08	2,05
Werte von $\frac{K + K^1}{2}$	2,65	2,56	2,52	2,496	2,479

Für Höhen, welche zwischen den Tabellenwerten liegen, bestimme man K^1 nach Formel d Tabelle V:

$$K^1 = 1{,}764 + \frac{0{,}636}{\sqrt{h}}.$$

2. Fall. Wir betrachten einen geschlossenen, ganz aus Glas konstruierten Pavillon, der durch heiße Luft erwärmt wird und sehen ab von der etwa eintretenden Erwärmung durch die Sonne. Die Glasflächen sind alsdann nur durch den Kontakt des innerhalb aufsteigenden Luftstromes erwärmt, denn die gegenseitige Strahlung wird effektlos sein, weil alle Oberflächen gleiche Temperaturen haben. Nach dem Vorhergehenden hat man also:

$$W = (T - x)\, K^1 \text{ und } W = (x - t) \,.\, (K + K^1)$$

und im Beharrungszustande

$$W = \frac{Q\, K^1}{Q + K^1}\, (T - t) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (12)$$

Für freistehende Glashäuser findet man aus Tabelle XI, und zwar für Höhen von 1 bis 5 m, die pro Quadratmeter und Stunde transmittierte Wärmemenge, wenn die Temperaturdifferenz $T - t = 1°$ C. beträgt.

Tabelle XI (nach Péclet).

Höhe der Glasfläche	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m
Werte des Transmissions-Koeffizienten	1,65	1,54	1,49	1,47	1,45
Differenz	—	0,11	0,05	0,02	0,02

Die Werte der Tabelle XI sind kleiner als diejenigen in Tabelle X, weil die freien Glasflächen eines Glashauses eine niedrigere Temperatur haben, als die Fenster eines geschlossenen Wohnzimmers.

3. Fall. Parallele Glasflächen. Sind in einer Frontwand Doppelfenster vorhanden mit Zwischenräumen von solcher Größe, daß die Luft sich dazwischen bewegen kann, so erhält man — da beide Flächen eines jeden Glases nahezu gleiche Temperatur haben werden — den Wert von W, indem man in der allgemeinen Formel (10a) die Wanddicken e, e′, e″ gleich Null setzt. Man findet nun für Doppelfenster den Wert der Transmission:

$$W = \frac{Q}{2 + 1} \cdot (T - t) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (13)$$

und für dreifache Fenster

$$W = \frac{Q}{2 + 2} \cdot (T - t),$$

während für einfache Fenster ist

$$W = \frac{Q}{2} \cdot (T - t),$$

d. h. die Koeffizienten verhalten sich für einfache, doppelte und dreifache Fenster wie:

$$\frac{1}{2} : \frac{1}{3} : \frac{1}{4} = 1 : \frac{2}{3} : \frac{1}{2}.$$

1) In der Praxis fand Péclet bei direkten Versuchen die Werte von W noch geringer als in der Tabelle, weil er mit Scheiben von geringer Dimension experimentieren mußte.

§ 17.

Die Herleitung der Wärmedurchgangs-Koeffizienten zur Bestimmung der Wärmeverluste von Mauern verschiedener Konstruktion und Stärke ist hier in elementarer Weise erfolgt, um der Tendenz dieses Werkes gemäß die Anwendung auch weiteren Kreisen zugänglich zu machen. — Für Leser, denen die Anwendung des höheren Kalküls geläufig ist, geben wir noch nachstehende Methode der Entwickelung, und zwar ebenfalls unter der Annahme, daß im Prozesse der Wärmeüberführung durch eine ebene Wand von gleicher Dicke der Beharrungszustand eingetreten sei, daß also in der Zeiteinheit die gleiche Wärmemenge W aufgenommen, geleitet und abgegeben werde. Setzen wir nun die Temperatur der die Wand im Inneren begrenzenden unendlich dünnen Fläche $= \tau_1$ und diejenige an der äußeren Begrenzung $= \tau_2$, so ist an der inneren Wandfläche F_1 die aufgenommene Wärmemenge W offenbar proportional der bezüglichen Temperaturdifferenz und der Oberfläche, also

$$W = \lambda_1 F_1 (T - \tau_1) \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (I)$$

und an der äußeren Oberfläche der Wand ebenso

$$W = \lambda_2 F_2 (\tau_2 - t) \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (II)$$

Man nennt den Ausdruck:

λ_1 den Wärmeaufnahme-Koeffizienten,
λ_2 den Wärmeabgabe-Koeffizienten.

Bezeichnet endlich:

F_x die Oberfläche der im konstanten Abstande x von F gelegenen Elementarplatte,
τ_x und
$\tau_x \pm d\tau_x$ die Temperaturen zu beiden Seiten dieser Platte,
e die Dicke der Wand und
λ den Leitungs-Koeffizienten (vergl. Tabelle IX),

so hat man

$$W = \frac{\lambda F_x [\tau_x - (\tau_x + d\tau_x)]}{dx}$$

und hieraus

$$-d\tau_x = \frac{W dx}{\lambda F_x}.$$

Nach Integration zwischen den Grenzen x = o und x = e erhält man

$$\tau_1 - \tau_2 = \frac{W}{\lambda} \int_o^e \frac{dx}{F_x} \quad . \; . \; . \; . \quad (III)$$

Werden nunmehr die aus den Gleichungen (I) und (II) sich ergebenden Werte:

$$\tau_1 = T + \frac{W}{\lambda_1 F_1}$$

$$\tau_2 = t + \frac{W}{\lambda_2 F_2}$$

in Gleichung (III) eingesetzt, so ergiebt sich

$$T - t - \left[\frac{W}{\lambda_1 F_1} + \frac{W}{\lambda_2 F_2}\right] = \frac{W}{\lambda} \int_o^e \frac{dx}{F_x}$$

und hieraus die in der Zeiteinheit durch die Wand transmittierte Wärme

$$W = \frac{T - t}{\frac{1}{\lambda_1 F_1} + \frac{1}{\lambda_2 F_2} + \frac{1}{\lambda} \int_o^e \frac{dx}{F_x}} \quad . \; . \quad (4)$$

Ist $F_1 = F_2 = F_x = \text{Const.} = F$, so wird

$$W = k (T - t) F \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (5)$$

worin

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} + \frac{e}{\lambda}} \quad . \; . \; . \; . \quad (6)$$

der sogenannte Transmissions-Koeffizient ist.

Setzt man aber die Flächeneinheit F = 1 und T — t = 1, so erkennt man leicht, daß k die Anzahl Wärmeeinheiten angiebt, welche stündlich durch das Quadratmeter der inneren Begrenzungsfläche der Wand hindurchgehen, wenn die Temperaturdifferenz der berührenden Luftschichten 1° C. beträgt. Der Wert von W wird groß, wenn λ_1, λ_2 und λ große Werte haben, d. h. wenn die Wärmeaufnahme und -Abgabe und die Wärmedurchleitung leicht von statten gehen.

a) Um den Transmissions-Koeffizienten für Mauerwerk zu bestimmen, beachte man, daß

λ der Wert des Wärmeleitungs-Koeffizienten für gebrannte Steine = 0,7 aus Tabelle IX zu entnehmen ist;
λ_1 und λ_2 stellen jeder die Summe $K + K_1$ (Gleichung (I) § 13) dar.

In der Regel ist nun für die innere Begrenzungsfläche die Wärmeaufnahme λ gleich dem Wärmeverlust an der Außenfläche λ_1. Denn aus Tabelle IV findet man für eine mit Tapete bespannte Wand

$$K = 3{,}77,$$

während der Strahlungs-Koeffizient für Ölfarbenanstrich der Außenfront

$$K = 3{,}71.$$

Der Wärmeverlust durch Leitung beträgt (nach Tabelle Va) im Mittel für beide gegenüberstehende Wandflächen 2,0, weil die Höhe der Etagen in der Regel zwischen 4 und 6 m schwankt. Es darf also für gewöhnliche Verhältnisse gesetzt werden:

$$Q = K + K_1 = \lambda_1 = \lambda_2,$$

und dadurch findet man den Wert des Transmissions-Koeffizienten

$$k = \frac{1}{\frac{2}{Q} + \frac{e}{\lambda}} = \frac{1}{\frac{2\lambda + Qe}{Q\lambda}} = \frac{\lambda Q}{2\lambda + Qe}$$

und

$$W = \frac{\lambda \,.\, Q}{2\lambda + Qe} \cdot (T - t)$$

übereinstimmend mit Gleichung (6).

a) Der Wärmeverlust einer Backsteinmauer ist nun nicht allein von ihrer Dicke, sondern auch von ihrer Trockenheit oder Feuchtigkeit, ihrer Lage gegen herrschende Winde, sowie davon abhängig, ob die Wand frei steht oder geschützt ist, wie im Inneren der Straßen. Da diese Faktoren schwer in Rechnung zu ziehen sind, nimmt Ferrini[1]) die Mauer äußerlich als durchnäßt an, innerlich als mit Tapeten bespannt. Nun findet man

1) für die innere Begrenzungsfläche den Strahlungs-Koeffizienten des Papieres (Tabelle IV)

$$K = 3{,}77.$$

Den Wert der Wärmeabgabe durch Kontakt darf man annehmen für mittlere Etagenhöhen annähernd:

$$K^1 = 2{,}23;$$

hiernach ist $K + K^1 = \lambda_1 = 6$.

2) Wenn die Außenfläche durchnäßt ist, findet man

$$K = 5{,}3$$

und wegen fortwährender Erneuerung der Luft durch Wind wird im Freien die Wärmeabgabe meist eine lebhaftere sein, so daß annähernd $K^1 = 2{,}7$, also

$$\lambda_2 = 8;$$

endlich finden wir nach Tabelle IX für Backsteine

$$\lambda = 0{,}7$$

und durch Einführung der gefundenen Werte

$$k = \frac{1}{\frac{1}{6} + \frac{1}{8} + \frac{e}{0{,}7}} = \frac{7}{24} + \frac{e}{0{,}7},$$

d. h. der Transmissions-Koeffizient für Backsteinmauern ist:

$$k = \frac{16{,}8}{4{,}9 + 24e}.$$

Die folgende Tabelle giebt für fortschreitende Werte von e die Transmissions-Koeffizienten gewöhnlicher Mauern.

Tabelle XII (nach Ferrini).[2])

Mauerdicke in Metern	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Transmissions-Koeffizient	2,30	1,73	1,39	1,16	0,99	0,87	0,77	0,70	0,63	0,58
Differenzen	—	0,57	0,34	0,23	0,17	0,12	0,10	0,07	0,07	0,05

b) Fenstertransmission. Hierbei nehmen wir den ungünstigen Fall an, nämlich die Außenfläche als „von Regen benetzt“. Wegen der geringen Dicke e der Glasscheiben kann man in der allgemeinen Formel des § 6

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} + \frac{e}{\lambda}}$$

das Glied $\frac{e}{\lambda}$ vernachlässigen, so daß nur

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2}}.$$

Für die Innenseite ist nun $K = 2{,}91$ und $K^1 = 2{,}09$,

$$\lambda_1 = 2{,}91 + 2{,}09 = 5.$$

Für die Außenseite ist wegen der Wasserschicht $K = 5{,}3$ und wegen fortwährender Erneuerung der Luft durch Wind $K^1 = 2{,}7$, also annähernd

$$\lambda_2 = 5{,}3 + 2{,}7 = 8,$$

$$\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} = \frac{1}{5} + \frac{1}{8} = \frac{13}{40}$$

und der Transmissions-Koeffizient der Fenster

$$k = \frac{40}{13}, \text{ d. h. sehr nahe } = 3.$$

Doppelfenster. Bezeichnet n die Anzahl der parallelen Gläser, so ist nach der Entwickelung von Ferrini der Transmissions-Koeffizient mehrfacher Glasscheiben:

$$k = \frac{1}{n\left(\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2}\right) + \frac{e}{\lambda}}$$

Das Glied $\frac{e}{\lambda}$ kann wiederum vernachlässigt werden und man findet nach dem Vorstehenden

$$k = \frac{1}{\frac{n \,.\, 13}{40}} = \frac{40}{13 \,.\, n}.$$

Daher der Transmissions-Koeffizient für Doppelfenster

$$K = \frac{40}{26} = 1{,}54.$$

Herrmann Fischer[1]) in seiner Abhandlung über „Heizung und Lüftung der Räume“ berücksichtigt bei Bestimmung der Transmission einfacher Fenster auch das

1) Rinaldo Ferrini, Technologie der Wärme, deutsch von Schröter. Jena 1878.

2) Rinaldo Ferrini (S. 62), Nr. 41.

1) Handbuch der Architektur, III. Teil, 4. Bd., S. 100.

Auftreten von Fensterschweiß an der Innenseite der Glasscheiben. Man darf dann, wegen einer Wasserschicht an der inneren Begrenzungsfläche, auch setzen:

$$K = 5{,}3 \text{ und } K^1 = 2{,}21 \text{ (Tabelle Va),}$$

also

$$\lambda_1 = 7{,}5, \text{ während wie oben } \lambda_2 = 8,$$

$$\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} = \frac{2}{15} + \frac{1}{8} = \frac{31}{120}$$

und der Transmissions-Koeffizient einfacher Fenster

$$K = 3{,}87.$$

Bei Doppelfenstern ist dagegen (wegen der ruhenden Luftschicht) Schweiß an der Innenseite nicht vorhanden, gleichwohl dürfte mit Rücksicht auf mangelhaftes Dichthalten zu setzen sein:

$$K = \frac{120}{2 \,.\, 31}, \text{ d. h. nahezu } = 2.$$

Diese Werte stimmen ziemlich gut überein mit den von Redtenbacher[1]) aufgestellten Erfahrungswerten.

c) Wagerechte Fenster (Oberlichter) werden von unten durch stets sich erneuernde wärmere Luftschichten, von oben durch kältere Schichten berührt. Schweißbildung tritt gar nicht oder selten ein. Nach Fischer ist zu setzen

$$K = 5{,}4.$$

d) Für äußere Thüren ist (bei einer durchschnittlichen Dicke von 4 cm) die Wärmeabgabe pro Stunde und Quadratmeter und 1° Temperaturdifferenz

für Eichenholz	für Tannenholz
$K = 2{,}2$	$K = 1{,}5$.

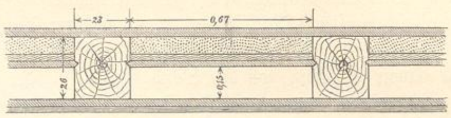
e) Es bleiben endlich noch die Werte von K für wagerechte, hohle Deckenkonstruktionen von Holz (gestakte Decken oder halbe Windelböden) zu bestimmen. Diese Verhältnisse hat H. Fischer sehr eingehend behandelt und rechnerisch entwickelt auf S. 54 des unten genannten Werkes. Hierbei wird zu unterscheiden sein:

a) Der Fall, wenn die betreffende Balkenlage oberhalb von kälterer, unterhalb von wärmerer Luft berührt wird, wie dies gewöhnlich bei den Deckenkonstruktionen des obersten Wohngeschosses, über welchem der Dachraum liegt, vorkommt, und

b) der Fall, wo das Umgekehrte stattfindet, d. h. bei Decken über Durchfahrten und solchen Decken, die zum Abschluß des Kellers gegen das beheizte Erdgeschoß dienen.

1. Fall. Gehört die Deckenkonstruktion (Fig. 30) der ersteren Art an, so wird der Wärmeübergang in den Balkenfeldern durch den Gipsputz auf Schalung wenig gehindert und die Leitung derjenigen Luftschicht, welche zwischen Schalung und Stakung eingeschlossen ist, fällt wegen deren Strömung sehr groß aus. — Der Wärmeübergang von den Stakhölzern in die darüber befindliche, 8 bis 10 cm hohe Sand- oder Coaksaschenschicht kann nur durch Leitung stattfinden, wird aber wegen der innigen Berührung sehr entschieden wirken. Dasselbe findet da statt,

Fig. 30.



wo die 3,5 cm starken Dielbretter auf dem Füllmaterial lagern. Wenn geringe Spielräume vorhanden sind, so wird hier Leitung und Strahlung gemeinschaftlich auftreten.

In Rücksicht hierauf fand Fischer den Transmissions-Koeffizienten der Abschlußdecke im Balkenfelde

$$K = 0{,}58.$$

Da, wo die 23 cm breiten Balken sich befinden, ist dagegen nur

$$K = 0{,}32;$$

folglich ist die durchschnittliche Zahl von Wärmeeinheiten, welche durch eine derartige Decke bei 1° Temperaturdifferenz pro Quadratmeter und Stunde übergeführt werden:

$$K = 0{,}5.$$

2. Fall. Befindet sich unter der vorbeschriebenen Decke die kältere, über derselben die wärmere Luft wie bei Kellerbalkenlagen über denen das beheizte Erdgeschoß, so fällt, wegen der nach unten liegenden Luftschicht, K etwa nur halb so groß aus als im ersten Falle, nämlich:

$$K = 0{,}3.$$

Da, wo Balken sich befinden, ist

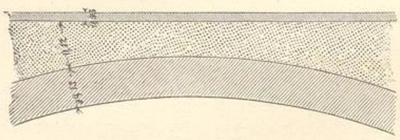
$$K = 0{,}35.$$

Die Durchschnittszahl für den Wärmeübergang ist

$$K = 0{,}31 \text{ Wärmeeinheiten.}$$

3. Fall. Wird die Kellerdecke (Fig. 31) durch ein inkl. Putz 13 cm starkes Backsteingewölbe gebildet, über dem

Fig. 31.



sich eine, im Mittel 12 cm hohe Sandschüttung befindet, in welche die Lagerhölzer eingebettet sind, die den kienenen Fußboden tragen, so überführt jeder Quadratmeter der Decke für 1 Grad Temperaturdifferenz:

$$K = 0{,}71 \text{ Wärmeeinheiten.}$$

Einschließungs-Konstruktionen anderer Art werden nach den vorhergehenden Beispielen zu berechnen resp. zu schätzen sein, so lange dieselben zu beiden Seiten von Luft berührt werden.

1) Der Maschinenbau, II. Bd., S. 394.

Für gewöhnliche Fälle dürften die angegebenen, resp. die in Tabelle XIII und XIIIa zusammengestellten Zahlenwerte, die wir der Abhandlung von H. Fischer[1]) entlehnen, zur Berechnung des Wärmeaustausches freistehender lotrechter Wände genügen. Hierbei sind die üblichen Mauerstärken von Backsteinwänden, unter Hinzurechnung des Putzes auf beiden Seiten, zu Grunde gelegt.

Tabelle XIII. Werte der Transmissions-Koeffizienten von Backsteinmauern.

Wandstärke in Metern	0,14	0,27	0,40	0,53	0,66	0,79	0,92	1,05
Werte von K	2,31	1,66	,27	1,03	0,86	0,74	0,66	0,59

Tabelle XIIIa. Transmissions-Koeffizienten von Bruchsteinmauern.

Wandstärke in Metern	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
Werte von K	1,80	1,37	1,17	1,00	0,87	0,77	0,70	0,63

Fenster in den Frontwänden (vergl. S. 39).

Für einfache Fenster ist $K = 3{,}87$
„ Doppelfenster . . $K = 2{,}0$.

Transmissions-Koeffizienten von Deckenkonstruktionen.

Decken nach Art der Fig. 39, 1. Fall $K = 0{,}5$
Decken nach Art der Fig. 39, 2. Fall $K = 0{,}31$
Decken nach Art der Fig. 40 . . . $K = 0{,}71$
Wagerechte Glasdecken (Oberlichte) . $K = 5{,}4$
Doppelte Oberlichte . . . . . . $K = 2{,}6$.

§ 18.

Wärmeverlust bewohnter Räume.

Bevor die Transmission durch Wände, Fenster, Fußboden und Decke bei ununterbrochener Heizung und im Beharrungszustande der Erwärmung bestimmt wird, haben wir noch zu untersuchen, welche von den umschließenden Flächen Wärmeverluste bedingen und wie hoch die Temperaturdifferenz $T - t$ für verschiedene Gebäudegattungen in Rechnung zu stellen ist.

Als Transmissionsflächen sind folgende anzusehen:

1) alle Umschließungswände des Gebäudes, welche mit der atmosphärischen Luft einerseits und mit der Luft der zu heizenden Räume andererseits in Berührung stehen, also Frontwände, Giebel und die Wände und Decken offener Durchfahrten;
2) die Scheidewände und Decken zwischen Räumen, von denen der eine geheizt wird, der andere nicht;
3) die Fußböden des untersten Geschosses;
4) die Decken des letzten Geschosses, soweit dasselbe geheizt wird.

Scheidewände und Zwischendecken, welche Räume trennen, die beide gleich stark oder beide nicht geheizt werden sollen, bleiben bei der Rechnung außer Betracht.

Als Temperatur der äußeren Luft an kalten Wintertagen wird das Minimum des kältesten Monats in Rechnung zu stellen sein, denn gute Heizapparate müssen im allgemeinen ihren Zweck noch für die niedrigste Außentemperatur erfüllen; für höhere Temperaturen hat man nur die Thätigkeit des Apparates zu mäßigen.

Die mittlere Monatstemperatur des Januar, welche für diesen Zweck nicht maßgebend ist, beträgt

für Berlin $-1{,}90^{\circ}$ R., für Karlsruhe $-0{,}14^{\circ}$ R.

Dagegen betrug die größte Abweichung von der Mitteltemperatur des Januar:

für Berlin $-14{,}28^{\circ}$ R., für Karlsruhe $-9{,}68^{\circ}$ R.

Hieraus folgt als Minimum des kältesten Monats:

Berlin $-16{,}18^{\circ}$ R. $= -20{,}1^{\circ}$ C.
Karlsruhe $-9{,}82^{\circ}$ R. $= -12{,}2^{\circ}$ C.

Sieht man von außergewöhnlichen Schwankungen ab, so dürfte für den Norden Deutschlands $t = -15^{\circ}$ und für Süddeutschland $t = -10^{\circ}$ als angemessen in Rechnung zu stellen sein.

Die Temperatur der zu erwärmenden Räume beträgt:

für Wohnungen . . . . . $T = 15$—18° C.
„ Hörsäle, Versammlungssäle $T = 15^{\circ}$,
„ Kirchen . . . . $T = 10$—15°,
„ Schulen . . . . . . $T = 16$—18°,
„ Strafanstalten . . . . $T = 12^{\circ}$,
„ Krankenhäuser . . . . $T = 15$—20°,
„ Treibhäuser . . . . . $T = 20$—25°.

Nach diesen Angaben wird die Temperaturdifferenz $T - t$ auf 30—35° C., seltener nur $= 40^{\circ}$ anzunehmen sein.

Zahlenbeispiel. Es soll der Wärmeverlust eines Krankenzimmers berechnet werden, wenn bei kontinuierlicher Heizung eine Erwärmung auf 20° C. verlangt und die Temperatur der Luft an kalten Wintertagen zu 10° angenommen wird. Die Lage des Zimmers ist der Art, daß drei Seiten Transmissionsflächen bilden und die vierte an ein geheiztes Zimmer stößt; die 51 cm starken Mauern bestehen aus Backstein.

1) Handbuch der Architektur, 2. Aufl., III. Teil, 4. Bd., S. 123.

Tiefe des Zimmers . . . . 5 m
Breite desselben . . . . 6 „
Höhe desselben . . . . 4 „
Fensterfläche . . . . 4 qm
Die transmittierenden Umfassungswände, exkl. Fenster, betragen [2 × 5 + 6] 4—4 . . . 60 „
Die Fläche des Fußbodens und der Decke je . 60 „

1) Der Wärmeverlust durch die Decke bei T—t $= 25^{0}$ ist für K = 0,5 = 25 . 60 . 0,5 750 W.-E.
2) Durch den Fußboden 15° . 60 . 0,31 . . 279 „
3) Durch Umfassungswände für K = 1,03 30° . 60 . 1,03 . . . . 1854 „
4) Durch 4 qm einfache Fenster 30 . 4 . 3,87 . 464 „

Summa des stündl. Wärmeverlustes rot. = 3347 W.-E.

§ 19.

Einfluß äußerer Temperaturveränderungen auf die Transmission der Mauern.

Bisher wurde die innere und äußere Temperatur bei kontinuierlicher Heizung als konstant angenommen. — Während nun bei der Heizung die innere Temperatur in der Regel nicht wechselt, unterliegt doch die Transmission immer dem Einfluß des Temperaturwechsels. Dieser Wechsel wird hervorgerufen:

1) durch die **allgemeine** Abnahme der mittleren Monatstemperaturen im ersten Teil und die Zunahme derselben in der zweiten Hälfte des Winters und
2) durch die **zufälligen** Veränderungen, d. h. die **Abweichungen** von der mittleren Monatstemperatur.

In unserem Klima findet die Heizung in der Regel vom Oktober bis Ende April statt. Die **mittlere** äußere Monatstemperatur während dieser sieben Monate ist für einige Hauptstädte in Réaumur'schen Graden hier zusammengestellt.[1])

ad 1) Die mittlere Temperatur der sieben Heizmonate beträgt für Berlin beinahe 3° und die mittlere Temperaturdifferenz T — t = 13° (wenn bei kontinuierlicher Heizung T = 16° angenommen wird). — Sind dann **alle** Mauern des zu heizenden Raumes der Luft ausgesetzt, so wird der Einfluß der Temperaturabweichungen sich am stärksten fühlbar machen. Die pro Quadratmeter und Stunde transmittierte Wärmemenge beträgt für 0,52 m starke Umfassungen nach Tabelle XI

1,03 . 13 = 13,39 Wärmeeinheiten

und die totale, während der Dauer von 200 Heiztagen bei kontinuierlicher Feuerung transmittierte Wärme pro Quadratmeter:

13,39 × 200 × 24 = 64272 Wärmeeinheiten.

In dem Mauerwerk der 0,52 m starken Umfassungswand sind bei 16° Innentemperatur eingeschlossen **pro Quadratmeter:**[2])

1000 × 0,52 × 1,98 × 0,21 × 16° = 3459 W.-Einh.

oder 5,4 Proz. der während der ganzen Heizperiode transmittierten Wärme. Wir können daraus folgern:

daß die Wärmemengen, welche bei der allgemeinen Temperaturabnahme vom Mauerwerk ausgestrahlt und bei Zunahme derselben absorbiert werden, nur einen schwachen Einfluß auf die Transmission haben können, wenn die Heizung sonst nicht unterbrochen wird, daß dagegen in höherem Grade die Variationen des Thermometers durch die Glasscheiben auf die geheizte Piece einwirken, weil die Scheiben beinahe augenblicklich eine Mitteltemperatur annehmen, welche zwischen den Temperaturen T und t liegt (§ 15).

Sonach steuern die Mauern eine gewisse Quantität Wärme bei, wenn die äußere Temperatur sinkt und — sobald sie sich zum ursprünglichen Standpunkt erhebt — absorbieren sie dieselbe Menge Wärme, und zwar derart, daß das zur Hervorbringung einer konstanten inneren Temperatur nötige Wärmequantum weniger schnell variiert, als der Gang des Thermometers im Freien, denn Gewinn und Verlust gleichen sich **allmählich** aus.

ad 2) Bei **schroffen Schwankungen der Temperatur** sind die Phänomene, welche sich innerhalb der Umfassungswände vollziehen, noch komplizierter, aber unter der Voraussetzung, daß die Temperatur der Mauern auch jetzt gleichmäßig von außen nach innen zunimmt, lassen sie sich verfolgen und beurteilen.

Betrachten wir z. B. die Mauern eines Raumes mit nur einer der Luft ausgesetzten Wand. Wenn T = 15°,

1) **Mittlere Monatstemperatur in Réaumur'schen Graden.**

	Oktober	November	Dezember	Januar	Februar	März	April
Berlin	7,97	3,25	1,32	— 1,90	— 0,15	2,74	6,88
Karlsruhe	8,33	4,24	1,58	— 0,14	+ 1,97	4,57	8,36
Wien	8,54	3,71	0,46	— 1,21	+ 2,68	3,91	8,82

2) Um die Anzahl der in einem Körper bei t^{0} eingeschlossenen Wärmeeinheiten zu finden, ist dessen absolutes Gewicht mit seiner spezifischen Wärme zu multiplizieren. Die spezifische Wärme der Bausteine ist = 0,21; ihr spezifisches Gewicht = 1,98 (Tabelle IX).

$t = 6^0$, $\lambda = 1{,}70$ und $e = 0{,}50$ ist, dann findet man (nach Péclets Formel 6) $\tau_1 = 12{,}56^0$, $\tau_2 = 8{,}99^0$ und $W = 16{,}23$ Wärmeeinheiten. Sinkt die Temperatur der äußeren Luft nun von 6^0 auf 0^0, so geben die Formeln andererseits:

$\tau_1 = 10{,}87^0$; $\tau_2 = 4{,}12^0$ und $W = 22{,}93$ Wärmeeinheiten.

Während des Überganges der Mauern aus einem Zustande zum anderen sinkt deren mittlere Temperatur von $\frac{12{,}56^0 + 8{,}99^0}{2}$ auf $\frac{10{,}87^0 + 4{,}12^0}{2}$ oder von $10{,}77^0$ auf $7{,}49^0$ und die Quantität der durch das abgekühlte Kalksteinmauerwerk pro Quadratmeter verlorenen Wärme beträgt:

$$1000 \,.\, 0{,}5 \times 2{,}22 \times 0{,}21\,[10{,}77 - 7{,}49] = 382 \text{ W.-Einh.}$$

Diese Abkühlung wird so viel Zeit erfordern, als wenn die Temperatur der äußeren Fläche bei gleichmäßiger Abnahme

$$\frac{8{,}99^0 + 4{,}12}{2} = 6{,}55^0$$

wäre. Im letzteren Falle beträgt aber die stündliche Transmission nur

$$W = 11{,}8 \text{ W.-Einheiten pro Quadratmeter;}$$

die Abkühlung der in Frage stehenden Wand vollzieht sich demnach erst in einer Zeit von

$$\frac{382}{11{,}8} = 32 \text{ Stunden.}$$

Man ersieht hieraus, daß die äußeren Temperaturschwankungen in einem nur von Mauern umschlossenen Raume sich sehr langsam und sehr abgeschwächt auf das Innere übertragen. Aber da die Räume doch auch Fenster haben und das Glas fast augenblicklich die Mitteltemperatur zwischen innen und außen annimmt, so bedarf es zur Erhaltung einer konstanten Temperatur im Inneren einer vermehrten Wärmeproduktion, welche mit der äußeren Temperaturabnahme Schritt hält, und um so mehr, je größer die Fensterflächen im Verhältnis zur festen Frontwand sind.

Hat z. B. der vorgenannte Raum eine transmittierende Umfassungswand mit 4 qm Fensterfläche und 8 qm Mauerfläche von 0,5 m Dicke, beträgt $T = 15^0$ und $t = 6^0$, dann ist die totale Transmission der Fenster von 2 m Höhe nach Tabelle X und Formel (11) § 16

$$2{,}56 \times 9^0 \times 4 = 92{,}16 \text{ W.-Einheiten}$$

und diejenige der Mauern:

$$16{,}23 \times 8 = 129{,}8 \text{ W.-Einheiten.}$$

Sobald aber die Temperatur der Luft von 6^0 auf 0^0 sinkt, dann steigt die Transmission durch die Fenster sofort auf

$$2{,}56 \times 15 \times 4 = 153{,}6 \text{ W.-Einheiten}$$

und übertrifft diejenige der Mauern, bei denen der Wärmeverlust nur langsam steigt, nämlich in 32 Stunden auf:

$$22{,}93 \times 8 = 183{,}4 \text{ W.-Einheiten.}$$

Also die Gläser üben bei Schwankungen der äußeren Temperatur einen stärkeren Einfluß auf die zur Erhaltung einer konstanten Temperatur von 15^0 erforderlichen Wärmemengen aus als die Mauerflächen, wenigstens da, wo die Mauern nicht unter $1^1/_2$—2 Stein stark und die Fenster nicht zu klein angelegt sind.

§ 20.

Intermittierende Heizung.

Ununterbrochene Heizung, wie sie in den vorstehenden Paragraphen vorausgesetzt wurde, kommt nur in wenigen Fällen vor (in Krankenhäusern, Pflanzenhäusern, Fabriken mit ununterbrochenem Betriebe). In Wohnräumen wird die Heizung gewöhnlich bei Nacht unterbrochen und in Hörsälen, Versammlungssälen, Theatern findet sie nur während einer begrenzten Zeit statt. Bei derartiger Heizung mit Unterbrechung treten Beharrungszustände nicht ein, sondern die Temperatur der Mauern und die Temperatur des Raumes werden mit der Zeit variabel. Während der Heizung wächst die Temperatur im Raume und dadurch werden die Wände erwärmt; wenn nicht geheizt wird, erkalten die Mauern und die Temperatur des Raumes nimmt nach einem bestimmten Gesetz ab.

Ferrini[1]) hat diese thermischen Zustände analytisch untersucht, um Regeln aufzustellen, durch welche die von einem Heizapparat zu liefernde Wärmemenge für alle Fälle berechnet werden könne. Solche, zum Teil verwickelte analytische Rechnungen liegen der Tendenz dieses Werkes fern und begnügen wir uns daher für praktische Zwecke mit der Registrierung einiger allgemeinen Resultate.

I. Wenn ein Raum am Ende einer Heizperiode keine Wärme mehr empfängt, so kühlt er sich binnen kurzer Zeit auf die Temperatur der inneren Mauerflächen ab und von nun an müssen die Mauern die Wärme liefern, welche im weiteren Verlauf durch die Transmission der Fenster verloren geht. Die in den Mauern enthaltene Wärmemenge wird dann durch beide Seiten derselben ausgestrahlt. In der That zeigt die Rechnung, daß in der Stillstandsperiode des Heizapparates für $T = 15^0$ und $t = 0^0$, $\tau_1 = 12{,}8^0$ ist und daß die innerhalb 24 Stunden verlorene Wärmemenge gleich ist dem Verlust durch die Fensterscheiben, vorausgesetzt, daß die innere Lufttemperatur T_0 während der Abkühlungsperiode gleich der Anfangstemperatur τ_1 der Innenseite des Mauerwerkes gewesen sei.

II. Räume, welche mit Kachelöfen geheizt werden, erhalten — trotz des Erlöschens des Feuers — doch noch für eine längere Dauer die Wärme dadurch, daß die erhitzte Thonmasse, die aus den Brennstoffen einen großen Teil

1) Rinaldo Ferrini, Technologie der Wärme, Nr. 187—190.

Wärme aufgenommen hat, sich allmählich abkühlt. In solchen Fällen verstreicht eine längere Zeit, bis der Raum die Temperatur der Innenfläche der Mauern angenommen hat; die letzteren haben also während einer kürzeren Zeit die Wärme zu ersetzen, welche durch die Fenster hindurch verloren geht, ihre Temperaturerniedrigung in der Stillstandsperiode wird daher geringer sein, als im ersten Falle.

§ 21.

Empirische Koeffizienten.

Für praktische Zwecke genügt es in der Regel, daß man die Wärmeverluste derart berechnet, als wenn kontinuierliche Heizung eingerichtet und der Beharrungszustand erreicht oder fortdauernd vorhanden wäre. Die für den Beharrungszustand berechnete Anzahl der Wärmeeinheiten multipliziert man dann bei intermittierender Heizung mit einem angemessenen empirischen Koeffizienten φ. Redtenbacher nimmt an:

1) für kontinuierliche Heizung bei Tag und Nacht $\varphi = 1$;
2) für kontinuierliche Heizung bei Tag und Unterbrechung bei Nacht $\varphi = 1{,}2$;
3) wenn nur einzelne Stunden geheizt werden soll, $\varphi = 1{,}5$ bis $2{,}0$.

Mittels vorstehender Erfahrungs-Koeffizienten kann der Wärmeverlust eines Raumes auch bei intermittierender Heizung gefunden und danach die Größe der Heizfläche für die Zwecke der Praxis hinreichend genau bestimmt werden, wie nachstehende Zahlenbeispiele ergeben:

Beispiel I. In § 18 ist der Wärmeverlust eines Krankenzimmers unter Annahme von kontinuierlicher Heizung bestimmt worden. Wenn die Heizung während der Nacht fortfällt, so hat man zu setzen für Heizung bei Tage $\varphi = 1{,}2$, d. h. die für kontinuierliche Heizung gefundenen Resultate sind mit 1,2 zu multiplizieren und man findet:

Gesamtwärmeverlust $3347 \times 1{,}2 =$ rot. 4016 W.-Einh.

Beispiel II. Ein Zeichensaal soll während einzelner Tagesstunden mit eisernen Öfen geheizt werden; zwei Langseiten und eine Schmalseite bilden Abkühlungsflächen, die vierte Seite stößt an einen geheizten Vorraum. Die Decke ist geschützt.

Dimensionen:

Länge des Saales . . 15 m, Breite 10 m, Höhe 5 m,
Die Mauerstärke beträgt 0,50 m,
Fensterzahl = 8 bei 1,5 m Breite und 3 m Höhe,
Temperaturdifferenz . . 30°,
Koeffizient φ . . . . 1,5.

Die transmittierende Mauerfläche enthält:

$(2 . 15 + 10)\ 5 =$ . . .	200 qm.
Hiervon die Fenster mit	36 „
also zwei Stein starke Mauer	164 qm.

Die Wärmeverluste sind, wenn wir die von Fischer gefundenen Werte benutzen, folgende:

Vom Fußboden $150 . 0{,}31 \times 30 \times 1{,}5 =$	2092 W.-Einh.
Durch die Wände $164 . 1{,}03 \times 30 \times 1{,}5 =$	7601 „
Durch die Fenster $36 . 3{,}87 \times 30 \times 1{,}5 =$	6269 „
Summa der Wärmverluste	15962 W.-Einh.