

# Zeitschrift für angewandte Chemie

Band I, S. 141–148

Aufsatzteil

13. Mai 1919

## Die spezifischen Wärmen der Gase für feuerungstechnische Berechnungen<sup>1)</sup>.

Von Prof. Dr. BERNHARD NEUMANN, Breslau.

(Eingeg. 3./3. 1919.)

Bei allen feuerungstechnischen Rechnungen ist die Kenntnis genauer Zahlen der spezifischen Wärmen der Gase unerlässlich. Schlägt man nun irgend ein Handbuch nach, so findet man in jedem derselben andere Zahlenwerte. Dieser Übelstand ist sehr störend, denn auf diese Weise sind fast nie zwei Berechnungen von Flammentemperaturen oder die Wärmeinhalte von Gasgemischen vergleichbar.

Solange die Bestimmungen der spezifischen Wärmen nur bei mäßigen Temperaturen durchgeführt wurden, nahm man allgemein an, daß die spezifischen Wärmen der Gase mit der Temperatur gar nicht oder nur wenig veränderlich seien. Rechnet man mit unveränderlichen spezifischen Wärmen Flammentemperaturen aus, so ergeben sich Werte, die alle um mehrere hundert Grad zu hoch sind.

Durch die Untersuchungen von Mallard und Le Chatelier bei Temperaturen bis zu rund 3000° wurde dann festgestellt, daß die spezifischen Wärmen der Gase bei höheren Temperaturen erheblich größer sind, als es nach den früher zwischen 0 und 100° oder höchstens 200° gemessenen Werten anzunehmen war. Aus diesen Messungen mußte gefolgert werden, daß bei allen Gasen die spezifischen Wärmen zunehmen, und zwar, daß sie mit steigender Temperatur ganz gleichmäßig anwachsen. Die Zahlen von Mallard und Le Chatelier sind in eine ganze Reihe Lehr- und Handbücher übergegangen (z. B. in Bunte, Gaskursus, in Richards, Metallurg. Berechnungen, in die „Hütte“ und „Eisenhütte“ usw.) und werden heute fast allgemein noch benutzt.

Nach zahlreichen neueren Untersuchungen verschiedener Forscher trifft aber das geradlinige Anwachsen der spezifischen Wärmen höchstens auf die sog. zweiatomigen Gase (Sauerstoff, Stickstoff, Wasserstoff, Kohlenoxyd, Luft) zu, nicht aber für Wasserdampf, Kohlensäure, schweflige Säure und für Gase mit größerer Anzahl von Atomen im Molekül. Die Zahlen von Mallard und Le Chatelier sind auch aus diesem Grunde nicht mehr als einwandfreie Grundlagen anzusehen.

Nach dem Jahre 1900 sind von Langen, von Pier, von Bjerrum, ferner von Holborn, Henning, Austin, von Scheel, Heusse u. a. weitere sehr genaue Messungen bis zu 3000° ausgeführt worden, die recht gut miteinander stimmen. Diese bei verschiedenen Temperaturen ermittelten Einzelwerte sind aber merkwürdiger Weise bisher kaum für technische Aufgaben herangezogen worden, offenbar deshalb, weil man mit den wenigen Einzelwerten nicht viel anfangen konnte, wozu noch kam, daß einige Forscher ihre Zahlen bei konstantem Druck bestimmt und so angegeben haben, andere auf konstantes Volumen bezogen; in einzelnen Fällen sind Molekularwärmen, in anderen wahre spezifische Wärmen, dann wieder mittlere spezifische Wärmen angegeben.

Bei sachgemäßer Wertung aller dieser experimentellen Ergebnisse findet man aber eine so weitgehende Übereinstimmung der von verschiedenen Forschern auf verschiedenen Wegen erhaltenen Werte, daß man die hieraus abgeleiteten Werte durchaus als endgültig ansehen darf.

Hiernach sind also zuverlässige Werte der spezifischen Wärmen aller für feuerungstechnische Rechnungen und für die Verbrennungen in Explosionsmotoren in Betracht kommender Gase für Temperaturen von 0–3000° vorhanden, es fehlt nur noch die bequeme Form, um die neueren richtigeren Werte in praktischen Gebrauch zu nehmen. Ich habe deshalb auf Grund nachstehend angeführter Unterlagen

<sup>1)</sup> Sonderdrucke dieses Aufsatzes sind vom Verlag für angewandte Chemie G. m. b. H., Leipzig, Nürnberger Straße 48, zum Preise von M —.40 für das Stück zu beziehen. Versand gegen vorherige Einsendung des Betrages oder gegen Nachnahme. Bei Bestellungen die nach dem 3. Juni 1919 hier eingehen, erhöht sich der Preis auf M —.60.

die beigegebenen vier Zahlentafeln berechnet, welche die wahren und mittleren spezifischen Wärmen verschiedener Gase für konstanten Druck, bezogen auf 1 kg Gas oder auf 1 cbm Gas, von 0° bis zu 3000° umfassen.

Die allgemeine Benutzung dieser Tabellen bei feuerungstechnischen Berechnungen würde die bisher vermißte Einheitlichkeit leicht ergeben können.

Zu den Zahlen der nachstehenden Tabellen ist folgendes zu bemerken. Die in den Tafeln aufgenommenen spezifischen Wärmen sind nur solche, die sich auf konstanten Druck beziehen ( $C_p$ ), wie sie für feuerungstechnische Zwecke allein gebraucht werden können. Tabelle 1 enthält die Werte der wahren spezifischen

Tafel I.

Wahre spezifische Wärmen  
bei konstantem Druck bezogen auf 1 kg Gas bei t°.

Temp.	Kohlensäure, schweflige Säure	Wasserdampf	Sauerstoff	Stickstoff, Kohlenoxyd	Luft	Wasserstoff
0°	0,202	0,462	0,218	0,249	0,241	2,445
100°	0,215	0,465	0,221	0,252	0,244	3,490
200°	0,230	0,470	0,224	0,255 <sub>6</sub>	0,247	3,534
300°	0,244	0,475	0,226	0,259	0,250	3,579
400°	0,257	0,481	0,229	0,262	0,253	3,624
500°	0,268	0,489	0,232	0,265 <sub>6</sub>	0,256 <sub>6</sub>	3,668
600°	0,275	0,499	0,235	0,269	0,260	3,713
700°	0,282	0,509	0,238	0,272	0,263	3,758
800°	0,289	0,521	0,240 <sub>5</sub>	0,275 <sub>6</sub>	0,266	3,802
900°	0,293	0,535	0,243	0,279	0,269	3,847
1000°	0,297	0,551	0,246	0,282	0,272	3,891
1100°	0,300	0,572	0,249	0,285 <sub>5</sub>	0,275	3,936
1200°	0,302	0,594	0,252	0,289	0,278	3,981
1300°	0,305	0,619	0,254 <sub>5</sub>	0,292	0,281	4,025
1400°	0,307	0,644	0,257	0,295 <sub>5</sub>	0,284 <sub>5</sub>	4,070
1500°	0,309	0,670	0,260	0,299	0,288	4,115
1600°	0,311	0,696	0,263	0,302	0,291	4,159
1700°	0,313	0,723	0,266	0,305 <sub>5</sub>	0,294	4,204
1800°	0,315	0,750	0,269	0,309	0,297	4,249
1900°	0,317	0,779	0,271	0,312	0,300	4,293
2000°	0,319	0,808	0,274	0,315 <sub>5</sub>	0,303	4,338
2100°	0,320	0,837	0,277	0,319	0,306	4,382
2200°	0,322	0,865	0,280	0,322	0,309	4,427
2300°	0,323	0,895	0,283	0,325 <sub>5</sub>	0,312 <sub>5</sub>	4,472
2400°	0,325	0,924	0,285	0,329	0,315 <sub>6</sub>	4,516
2500°	0,327	0,954	0,288	0,332	0,319	4,561
2600°	0,329	0,984	0,291	0,335 <sub>5</sub>	0,322	4,606
2700°	0,331	1,014	0,294	0,339	0,325	4,650
2800°	0,333	1,044	0,297	0,342	0,328	4,695
2900°	0,334	1,075	0,300	0,345 <sub>5</sub>	0,331	4,740
3000°	0,336	1,105	0,302	0,349	0,334	4,784

Wärmen bei konstantem Druck von 0–3000° für Kohlensäure, schweflige Säure, Wasserdampf, Sauerstoff, Stickstoff, Luft, Kohlenoxyd und Wasserstoff, bezogen auf 1 kg Gas, Tabelle 2 die entsprechend mittleren spezifischen Wärmen. Tabelle 3 bringt die wahren spezifischen Wärmen dieser Gase, bezogen auf 1 cbm Gas, Tabelle 4 die entsprechenden mittleren spezifischen Wärmen.

Die Ergebnisse sind auch graphisch zur Darstellung gebracht. In Diagramm 1 sind die wahren spezifischen Wärmen  $c_p$  und die mittleren spezifischen Wärmen  $c_{pm}$  bezogen auf 1 kg Gas eingezeichnet, in Diagramm 2 dieselben spezifischen Wärmen bezogen auf 1 cbm Gas. Der obere Teil des Kurvenblattes 1 zeigt nur die von Kohlensäure und Wasserdampf eigentümlich gekrümmten Kurven. Die sog. zweiatomigen Gase sind nicht mit in dasselbe Schaubild eingetragen, da die Kurven sehr nahe beieinander liegen und die Kohlen-

Tafel II.

Mittlere spezifische Wärmen  
bei konstantem Druck bezogen auf 1 kg Gas, zwischen 0 und t°.

Temp.	Kohlen- säure, schweflige Säure	Wasser- dampf	Sauerstoff	Stickstoff, Kohlen- oxyd	Luft	Wasser- stoff
0°	0,202	0,462	0,218	0,249	0,241	3,445
100°	0,209	0,464	0,219	0,251	0,242	3,467
200°	0,217	0,466	0,221	0,252	0,244	3,490
300°	0,225	0,468	0,222	0,254	0,246	3,512
400°	0,232	0,470	0,224	0,255	0,247	3,534
500°	0,238	0,473	0,225	0,257	0,249	3,556 <sub>6</sub>
600°	0,243	0,476	0,226	0,259	0,250	3,579
700°	0,248	0,479	0,228	0,260 <sub>6</sub>	0,252	3,601
800°	0,253	0,484	0,229	0,262	0,253	3,624
900°	0,257	0,490	0,230 <sub>6</sub>	0,264	0,255	3,646
1000°	0,260	0,495	0,232	0,265 <sub>6</sub>	0,256 <sub>5</sub>	3,668
1100°	0,263	0,500	0,233 <sub>6</sub>	0,267	0,258	3,690 <sub>6</sub>
1200°	0,265	0,506 <sub>6</sub>	0,235	0,269	0,260	3,713
1300°	0,268	0,513	0,236	0,270 <sub>6</sub>	0,261	3,735
1400°	0,270	0,520	0,238	0,272	0,263	3,758
1500°	0,273	0,527	0,239	0,274	0,264	3,780
1600°	0,275	0,535	0,240 <sub>5</sub>	0,275 <sub>6</sub>	0,266	3,802
1700°	0,278	0,544	0,242	0,277	0,267	3,824
1800°	0,280	0,554	0,243	0,279	0,269	3,847
1900°	0,282	0,566	0,245	0,280 <sub>5</sub>	0,270 <sub>5</sub>	3,869
2000°	0,283	0,578	0,246	0,282	0,272	3,891
2100°	0,284	0,590	0,248	0,284	0,273 <sub>6</sub>	3,914
2200°	0,286	0,603	0,249	0,285 <sub>5</sub>	0,275	3,936
2300°	0,288	0,616	0,250	0,287	0,277	3,958
2400°	0,289	0,629	0,252	0,289	0,278	3,981
2500°	0,290	0,642	0,253	0,290 <sub>5</sub>	0,280	4,003
2600°	0,291	0,655	0,255	0,292	0,281	4,025
2700°	0,292 <sub>5</sub>	0,669	0,256	0,294	0,283	4,047
2800°	0,294	0,683	0,257	0,295 <sub>5</sub>	0,284	4,070
2900°	0,295	0,698	0,259	0,297	0,286	4,092
3000°	0,296	0,713	0,260	0,299	0,288	4,115

säurckurve mehrmals schneiden, wodurch das Bild unübersichtlich würde. Diese Kurven sind im unteren Teile des Blattes besonders aufgezeichnet worden.

Sollen Verbrennungstemperaturen für konstantes Volumen  $c_v$  berechnet werden, z. B. für Gasmaschinen, so sind die Zahlen der Tabelle zwar nicht direkt zu brauchen, die gesuchten Werte lassen sich daraus aber leicht ableiten.

Nach der Zustandsgleichung der Gase ist bekanntlich  $p_{sv} = RT$ . Daraus folgt

$$c_p - c_v = \frac{1}{427} R \quad R = \frac{848}{m}$$

$$mc_p - mc_v = \frac{848}{427} = 1,985.$$

Der Unterschied der Molekularwärmen ist demnach für alle Gase bei allen Temperaturen gleich 1,985. Da nun die Molekulargewichte der Gase bekannt sind, so kann man leicht aus einer beliebigen Zahl  $c_p$  oder  $c_{pm}$  der Tabelle den entsprechenden Wert für  $c_v$  oder  $c_{vm}$  berechnen, denn  $mc_v = mc_p - 1,985$ .

Wenn also beispielsweise die mittlere spezifische Wärme der Kohlensäure für konstantes Volumen für 1 kg Gas zwischen 0 und 1700° gesucht wird, so entnehmen wir der Tabelle 2 den Wert 0,278:

$$(mc_p)_m = 44 \cdot 0,278 = 12,232$$

$$(mc_v)_m = 12,232 - 1,985 = 10,247$$

$$c_{vm} \text{ für 1 kg CO}_2 = \frac{10,247}{44} = 0,233$$

$$c_{vm} \text{ für 1 cbm CO}_2 = \frac{10,247}{22,41} = 0,457$$

Oder wir suchen die wahre spezifische Wärme für 1 kg Sauerstoff bei 0°, dann entnehmen wir der Tabelle 1 den Wert 0,218:

$$mc_v = (32 \cdot 0,218) - 1,985 = 4,991$$

$$c_v \text{ für 1 kg O}_2 = \frac{4,991}{32} = 0,156$$

$$c_v \text{ für 1 cbm O}_2 = \frac{4,991}{22,41} = 0,223.$$

Tafel III.

Wahre spezifische Wärmen  
bei konstantem Druck bezogen auf 1 cbm Gas bei t°.

Temperatur	Kohlensäure, schweflige Säure	Wasserdampf	Sauerstoff, Stickstoff, Luft, Kohlenoxyd
0°	0,397	0,372	0,312
100°	0,422	0,374	0,316
200°	0,452	0,378	0,320
300°	0,479	0,382	0,324
400°	0,505	0,387	0,328
500°	0,527	0,393	0,332
600°	0,547	0,401	0,336
700°	0,558	0,409	0,340
800°	0,568	0,419	0,344
900°	0,576	0,430	0,348
1000°	0,583	0,444	0,352
1100°	0,589	0,460	0,356
1200°	0,595	0,478	0,360
1300°	0,599	0,498	0,364
1400°	0,603	0,518	0,368
1500°	0,607	0,539	0,372
1600°	0,611	0,560	0,376
1700°	0,615	0,582	0,380
1800°	0,619	0,604	0,384
1900°	0,623	0,627	0,388
2000°	0,626	0,650	0,392
2100°	0,629	0,673	0,396
2200°	0,632	0,696	0,400
2300°	0,634	0,720	0,404
2400°	0,638	0,743	0,408
2500°	0,642	0,767	0,412
2600°	0,646	0,791	0,416
2700°	0,650	0,816	0,420
2800°	0,654	0,840	0,424
2900°	0,657	0,865	0,428
3000°	0,660	0,889	0,432

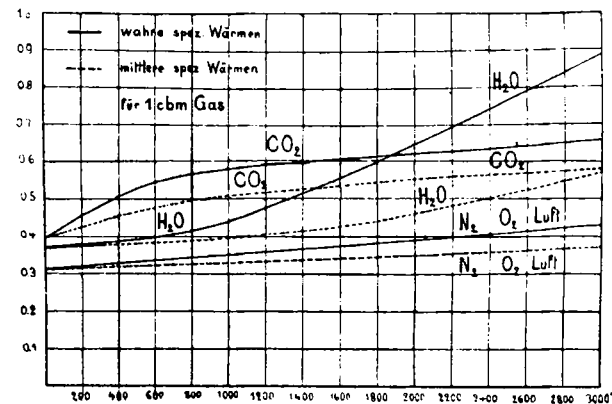


Diagramm 1.

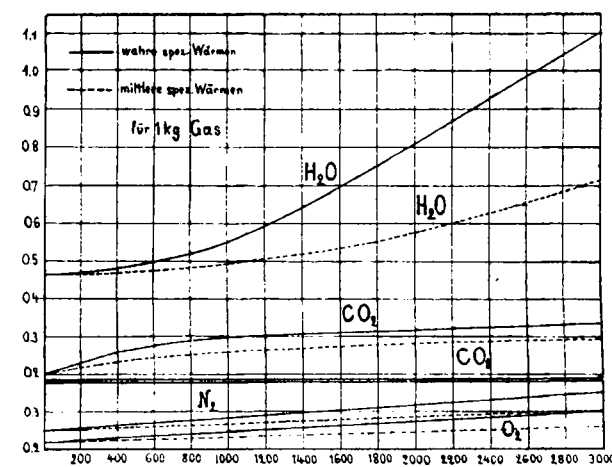


Diagramm 2.

Tafel IV.  
Mittlere spezifische Wärmen  
bei konstantem Druck bezogen auf 1 cbm Gas zwischen 0 und t°.

Temperatur	Kohlensäure, schweflige Säure	Wasserdampf	Sauerstoff, Stickstoff, Luft, Kohlenoxyd
0°	0,397	0,372	0,312
100°	0,410	0,373	0,314
200°	0,426	0,375	0,316
300°	0,442	0,376	0,318
400°	0,456	0,378	0,320
500°	0,467	0,380	0,322
600°	0,477	0,383	0,324
700°	0,487	0,385	0,326
800°	0,497	0,389	0,328
900°	0,505	0,394	0,330
1000°	0,511	0,398	0,332
1100°	0,517	0,402	0,334
1200°	0,521	0,407	0,336
1300°	0,526	0,413	0,338
1400°	0,530	0,418	0,340
1500°	0,536	0,424	0,342
1600°	0,541	0,430	0,344
1700°	0,546	0,438	0,346
1800°	0,550	0,446	0,348
1900°	0,554	0,455	0,350
2000°	0,556	0,465	0,352
2100°	0,558	0,475	0,354
2200°	0,562	0,485	0,356
2300°	0,566	0,495	0,358
2400°	0,568	0,505	0,360
2500°	0,570	0,516	0,362
2600°	0,572	0,527	0,364
2700°	0,574	0,538	0,366
2800°	0,577	0,549	0,368
2900°	0,579	0,561	0,370
3000°	0,581	0,573	0,372

Bei den Berechnungen der Molekularwärmen bzw. der spezifischen Wärmen aus den experimentellen Daten sind folgende Werte benutzt worden:

$$\begin{array}{llll} \text{O}_2 = 32 & \text{H}_2 = 2,016 & \text{N}_2 = 28,02 & \text{CO} = 28 \\ \text{Luft} = 28,95 & \text{CO}_2 = 44 & \text{H}_2\text{O} = 18,016. \end{array}$$

1 Molekulargewicht des Gases bei 0° und 760 mm = 22,41 cbm.

Die Grundlagen, auf welche sich die in den Tabellen berechneten Zahlen stützen, sind folgende:

#### Stickstoff.

Holborn und Henning<sup>2)</sup> haben nach der Durchströmungsmethode eine Reihe Bestimmungen der mittleren spezifischen Wärmen des Stickstoffs zwischen 0 und 1400° durchgeführt. Diese Zahlen sind, wie die Messungen Piers<sup>3)</sup> bewiesen, um etwa 4% zu klein. Dasselbe gilt von den Messungen der spezifischen Wärmen von Stickstoff und Luft von Holborn und Austin<sup>4)</sup>. Das bestätigen auch die  $c_p/c_v$ -Bestimmungen, ferner die direkten Messungen Regnaults und die Schallgeschwindigkeitsmessungen. Die Molekularwärme von Stickstoff bei Zimmertemperatur beträgt wenigstens 6,9 gegen 6,7 nach Holborn. Auch die Untersuchungen Langens<sup>5)</sup> ergaben einen zu niedrigen Wert, nämlich  $c_v = 4,8 \pm 0,0006$  t. Die von Pier (l. c.) experimentell durch Explosion sehr genau bestimmten Molekularwärmen  $mc_v$  für Stickstoff für hohe Temperaturen sind nach Korrekturen von Bjerrum<sup>6)</sup> folgende, wobei zum Vergleich die Zahlen von Holborn und Henning, die von Bjerrum<sup>7)</sup> selbst ermittelten Werte, ferner die nach Einstein und Nernst-Lindemann berechneten Werte angegeben sind.

<sup>2)</sup> Ann. d. Phys. [4] B 23, S 209 [1907].

<sup>3)</sup> Z. f. Elektrochem. 15, 536 [1909].

<sup>4)</sup> Wiss. Abh. d. Phys.-techn. Reichsanstalt 4, H. 2, S. 147 [1905].

<sup>5)</sup> Forschungsarb. H. 8, S. 1 [1903].

<sup>6)</sup> Z. f. Elektrochem. 18, 101 [1912].

<sup>7)</sup> Z. f. Elektrochem. 17, 731 [1911]; 18, 101 [1912].

	$mc_v$ beob.	berechn.	berechn.
18°	4,84 aus $c_p/c_v$	4,96	4,96
200°	4,73	4,97	5,00
630°	4,91	5,10	5,19
1000°	5,25	5,31	5,38
1347°	5,31	5,50	5,53
1519°	5,43		
1783°	5,58		
1951°	5,79		
2000°	5,80	5,78	5,78
2182°	5,87		
2367°	5,93		
2500°	6,03		

Die mittleren Molekularwärmen zwischen 0 und 2500° von Argon, Wasserdampf, Stickstoff und Wasserstoff sind nach den Bestimmungen Piers bis auf kleine Bruchteile eines Prozentes sicher gestellt.

Für Stickstoff berechnet sich hiernach für 0°

$$mc_v = 4,96, \text{ also } mc_p = 6,945 \\ c_p = 0,248.$$

Diese Zahlen werden bestätigt durch Messungen von Scheel und Heuse<sup>8)</sup>, welche die spezifischen Wärmen  $c_p$  bei 20° unter Atmosphärendruck für Luft zu 0,2408, für Kohlensäure zu 0,202, für Sauerstoff zu 0,219, für Stickstoff zu 0,249 fanden.

In den Tabellen ist der Wert  $c_p = 0,249$  benutzt worden aus Gründen, die weiter unten noch erläutert sind.

#### Luft.

Scheel und Heuse<sup>9)</sup> fanden die spezifische Wärme der Luft  $c_p$  bei 20° zu 0,2408. Aus den oben angegebenen von ihnen gefundenen Werten für Sauerstoff 0,219 und Stickstoff 0,249 berechnet sich nach der Mischungsregel unter der Annahme eines Wertes  $c_p = 0,123$  für Argon, ein Wert für Luft  $c_p = 0,2401$ , was sehr gut mit dem direkt bestimmten Werte übereinstimmt. Regnault hatte zwischen 0 und 200° 0,2355 gefunden; die Zahlen von Holborn und Henning<sup>10)</sup> sind auch hier wieder zu klein.

In den Tabellen ist für Luft der Wert  $c_p = 0,241$  benutzt worden.

#### Sauerstoff.

Pier (l. c.) schloß aus seinen Acetylenexplosionen, daß die Molekularwärmen von Sauerstoff und Stickstoff gleich sein müssen. Hieraus ergibt sich der Wert für Sauerstoff  $c_p = 0,217$ . Scheel und Heuse (l. c.) bestimmten den Wert  $c_p = 0,219$ . Hiermit sind auch die älteren Messungen von Holborn und Austin<sup>11)</sup> in ziemlicher Übereinstimmung. Sie fanden  $c_{pm}$

$$\begin{array}{ll} 20-245^\circ = 0,223 & \text{für Sauerstoff} = 0,2206 \\ 20-440^\circ = 0,2255 & \text{mit 9,5\%} = 0,224 \\ 20-630^\circ = 0,2318 & \text{Stickstoff} = 0,230 \end{array} \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{für reinen} \\ \text{Sauerstoff} \end{array}$$

Regnault hatte  $c_{pm}$  zwischen 0 und 200° zu 0,2175 bestimmt.

In den Tabellen ist der Wert  $c_p = 0,218$  für Sauerstoff benutzt worden. Dieser Wert ist der Mittelwert zwischen den Befunden von Pier und von Scheel und Heuse; die Begründung hierfür ist nachher noch erläutert.

#### Kohlenoxyd.

Pier<sup>12)</sup> hat durch Explosion auch die Molekularwärme von Kohlenoxyd bestimmt und dieselbe gleich groß wie die des Sauerstoffs und Stickstoffs gefunden. Auch die Versuche von Bjerrum<sup>13)</sup> bestätigen das. „Kohlenoxyd und Sauerstoff scheinen nach Explosionsversuchen recht genau dieselbe spezifische Wärme zu haben wie Stickstoff.“

Benutzt man nun für Luft den angegebenen Wert 0,241, für Stickstoff 0,249, für Sauerstoff den Mittelwert 0,218 und multipliziert diese Werte mit den entsprechenden Molekulargewichten: 28,95 und 28,02 und 32, so ergeben sich übereinstimmende Molekularwärmen von 6,977, 6,977 und 6,976, so daß die oben angegebenen  $c_p$ -Werte als die zuverlässigsten angesehen werden müssen. Die verschiedenen im Nernst'schen Laboratorium durch Explosions-

<sup>8)</sup> Z. f. Instrumentenk. 32, 125 [1912].

<sup>9)</sup> Z. f. Instrumentenk. 32, 125 [1912]; Ann. d. Phys. [4] 37, 79 [1912].

<sup>10)</sup> Ann. d. Phys. [4] 18, 739 [1905].

<sup>11)</sup> Wissensch. Abh. d. Phys.-Techn. Reichsanst. 4, H. 2, S. 147 [1905].

<sup>12)</sup> Z. f. Elektrochem. 16, 897 [1910].

<sup>13)</sup> Z. f. Elektrochem. 17, 733 [1911].

versuche bei hohen Temperaturen gewonnenen und auf 0° bezogenen Werte sind nur um eine Kleinigkeit kleiner wie jene in der Reichsanstalt nach der Durchströmungsmethode bei Temperaturen bis 1400° erhaltenen und auf 0° bezogenen Werte. Es erscheint also durchaus gerechtfertigt, den Wert  $mc_p = 6,977$  bei der Berechnung der Einzelwerte der spezifischen Wärmen der sog. zweiatomigen Gase: Sauerstoff, Stickstoff, Kohlenoxyd, Luft zugrunde zu legen.

Da nun die Molekularwärmen für Sauerstoff, Stickstoff und Kohlenoxyd gleich sind, so ergibt sich für Kohlenoxyd der Wert  $c_p = 0,249$ .

#### Wasserstoff.

Für den Wasserstoff liegen ebenfalls sehr genaue Messungen von Pier<sup>14)</sup> vor. Aus diesen Zahlen, korrigiert von Bjerrum<sup>15)</sup>, sowie nach dessen eigenen Messungen<sup>16)</sup> und nach den Berechnungen nach Einstein und Nernst-Lindemann ergeben sich folgende Werte der Molekularwärmen für Wasserstoff bei konstantem Volumen  $mc_v$ :

Temp.	beob.	berechn.	berechn.
18°	4,9—5,2 aus $c_p/c_v$	4,96	4,96
1413°	5,34	5,37	5,37
1592°	5,42	5,45	5,44
1801°	5,47		
1835°	5,52	5,54	5,52
1916°	5,57		
2017°	5,61	5,61	5,59
2147°	5,67		
2250°	5,72	5,69	5,67
2368°	5,79		

Bjerrum berechnet die Molekularwärme für konstantes Volumen bei 0° im Mittel zu 4,96, hieraus ergibt sich für konstanten Druck  $4,96 + 1,985 = 6,945$ . Danach ist die spezifische Wärme des Wasserstoffs

$$c_p = \frac{6,945}{2,016} = 3,445.$$

Daß dieser Wert der Molekularwärme des Wasserstoffs etwas kleiner ist, wie die unter sich gleichen Molekularwärmen der anderen zweiatomigen Gase, ist nicht auf eine Ungenauigkeit der Bestimmung zurückzuführen, sondern diese Abweichung scheint in der Natur des Wasserstoffs zu liegen, was durch Messungen bei tiefen Temperaturen durch Eucken bestätigt wird.

#### Die Temperaturkoeffizienten der spezifischen Wärmen der zweiatomigen Gase.

Die spezifischen Wärmen der zweiatomigen Gase wachsen mit der Temperatur an und zwar fast geradlinig. Wie neuere Untersuchungen gezeigt haben, verläuft der Anstieg streng genommen nicht ganz in der Form einer Geraden, kommt einer solchen aber so nahe, daß wir für praktische Zwecke unbedenklich mit dem geradlinigen Zuwachs rechnen können.

Holborn und Henning (l. c.) haben für Stickstoff zwischen 0 und 1400° die wahre spezifische Wärme  $c_p = c_p 0^\circ + 0,000 038 t$ , Langen  $c_v = c_v 0^\circ + 0,000 0378 t$  gefunden, Schüle<sup>17)</sup> rechnet deshalb die wahre spezifische Wärme der zweiatomigen Gase zu

$$mc_p = 6,86 + 0,001 06 t$$

$$mc_v = 4,875 + 0,001 06 t.$$

Pier (l. c.) fand die mittlere spezifische Wärme für Argon  $(mc_v)_m = 2,977 = \text{konstant}$   
Wasserstoff  $(mc_v)_m = 4,700 + 0,000 45 t$   
Stickstoff  $(mc_v)_m = 4,900 + 0,000 45 t.$

Die Molekularwärmen selbst sind in beiden Fällen, wie vorher schon gezeigt, etwas zu klein, die gefundenen Temperaturkoeffizienten stimmen aber nach den verschiedenen Forschern ziemlich gut miteinander überein. Die in der Phys.-Techn. Reichsanstalt bei Temperaturen bis 1400° gefundenen Werte sind eine Kleinigkeit höher wie die im Nernst'schen Laboratorium bis zu Temperaturen von etwa 2500° ermittelten.

Bei einheitlicher Umrechnung ergeben sich für beide Fälle folgende Werte für die wahren spezifischen Wärmen bei bestimmter Temperatur für 1 kg Gas, unter Einsetzung der richtigen Molekularwärmen:

<sup>14)</sup> Z. f. Elektrochem. **16**, 897 [1910].

<sup>15)</sup> Z. f. Elektrochem. **17**, 731 [1911].

<sup>16)</sup> Z. f. Elektrochem. **18**, 101 [1912].

<sup>17)</sup> Z. Ver. D. Ing. **1916**, 630.

Nach Holborn, Henning, Langen. Nach Pier, Bjerrum

Stickstoff	$c_p = 0,249 + 0,000 0378 t$	$0,249 + 0,000 0332 t$
Sauerstoff	$c_p = 0,218 + 0,000 0332 t$	$0,218 + 0,000 0281 t$
Kohlenoxyd	$c_p = 0,249 + 0,000 0378 t$	$0,249 + 0,000 0332 t$
Luft	$c_p = 0,241 + 0,000 0366 t$	$0,241 + 0,000 0311 t$
Wasserstoff	$c_p = 3,445 + 0,000 526 t$	$3,445 + 0,000 4464 t.$

In den Tabellen sind die letztgenannten Werte, welche bis zu den höchsten vorkommenden Temperaturen experimentell gemessen sind, benutzt worden.

Die mittleren spezifischen Wärmen zwischen Anfangs- und Endtemperatur ergeben sich aus den Konstanten plus dem halben Temperaturzuwachs, sie betragen also unter Zugrundelegung der Pier-Bjerrum'schen Zahlenwerte:

Stickstoff	$c_{pm} = 0,249 + 0,000 0166 t$
Sauerstoff	$c_{pm} = 0,218 + 0,000 01406 t$
Kohlenoxyd	$c_{pm} = 0,249 + 0,000 0166 t$
Luft	$c_{pm} = 0,241 + 0,000 0155 t$
Wasserstoff	$c_{pm} = 3,445 + 0,000 2232 t.$

Ganz anders wie bei den zweiatomigen Gasen ist der Verlauf der Zunahme mit steigender Temperatur bei Kohlensäure, schwefliger Säure und Wasserdampf, und zwar bei Kohlensäure und Wasserdampf ganz abweichend voneinander. Die Unterschiede werden namentlich bei graphischer Aufzeichnung (Diagramm 1 und 2) deutlich erkennbar.

#### Kohlensäure.

Neuere experimentelle Bestimmungen der spezifischen Wärme der Kohlensäure lieferten folgende Werte. Scheel und Heuse<sup>18)</sup>  $c_p$  bei 0° = 0,202. Holborn und Henning<sup>19)</sup> und Holborn und Austin<sup>20)</sup> fanden  $c_{pm}$ :

0°—200°	= 0,2168
20°—440°	= 0,2306
20°—630°	= 0,2423
20°—800°	= 0,2493
20°—847°	= 0,2491
20°—1000°	= 0,2602
20°—1200°	= 0,2654
20°—1360°	= 0,2678

Holborn und Henning berechnen  $c_p 0^\circ = 0,201$ , Holborn und Austin 0,2021. Ähnliche Werte fand Langen<sup>21)</sup>. Langen-Schreiber<sup>22)</sup> ermittelten zwischen

17—1500°  $(mc_v)_m = 10,45$ , daraus folgt  $(mc_p)_m = 12,43$ ,  $c_{pm} = 0,283$   
17—1700°  $(mc_v)_m = 11,20$ , daraus folgt  $(mc_p)_m = 13,18$ ,  $c_{pm} = 0,300$

Weitere Messungen bei höheren Temperaturen stammen von Pier<sup>23)</sup>. Diese Zahlen hat Bjerrum<sup>24)</sup> mit den Ergebnissen eigener Versuche und mit theoretischen Berechnungen nach Einstein und Nernst-Lindemann zusammengestellt und alle Werte auf mittlere Molekularwärmen  $(mc_p)_m$  bezogen, wodurch sich folgendes Bild ergibt:

	beob.	berechn.	berechn.
18°	7,09 aus $c_p/c_v$	6,87	6,85
18—200°	7,480	7,44	7,44
18—440°	8,143		
18—630°	8,601	8,66	8,67
18—800°	8,964		
18—1000°	9,332	9,34	9,35
18—1200°	9,637		
18—1364°	9,839	9,87	9,80
18—1611°	9,976	10,07	10,03
18—1725°	10,06		
18—1839°	10,28	10,23	10,21
18—2110°	10,47	10,45	10,45
18—2714°	12,89		

Auf Grund obiger Unterlagen hat Schüle (l. c.) mittels eines graphischen Verfahrens Einzelzahlen für die spezifischen Wärmen der Kohlensäure bezogen auf Gewichtseinheiten festgelegt, auf welche in den beigegebenen Tabellen Bezug genommen ist.

<sup>18)</sup> Jahresber. d. Phys.-Techn. Reichsanst. 1912.

<sup>19)</sup> Ann. d. Phys. [4] **23**, 809 [1907].

<sup>20)</sup> Wiss. Abh. d. Phys.-Techn. Reichsanst. **4**, H. 2, S. 147 [1905].

<sup>21)</sup> Forschungsarb. H. 8, S. 1 [1903].

<sup>22)</sup> Z. Ver. D. Ing. **1903**, 631; Dingl. Journ. **318**, 433 [1903].

<sup>23)</sup> Z. f. Elektrochem. **16**, 897 [1910].

<sup>24)</sup> Z. f. Elektrochem. **17**, 733 [1911]; Z. f. phys. Chem. **79**, 537 [1912].

### Schweflige Säure.

Die Molekularwärme der schwefligen Säure ist genau so groß wie die der Kohlensäure. Diese Werte sind von Pier<sup>25)</sup> festgestellt worden; eine Bestätigung dieser Befunde liefern die von Thibaut ausgeführten Schallgeschwindigkeitsmessungen in beiden Gasen. Auch für schweflige Säure gilt die von Pier für Kohlensäure aufgestellte Formel.

### Wasserdampf.

Für die spezifischen Wärmen des Wasserdampfes liegt eine ganze Reihe exakter Messungen vor. Holborn und Henning<sup>26)</sup> ermittelten zwischen 110 und t° folgende mittleren spezifischen Wärmen für 1 kg Dampf (c<sub>pm</sub>):

110°—270° = 0,4639	110°—1000° = 0,4956
110°—440° = 0,4713	110°—1183° = 0,5040
110°—620° = 0,4717	110°—1200° = 0,5138
110°—800° = 0,4777	110°—1327° = 0,5209
110°—820° = 0,4881	110°—1350° = 0,5278
110°—834° = 0,4816	

Für höhere Temperaturen liegen wieder Explosionsversuche von Pier und Bjerrum vor. Bjerrum<sup>27)</sup> hat aus Beobachtungen von Nernst und Levy<sup>28)</sup>, Holborn und Henning (l. c.), Pier (l. c.) und eigenen Versuchen folgende mittleren Werte für die Molekularwärmen bei konstantem Volumen (mc<sub>v</sub>)<sub>m</sub> berechnet und mit den theoretisch berechneten Werten zusammengestellt.

		beob.	berechn.
0—50	Nernst	5,96	6,02
0—270°	und	6,40	6,43
0—450°	Levy	6,82	6,67
110—620°	Holborn	6,51	6,55
110—1000°	und	6,94	6,95
110—1327°	Henning	7,40	7,36
0—1727°		7,96	7,92
0—1811°		7,92	7,98
0—2110°	Pier	8,54	8,52
0—2377°	und	9,37	9,11
0—2663°	Bjerrum	10,00	9,90
0—2908°		10,50	10,7
0—3064°		10,90	11,3

Hiermit stimmen auch die Berechnungen von Siegel<sup>29)</sup>.

Auf Grund vorgenannten Zahlenmaterials hat auch wieder Schüle<sup>30)</sup> mit Hilfe des graphischen Verfahrens die einzelnen Werte der spezifischen Wärme des Wasserdampfes für verschiedene Temperaturen, bezogen auf Gewichtsmengen, festgestellt. Diese Werte sind in den Tabellen mit benutzt.

Bei feuerungstechnischen Rechnungen können unter Umständen auch noch die spezifischen Wärmen anderer Gase, wie Methan, Äthylen, Acetylen, Benzol in Betracht kommen, z. B. bei der Vorwärmung von Koksgasen. Die Bestimmungen der spezifischen Wärmen dieser Gase sind nun bisher leider, namentlich auch hinsichtlich der Veränderlichkeit mit der Temperatur, nicht so in Übereinstimmung, wie es wünschenswert wäre. Nachstehend sind einige Werte mitgeteilt. Da die Erwärmung solcher Gasgemische jedoch nur auf wenige hundert Grad ausgedehnt werden kann, weil sonst Zersetzung eintritt, so wird der Rechenfehler praktisch nicht sehr erheblich sein.

Nachstehende Zahlen sind mittlere spezifische Wärmen c<sub>pm</sub> zwischen 0—200° für 1 kg und 1 cbm.

	für 1 kg	für 1 cbm
Methan . . . . .	0,593	0,424 (Lussana)
Äthylen . . . . .	0,404	0,505 „
Acetylen . . . . .	0,370	0,430
Benzoldampf . . . . .	0,375	1,261 (Regnault)

Die Zahlen von Mallard und Le Chatelier weichen hiervon ziemlich ab:

Methan c<sub>pm</sub>/kg = 0,478 + 0,000498t c<sub>pm</sub>/cbm = 0,343 + 0,000357t  
Äthylen c<sub>pm</sub>/kg = 0,335 + 0,000393t c<sub>pm</sub>/cbm = 0,420 + 0,000491t

<sup>25)</sup> Z. f. Elektrochem. 16, 897 [1910].

<sup>26)</sup> Ann. d. Phys. [4] 23, 809 [1907].

<sup>27)</sup> Z. f. Elektrochem. 18, 102 [1912]; Z. physikl. Chem. 79, 521 [1912].

<sup>28)</sup> Verh. d. Phys. Ges. 11, 329; 12, 117 [1910].

<sup>29)</sup> Z. physikl. Chem. 87, 641 [1914].

<sup>30)</sup> Z. Ver. D. Ing. 1906, 630.

Von den spezifischen Wärmen der genannten Gase sind also zurzeit keine eindeutigen Zahlen vorhanden.

Zum Schluß sollen noch einige Beispiele für die Anwendung der Zahlentabellen gegeben werden.

### Wärmeinhalt.

Bei einer Schmelze in einem Martinofen treten 16 958 cbm verbrannter Gase mit einer Temperatur von 1500° aus dem Ofen in den Wärmespeicher und ziehen mit 300° in den Essenkanal ab. Wieviel Wärme können die Gase an den Wärmespeicher abgeben?

Die Abgase bestehen aus 1830 cbm Kohlensäure, 1116 cbm Sauerstoff, 13 512 cbm Stickstoff und 1500 cbm Wasserdampf. Der Wärmeinhalt bei 1500° ist nach Tabelle 4:

CO <sub>2</sub>	1830 · 0,536 =	981 WE.
O <sub>2</sub> + N <sub>2</sub>	14628 · 0,342 =	5003 WE.
H <sub>2</sub> O	1500 · 0,424 =	636 WE.
Wärmekapazität für 1° 6620 WE.		
6620 · 1500 = 9 930 000 WE.		

Die Gase enthalten beim Abgang mit 300° in den Essenkanal:

CO <sub>2</sub>	1830 · 0,442 =	809 WE.
O <sub>2</sub> + N <sub>2</sub>	14628 · 0,318 =	4652 WE.
H <sub>2</sub> O	1500 · 0,376 =	564 WE.
Wärmekapazität für 1° 5025 WE.		
5025 · 300 = 1 507 500 WE.		

An die Wärmespeicher werden also abgegeben:

$$9\,930\,000 - 1\,507\,500 = 8\,422\,500 \text{ WE.}$$

### Flammentemperaturen.

Welche theoretische Flammentemperatur kann bei der Verbrennung von Teeröl, ohne Vorwärmung von Luft, erzielt werden?

Die Zusammensetzung der brennbaren Bestandteile von Teeröl wird im allgemeinen zu 90% Kohlenstoff, 7% Wasserstoff und 0,5% Schwefel angegeben. Das Öl soll nicht mehr wie 1% Wasser enthalten. Der Heizwert schwankt praktisch zwischen 8800 und 9200 WE. Aus einer sehr eingehenden Untersuchung der Teeröle durch Constatam und Schläpfer<sup>31)</sup> ergibt sich als Mittelwert aus 29 Teerölanalysen der wirklich gemessene Heizwert zu 8943 WE. Dieser Wert soll auch in nachstehender Berechnung benutzt werden.

Nach den Formeln

$$\begin{aligned} 12 \text{ kg C} + 32 \text{ kg O} &= 44 \text{ kg CO}_2 \\ 2 \text{ kg H} + 16 \text{ kg O} &= 18 \text{ kg H}_2\text{O} \\ 32 \text{ kg S} + 32 \text{ kg O} &= 48 \text{ kg SO}_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{brauchen } \left\{ \begin{array}{l} 0,90 \text{ kg C} \\ 0,07 \text{ kg H} \\ 0,005 \text{ kg S} \end{array} \right. & \left\{ \begin{array}{l} 2,40 \text{ kg O} \\ 0,56 \text{ kg O} \\ 0,005 \text{ kg O} \end{array} \right\} \text{ und geben } \left\{ \begin{array}{l} 3,30 \text{ kg CO}_2 \\ 0,63 \text{ kg H}_2\text{O} \\ 0,01 \text{ kg SO}_2 \end{array} \right. \\ & 2,965 \text{ kg O} \end{aligned}$$

Da mit Luft verbrannt werden soll, so gehören zu diesen 2,965 kg O (im Verhältnis von 23,2: 76,8) 9,815 kg N, theoretisch erforderlich sind also 12,780 kg Luft. Da in der Praxis nicht ohne Luftüberschuß gearbeitet werden kann, den wir mit 30% annehmen wollen, so kommen weiter noch  $12,780 \cdot \frac{30}{100} = 3,834$  kg Luft hinzu. Wir erhalten also unter Benutzung der mittleren spezifischen Wärme der Tabelle 2, unter Anschluß einer Endtemperatur von etwa 1800°:

$$\begin{aligned} t &= \frac{8943}{(3,30 \cdot 0,280) + (0,63 \cdot 0,554) + (0,01 \cdot 0,280) + (9,815 \cdot 0,279)} \\ &+ \frac{8943}{(3,834 \cdot 0,269)} = \frac{0,9240 + 0,3490 + 0,0028 + 2,7384 + 1,0313}{5,0455} = 1772^\circ. \end{aligned}$$

Sind die Gase auf Raummengen bezogen, so muß sich bei der Berechnung dasselbe Ergebnis herausstellen, wie bei Berechnung mit Gewichtsmengen. Man dividiert die Gewichtsmengen durch die spezifischen Gewichte der Gase. Es wiegt (nach Landolt-Börnstein) 1 cbm: Luft 1,293, Kohlensäure 1,965, Stickstoff 1,251, Wasserdampf 0,804, schweflige Säure 2,86 kg.

Wir haben also in unserem Beispiel: 1,679 cbm CO<sub>2</sub>, 0,783 cbm H<sub>2</sub>O, 0,0035 cbm SO<sub>2</sub>, 7,845 cbm N<sub>2</sub> und 2,965 cbm Luft.

Unter Benutzung der mittleren spezifischen Wärmen der Tabelle 4 erhalten wir also:

<sup>31)</sup> Z. Ver. D. Ing. 1913, 1489; Musspratt, Erg.-Bd. 1, S. 390.

$$t = \frac{8943}{(1,679 \cdot 0,550) + (0,783 \cdot 0,446) + (0,0035 \cdot 0,550) + (7,845 \cdot 0,348) + (2,965 \cdot 0,348)} = \frac{8943}{0,9237 + 3492 + 0,0019 + 2,7304 + 1,0338} = \frac{8943}{5,0390} = 1774^\circ$$

Die 2° Unterschied gegen die vorige Rechenweise sind auf Ungenauigkeiten der Benutzung der abgekürzten Zahlen zurückzuführen.

Das Rechnen mit Zahlen, die auf Gasvolumina bezogen sind, ist besonders bequem bei allen Aufgaben, bei denen es sich um die Verbrennung gasförmiger Brennstoffe handelt. Beispiel:

Generatorgas mit folgender Analyse:

6,3% CO<sub>2</sub>, 22,7 % CO, 0,3% C<sub>n</sub>H<sub>2n</sub>, 2,6% CH<sub>4</sub>, 13,4% H<sub>2</sub>, 0,2% O<sub>2</sub>, 54,5% N<sub>2</sub>

soll kalt mit 30% Luftüberschuß verbrannt werden. Die Verbrennungsluft wird auf 600° vorgewärmt. Wie hoch ist die erzielbare Flammentemperatur?

Das Generatorgas liefert folgenden Heizwert:

0,063 cbm CO <sub>2</sub>	
0,227 cbm CO	3 034 WE. = 689 WE.
0,026 cbm CH <sub>4</sub>	8 562 WE. = 222 WE.
0,134 cbm H <sub>2</sub>	2 570 WE. = 344 WE.
0,003 cbm C <sub>n</sub> H <sub>2n</sub>	13 939 WE. = 42 WE.
0,002 cbm O <sub>2</sub>	
0,545 cbm N <sub>2</sub>	
1,000 cbm Generatorgas	= 1 297 WE.

1 cbm dieses Generatorgases braucht folgende Mengen Sauerstoff zur Verbrennung und gibt damit folgende Mengen Verbrennungsgase:

	brauchen	
0,063 cbm CO <sub>2</sub>	—	—
0,227 cbm CO	0,5 Vol. O	= 0,114 cbm O
0,026 cbm CH <sub>4</sub> · 2	„ O	= 0,54 cbm O
0,134 cbm H <sub>2</sub> · 0,5	„ O	= 0,067 cbm O
0,003 cbm C <sub>n</sub> H <sub>2n</sub> · 3	„	= 0,009 cbm O
0,002 cbm O <sub>2</sub>	„	—
0,545 cbm N <sub>2</sub>	„	—
1,000 cbm		0,244 cbm O
		— 0,002 cbm O
		0,242 cbm O

dabei entstehen

0,063 cbm CO <sub>2</sub>	—	H <sub>2</sub> O	—	N <sub>2</sub>
0,227 „	„	„	—	„
0,026 „	„	0,054 „	—	„
— „	„	0,134 „	—	„
0,006 „	„	0,006 „	—	„
— „	„	„	—	„
— „	„	„	0,545 „	„
0,322 cbm CO <sub>2</sub>	0,194 H <sub>2</sub> O	0,545 N <sub>2</sub>		

$$0,242 \text{ cbm O}_2 \cdot \frac{100}{21} = 1,152 \text{ cbm Luft} = 0,910 \text{ cbm N}_2$$

Die Rauchgase nach der Verbrennung bestehen also aus:

0,322 cbm CO <sub>2</sub>
0,194 cbm H <sub>2</sub> O
1,455 cbm N <sub>2</sub>
1,971 cbm Rauchgas.

Da 30% Luftüberschuß notwendig sind, so beträgt die auf 600° vorzuwärmende Luftmenge 1,152 + 0,346, also fast genau 1,5 cbm. Diese bringen bei der Erhitzung auf 600° (Tabelle 4) 1,5 · 600 · 0,324 = 292 WE. mit. Die Flammentemperatur, die voraussichtlich etwa 1800° erreichen wird, ergibt sich also wie folgt:

$$t = \frac{1297 + 292}{(0,322 \cdot 0,550) + (0,194 \cdot 0,446) + (1,445 \cdot 0,348) + (0,346 \cdot 0,348)} = \frac{1589}{0,1771 + 0,0865 + 0,5063 + 0,1204} = \frac{1589}{0,8903} = 1784^\circ$$

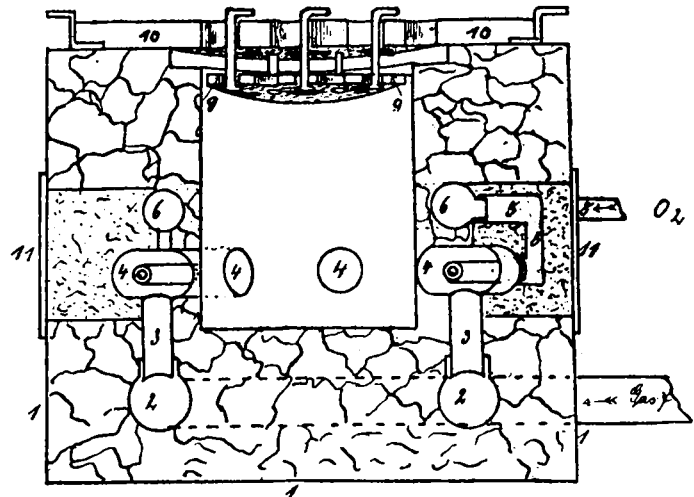
Für derartige Rechnungen dürfte also die Benutzung der mitgeteilten Zahlentabellen sehr bequem sein. [A. 35.]

## Ein Ofen für sehr hohe Temperaturen in oxydierender Atmosphäre.

Von E. PODSZUS.

(Eingeg. 27./2. 1919.)

In einer früheren Mitteilung<sup>1)</sup> war eine kurze Angabe zur Konstruktion eines Ofens gegeben, der es gestattete, in oxydierender Atmosphäre bequem Temperaturen erfolgreich über 2 000° zu erreichen. Der Ofen war nach dem bekannten Prinzip der Gebläseöfen gebaut. Die Erreichung so hoher Temperaturen verlangte einige konstruktive Abänderungen, die im folgenden beschrieben werden.



Die Fig. 1 gibt einen schematischen Längsschnitt eines Ofens mit vier Düsen. Zur Erzielung gleichmäßiger Temperatur und vor allem gleichmäßiger Anheizung ist es vorteilhaft, wenn auch komplizierter, zahlreiche Düsen zu verwenden. So hatte das erste Modell 8. Als Baumaterial wurde geschmolzenes Zirkondioxyd<sup>2)</sup> verwandt und zwar für die der Feuerzone angrenzende Schicht in etwa 1/4 cm Stärke reines. Die übrige Zone bestand aus geschmolzenem Zirkonerz. Es empfiehlt sich, dieses vor dem Schmelzen etwas vom Eisen zu reinigen. Unbedingt nötig ist es aber nicht, da der Ofen sich bei längerem Gebrauch in hoher Temperatur selbst von flüchtigeren Beimengungen reinigt. Die Mauerung wurde innerhalb des Eisenkessels 1 aufgebaut und zwar aus ziemlich großen Blöcken aus geschmolzenem ZrO<sub>2</sub>-Erz, die, passend behauen, so zweckmäßig gelagert wurden, daß sie sich möglichst allein schon stützten. Die Zwischenräume wurden mit einer Masse aus gröberen Körnern Erz oder Oxyd gefüllt, denen ungefähr 1/3 feines und feinstes Material zugesetzt wird, unter Verwendung eines der bekannten Bindemittel. Zur Erleichterung der Bindung in niederen Temperaturen ist der Zusatz von etwa 1% Borsäure, etwa in der Form von Boroglycerin vorteilhaft. Der Boden braucht nur mit grobem Gries ausgefüllt zu werden. Darauf lagert dann das kreisförmig gebogene Gaszuführungsrohr 2, von dem die 4 Stützen 3 nach oben führen. 3 kann aus Porzellan, Quarz oder Zirkonerz bestehen. Bei den Versuchen wurde Quarz verwandt. Die Zuführungen 3 münden in die Gebläserohre 4, die so schräg gestellt waren, daß die Flammen im Innenraum einen rotierenden Kreis bilden. Diese Rohre müssen gut und möglichst hoch gebrannt aus Zirkonoxyd hergestellt sein, da von ihrer Güte das dauernde Funktionieren des Ofens abhängig ist. Durch die untere Abschlußwand dieser Rohre münden die Düsen aus Zirkondioxyd für die Luft- oder Sauerstoffzuführung. Sie werden nach den bekannten Methoden gepreßt und gebrannt<sup>3)</sup>. Die einzige Schwierigkeit bei dem Bau eines neuen Ofens liegt in dem Brennen dieser Gebläserohre und Düsen. Verwendet man nicht ganz reines ZrO<sub>2</sub>, so kann man sie genügend fest in einem elektrisch geheizten Kohlerohr brennen, durch das Luft geblasen wird. Für die Dauer ist dieses Verfahren natürlich zu kostspielig und unvollkommen. Beim Vorhandensein eines Gebläseofens gewinnt man sie einfacher. Zu den Düsen wird die Luft oder der Sauerstoff durch die Verbindungsrohre 5

<sup>1)</sup> Angew. Chem. 30, I, 17 [1917].

<sup>2)</sup> A. a. O.

<sup>3)</sup> Vgl. z. B. a. a. O.