

Über die Beziehungen zwischen der Ventilation und dem Kohlensäuregehalt der Luft geschlossener Räume.

Von Reinhold Hübner ¹⁾.

Aus dem physiologischen Institut zu Erlangen.

Nach dem Vorschlage von v. Pettenkofer gilt in der praktischen Hygiene der Kohlensäuregehalt der Luft als Maßstab für ihre Verunreinigung. Kohlensäurebestimmungen bilden daher die wichtigste Grundlage für die hygienische Beurteilung der Luft.

In der Luft im Freien ist der CO_2 -gehalt ein ziemlich konstanter, so verschieden und wechselnd auch die Quellen für die CO_2 sein mögen. Er beträgt nach den Angaben von Renk ²⁾ auf freiem Felde rund 0,3 Volumpromille, während die Luft der Städte durchschnittlich um 0,067 ‰ CO_2 -reicher ist.

1) Vorliegende Arbeit ist die nachgelassene Inauguraldissertation des im Juli 1894 in Erlangen verstorbenen approbierten Arztes Reinhold Hübner aus Oberläutersdorf, Sächs. Oberlausitz.

Der Verfasser hatte zu Beginn vorigen Jahres das medizinische Staatsexamen bestanden und war im Begriff, auf Grund einer im hiesigen physiologischen Institut ausgeführten Experimentaluntersuchung zu promovieren. Zwei Tage vor dem Termin des Rigorosums verunglückte er beim Baden in der Regnitz.

Da R. Hübner seine Dissertation der physikalisch-medizinischen Societät vorzulegen beabsichtigte, so hat die Gesellschaft gern Anlaß genommen, die Arbeit des Verstorbenen in ihren Berichten zu publizieren.

Die Durchsicht des Manuskriptes und die Korrektur der Druckbogen hat Herr O. Schulz übernommen. An dem Text ist wenig geändert worden; dagegen sind die dem Manuskript beigegebenen sehr umfangreichen Tabellen, welche die analytischen Daten sämtlicher Versuche enthalten, ganz fortgeblieben.

2) Fr. Renk, Luft. v. Ziemssen's und v. Pettenkofer's Handb. d. Hygiene I, 2, 2. Hälfte, S. 28.

Nach Uffelmann ¹⁾ schwanken die Angaben über den CO₂-gehalt bei den verschiedenen Autoren zwischen 0,266 ‰ und 0,415 ‰. Uffelmann erklärt diese Differenz allein aus dem Umstande, dass nicht immer gleiche Methoden zur Untersuchung angewandt wurden, und dass die meisten derselben Fehlerquellen haben, welche erst durch lange, ausdauernde Übung auf ein bestimmtes, niederes Maß einzuschränken sind.

Uffelmann ²⁾ selbst fand bei seinen Untersuchungen den CO₂-gehalt in „völlig freier“ Luft im Durchschnitt zu 0,318 ‰, das Minimum war 0,279 ‰, das Maximum 0,366 ‰. Er fand ferner die Luft auf dem Hofe der Universität Rostock 0,033 ‰ reicher an CO₂ als die auf freiem Felde.

Nach Blochmann ³⁾ beträgt der Unterschied im CO₂-gehalt zwischen der Luft im Freien und der in Städten 0,02–0,03 ‰.

Anders verhält es sich mit dem CO₂-gehalte der Luft geschlossener Räume. Dieser unterliegt sehr großen Schwankungen, die von den verschiedensten Faktoren abhängig sein können, von denen aber in hygienischer Beziehung ohne Zweifel zwei die wichtigsten sind: die Zunahme der CO₂ durch die Anwesenheit von Menschen und durch das Brennen von Leucht- oder Heizflammen.

Wie der CO₂-gehalt der Luft durch die Anwesenheit von Menschen in einem bestimmten Raume verändert wird, darüber liegen sehr zahlreiche Untersuchungen vor.

Bahring ⁴⁾ fand in den Klassen des Gymnasiums zu Celle die CO₂ zu 20—50 : 10000, v. Pettenkofer ⁵⁾ in dem von 70 Schülerinnen besetzten, 10000 Kubikfuß enthaltenden Zimmer einer Münchner Schule die CO₂ nach zweistündigem Unterricht zu 72 : 10000, Breiting ⁶⁾ in Basel

vor dem Unterricht	22,1 : 10000
vor der großen Pause	68,7 : 10000
nach der großen Pause	62,3 : 10000
nach dem Morgenunterricht	81,1 : 10000

1) Uffelmann, Arch. f. Hygiene Bd. VIII, S. 281.

2) Uffelmann, Arch. für Hygiene Bd. VIII, S. 283.

3) Blochmann, Liebig's Annalen Bd. 237.

4) Bahring, nach Varrentrapp, Vierteljahrsschr. f. öff. Gesdhtspf. Bd. I, S. 482.

5) v. Pettenkofer, Pappenheim's Monatschr. 1872, II.

6) Breiting, Vierteljahrsschr. f. öff. Gesdhtspf. 1870, 1.

vor dem Nachmittagsunterricht	55,2 : 10000
nach dem Nachmittagsunterricht	93,6 : 10000
am Nachmittag im entleerten Zimmer	57,8 : 10000.

Uffelmann ¹⁾ fand in der Luft seines Schlafzimmers abends 0,421 ‰ CO₂, morgens, nachdem eine Person in demselben geschlafen, 0,723 ‰, nachdem drei Personen in demselben geschlafen, 1,122 ‰ und ein anderes Mal 1,096 ‰ CO₂.

Über die durch Brennen von Flammen bewirkte Zunahme der CO₂ der Luft in geschlossenen Räumen liegen nur spärliche Angaben vor.

Nach Zoch ²⁾ bewirkte ein 48 Minuten langes Brennen einer Gasflamme in einem bestimmten Raume bei dem Gasverbrauch von 4 Kubikfuß eine CO₂-zunahme, die doppelt soviel betrug wie der Normalgehalt der atmosphärischen Luft an CO₂; beim Brennen einer Petroleumlampe in demselben Raum war die CO₂-produktion beträchtlich geringer, die niedrigsten Zahlen für die CO₂ lieferte die Oelbeleuchtung.

Zu wesentlich anderen Resultaten kam Cramer ³⁾. Nach ihm ist die CO₂-produktion je nach dem verwendeten Material eine höchst ungleiche, beim Petroleum verhältnismäßig am höchsten, geringer bei Paraffin, Talg und Stearin und am niedrigsten beim Leuchtgas.

In welcher Weise die CO₂-produktion einer in einem bestimmten Raume brennenden Flamme von der Ventilation dieses Raumes abhängig ist, darüber hat meines Wissens nur Emmerich gearbeitet; leider war es mir nicht möglich, seine diesbezügliche Arbeit im Original einzusehen.

Die nachfolgende Untersuchung, die auf Anregung und unter Leitung des Herrn Dr. O. Schulz durchgeführt wurde, hat nun gleichfalls versucht, die Abhängigkeit der CO₂-produktion einer in einem bestimmten Raume brennenden Flamme von der Ventilation auf analytischem Wege zu ermitteln. Da die Größe der natürlichen Ventilation genau kaum festzustellen ist, so habe ich, um diese ganz auszuschließen, zu meinen Versuchen einen Kasten benutzt, dessen Wände für Luft undurchgängig waren.

1) Uffelmann, Arch. für Hygiene Bd. VIII, S. 334.

2) Branislav Zoch, Zeitschr. f. Biologie Bd. III, S. 122.

3) Ed. Cramer, Arch. f. Hygiene Bd. X, S. 315.

Die Versuche wurden nach folgender Methode ausgeführt.

Der bei den ersten 68 Versuchen benutzte Kasten, der auch früher schon im hiesigen physiologischen Institute wiederholt ähnlichen Zwecken gedient hat, ist 85 cm lang, 21 cm breit und 35 cm hoch, hat also einen Inhalt von 62,5 l. Er ruht beweglich auf einem durch Schrauben luftdicht anzupressenden Boden. Das Gerippe des Kastens besteht aus Messingguss, die Schmalseiten ebenfalls, Langseiten und Decke aus Glasscheiben, die luftdicht in den Metallrahmen eingekittet sind. Der Ventilationsstrom trat am untern Ende der einen Schmalseite durch einen Rohransatz ein und wurde durch einen in die gegenüberliegende Wand nahe ihrem obern Rande eingesetzten Schlauchstutzen abgeleitet.

Bei den späteren Versuchen kam ein neuer Kasten in Anwendung, der für solche experimentelle Aufgaben geeigneter erschien. Dieser Kasten hat eine quadratische Grundfläche von 32 cm Seitenlänge und ist 40 cm hoch, hat also einen Rauminhalt von rund 41 l. Zwei seiner Wände bestehen aus Zinkblech, zwei aus Glasscheiben, die in Blechfalze eingekittet sind; seine Decke besteht ebenfalls aus Zinkblech. In die zwei Zinkblechwände sind je drei in der vertikalen Mittellinie der Wände liegende Rohrstutzen eingesetzt; die Decke trägt in ihrer Mitte gleichfalls einen Rohransatz. Die vier Wände sind an ihrer Basis von einem 2 cm breiten Zinkblechrande umgeben. Dieser Kasten ruht auf einem in seiner Mitte durchbohrten, starken Brett aus Eichenholz und kann mittelst Schrauben und eines eisernen Rahmens luftdicht an das Brett angedrückt werden.

Als CO₂-quelle diente in den ersten fünf Versuchen die Flamme einer Nachtkerze. Es zeigte sich jedoch sehr bald, dass solche Kerzen für meine Zwecke vollständig ungeeignet waren, einmal, weil ihre Flamme sehr niedrig und lichtschwach brannte und durch jede geringe Erschütterung oder plötzliche Verstärkung der Ventilation zum Verlöschen gebracht wurde, dann aber besonders, weil die Flamme keine gleichmäßige war und blieb, sondern, ohne dass eine Ursache hiefür wahrzunehmen gewesen wäre, bald höher, bald niedriger brannte.

In einer zweiten Versuchsreihe, Versuch 6—35 umfassend, arbeitete ich mit der von v. Hefner-Alteneck konstruierten Amylacetatlampe. Diese bewährte sich eine Zeit lang sehr gut, musste aber späterhin aufgegeben werden, weil die Schraubenvor-

richtung nicht funktionierte und so eine genaue Einstellung der Flamme unmöglich war.

Bei sämtlichen folgenden Versuchen wurde ein Gasbrenner benützt, der, ähnlich einer mikrochemischen Lanpe, eine schmale, aber hohe Flamme lieferte. Das dem Brenner zugeführte Leuchtgas wurde durch eine von S. Elster, Berlin, gelieferte, sehr genau funktionierende Gasuhr gemessen und in zwei Türmen, von denen der eine mit trockenen Binssteinstücken, der andere mit Chlorcalcium gefüllt war, getrocknet. Über die Schwierigkeiten, die sich bei der Benutzung des Gaslichtes herausstellten, will ich an einer anderen Stelle sprechen.

Aus dem oben beschriebenen Kasten gelangte die Luft durch eine Rohrleitung zu einem Erlenmeyer'schen Kolben, in welchem mittelst eines T-Rohres eine Teilung des Gesamtluftstromes stattfand. Der größere Teil desselben wurde, um gemessen zu werden, durch eine Gasuhr geleitet und gelangte von da zu einem Erlenmeyer'schen Kolben, der seinerseits direkt mit einer Körtling'schen Wasserstrahlpumpe in Verbindung stand.

Der kleinere Teil des Luftstromes wurde durch zwei Erlenmeyer'sche Kolben, die mit einer Lösung von Baryumhydroxyd bis etwa zur Hälfte gefüllt waren, und von da durch zwei mit derselben Flüssigkeit gefüllte Pettenkofer'sche Röhren geleitet. Sodann passierte die Luft eine ebenfalls mit Barytwasser gefüllte und zur Kontrolle dienende sogenannte Indikatorflasche und trat schließlich in einen 24—25 l fassenden, auf hoher Wandkonsole ruhenden Ballon, welcher als Heberflasche diente. Zwischen Indikator- und Heberflasche war ein Hg-Manometer eingeschaltet zur Messung des Druckes der von der Heberflasche aspirierten Luft.

Zu Beginn eines jeden Versuches wurden Wasserpumpe und Heberflasche in Gang gesetzt. Aus letzterer lief das Wasser in eine kalibrierte Flasche, und der Versuch wurde so lange fortgeführt, bis die Flasche bis zu einer bestimmten Marke mit Wasser gefüllt war. Dies Volum war fast immer, wenigstens für eine größere Anzahl von Versuchen, eine konstante Grösse, die ich in den Tabellen mit V_h d. h. Heberventilation bezeichnet habe. Sowohl am Anfang wie am Ende jedes Versuches wurde der Stand der in den Hauptstrom der Ventilation eingeschalteten Gasuhr abgelesen; die Differenz bezeichnete die durch dieselbe geleitete Luft;

diese Größe habe ich mit V_p d. h. Pumpenventilation bezeichnet. Die aus dem Kasten abgesaugte Gesamtluft V_s setzt sich zusammen aus $V_h + V_p$.

Die analytische Bestimmung der CO_2 geschah nach der v. Pettenkofer'schen Methode. Die Luft des Teilstromes V_h passierte, wie schon erwähnt, 2 Erlenmeyer'sche Kolben und 2 Pettenkofer'sche Röhren, die zusammen mit 800 ccm Barytwasser gefüllt waren, und gab hierbei die CO_2 an das Baryumhydroxyd ab. Zum Beweise, dass wirklich sämtliche CO_2 von der Barytlösung absorbiert wurde, diente die hinter den Pettenkofer'schen Röhren eingeschaltete, ebenfalls mit Barytwasser gefüllte Indikatorflasche, welche am Ende eines jeden Versuches keine Trübung zeigen durfte. Die Absorptionsgefäße boten der Heberventilation einen so beträchtlichen Widerstand, dass am Ende eines jeden Versuches im Heberballon ein Unterdruck von 20—150 mm Hg herrschte. Die Größe des negativen Druckes war hauptsächlich von der Geschwindigkeit abhängig, mit der die Luft durch die Absorptionsgefäße geleitet wurde. Geschah dies z. B. sehr rasch, und waren die an den Pettenkofer'schen Röhren befindlichen Schraubenquetschhähne stark zugeschraubt, während die am Abflussrohr des Heberballons angebrachte Klemmschraube ganz entfernt war, so herrschte ein sehr hoher (ca. 150 mm Hg) Unterdruck. Die Druckerniedrigung wurde gleich nach Schluss jedes Versuches an dem hinter der Indikatorflasche eingeschalteten Hg-Manometer abgelesen.

Während der ersten Versuche war auch in die Pumpenventilation, d. i. in den durch die Gasuhr gehenden Strom V_p ein Hg-Manometer eingeschaltet zur Messung des Druckes in diesem Teilstrom. Hier war jedoch der Unterdruck so unbedeutend (meist nur 1 mm Hg) und dabei so konstant, dass er bei der Berechnung der Versuche keine Berücksichtigung gefunden hat.

Die Berechnung ist folgendermaßen ausgeführt worden.

Zunächst wurden die Werte von V_p und V_h auf 0° und 760 mm Hg-Druck reduziert. Als Temperatur der Ventilationsluft galt die Zimmertemperatur, als Druck von V_p der in dem auf hiesigem Marktplatze befindlichen Wetterhäuschen abgelesene und auf 0° reduzierte Barometerstand; als Druck von V_h dieser Barometerstand, vermindert um den am eingeschalteten Manometer abgelesenen Unterdruck. Die reduzierten Werte von V_p und V_h

sind in den Berechnungen mit V_p und V_b bezeichnet, $V_b + V_p$ mit V_s .

Da die CO_2 nur für das Volum der Heberventilation bestimmt wurde, so musste aus dem analytisch gefundenen CO_2 -gehalte von V_b , der CO_2 -gehalt von V_s , berechnet werden. Die Ausführung dieser Berechnung sei an den in Versuch 1 gefundenen Werten erläutert: $V_b = 19,28$ l, $V_p = 239,46$ l; hieraus folgt $V_s = 258,74$ l.

In 19,28 l sind auf Grund der titrimetrischen Analyse der Barytfällung 32 Centigr. CO_2 enthalten, in der Gesamtventilation mithin $32 \cdot \frac{258,74}{19,28} = 32 \cdot \frac{V_s}{V_b}$ Centigr. CO_2 .

Um die Gesamtkohlensäuremenge zu finden, muss man also den analytisch gefundenen Wert für die CO_2 der durch die Heberventilation abgesaugten Luft mit $\frac{V_s}{V_b}$ multiplicieren. Diesen

Bruch $\frac{V_s}{V}$ habe ich mit f (V) d. h. Ventilationsfaktor bezeichnet.

Die dem Versuchsraume zugeleitete Zimmerluft wurde nicht von CO_2 befreit; ihr CO_2 -Gehalt ist in der Voraussetzung, dass er keinen wesentlichen Schwankungen unterworfen sei, bei der Berechnung ganz unberücksichtigt geblieben.

Die von der Barytlösung absorbierte CO_2 wurde auf titrimetrischem Wege bestimmt. Um den aus der Veränderlichkeit der Oxalsäurelösungen möglicher Weise entspringenden Fehlern ganz zu entgehen, benutzte ich zur Titration verdünnte Schwefelsäure. Die Säure enthielt genau 22,2727 g H_2SO_4 im Liter; 1 ccm dieser Lösung entspricht 1 Centigr. CO_2 . Es wurden jedesmal 100 ccm Barytlösung titriert. Als Indikator verwendete ich $\frac{1}{2}\%$ alkoholische Rosolsäurelösung. Von dieser wurden jedesmal 12 Tropfen den zu titrierenden 100 ccm Barytwasser zugesetzt.

Für die Titration von Barytwasser, das zur Absorption von CO_2 gedient hat, gilt bekanntlich die Vorschrift, dass man den Niederschlag von Baryumkarbonat sich gut absetzen lassen und dann aus der klaren Flüssigkeit die für jede einzelne titrimetrische Bestimmung erforderliche Probe mit der Pipette entnehmen soll. Ich habe es aber vorgezogen, den Karbonatniederschlag durch Filtrieren abzutrennen, nachdem ich die Erfahrung gemacht hatte, dass eine nachweisbare Abschwächung des Barytwassers bei sorgsamer Filtration nicht eintritt. Das Filter muss

nur gut bedeckt gehalten werden; der Trichter sei so groß, dass häufiges Nachgießen nicht notwendig ist, und das Trichterrohr so lang, dass es den Boden des Kolbens, in welchen man filtriert, fast berührt. Die Einwirkung der CO_2 der Zimmerluft ist alsdann ohne Belang.

Zur Erläuterung der weiteren Berechnung möge die Fortsetzung der Ausrechnung von Versuch 1 dienen. Hier betrug

der Anfangstiter für 100 ccm Barytwasser	34,3,
„ Endtiter „ „ „ „	30,3,
die Titerdifferenz (mit d bezeichnet)	4,0,
die Gesamttiterdifferenz (= D) für 800 ccm	$8 \cdot 4 = 32$ ccm

Schwefelsäure.

Der Ventilationsfaktor ist 13,42; folglich ist die Gesamtkohlensäuremenge

$$32 \cdot 13,42 \text{ Centigr.} = 4,2944 \text{ g.}$$

Hieraus wurde der Prozentgehalt der Ventilationsluft an CO_2 auf folgende Weise ermittelt:

1 l CO_2 wiegt bei 0° und 760 mm Hg-Druck 1,96664 g,

1 g CO_2 entspricht also $\frac{1}{1,96664}$ l CO_2 ,

4,2944 g CO_2 entsprechen $\frac{4,2944}{1,96664} = 2,1837$ l CO_2 .

Diese 2,1837 l CO_2 waren enthalten in der gesamten Ventilationsluft, d. h. in 258,74 l Luft. Hieraus ergibt sich also, wenn x den Prozentgehalt der Ventilationsluft an CO_2 bezeichnet, die Gleichung:

$2,1837 : 258,74 = x : 100$, folglich

$$x = \frac{2,1837 \cdot 100}{258,74} = 0,84396 \text{ } \% \text{ } \text{CO}_2.$$

An dieser Stelle möchte ich noch mit einigen Worten einer Schwierigkeit gedenken, welche sich bei der Anwendung des Gaslichtes herausstellte. Diese Schwierigkeit bestand in den außerordentlich großen Schwankungen des Gasverbrauchs. Ohne dass irgend eine Änderung an der Stellung der Gashähne vorgenommen und ohne dass eine Änderung an der Grösse der Flamme wahrnehmbar wurde, betrug der Unterschied im Gasverbrauch, auf eine Minute berechnet, bis zu 40 ccm Gas bei einem mittleren Verbrauch von 160 ccm. Es wurde zunächst untersucht, ob die Schwankungen vielleicht durch eine Flamme von bestimmter

Größe hervorgerufen würden, und zur Entscheidung darüber wurden die verschiedensten Flammen, von den kleinsten bis zu den größten, durchprobiert, doch bei keiner schwand die Unregelmäßigkeit. Um diese endgültig zu beseitigen, schaltete ich dann einen Moitessier'schen Gasdruckregulator mit Glycerinfüllung zwischen Gashahn und Elster'scher Uhr ein. Die Schwankungen wurden hierdurch beträchtlich geringer, sie betragen im Durchschnitt etwa nur noch 5 ccm in der Minute, ganz verschwunden sind sie aber niemals.

Cramer¹⁾ machte bei seinen Versuchen ganz dieselbe Erfahrung; auch ihm gelang es nicht, nach Einschaltung des Moitessier'schen Druckregulators die Schwankungen im Gasverbrauch ganz zu vermeiden, gewisse Ungleichheiten bestanden fort, die jedoch im Vergleich zu den früher beobachteten unbedeutend waren. Cramer erklärt dieses Verhalten aus dem Wechsel des Gasdruckes in den Zuleitungsröhren aus der Gasanstalt. Nach den Beobachtungen, die ich im Laufe dieser Arbeit gemacht habe, reicht diese Erklärung allein nicht aus. Der Gasdruck schwankt in Erlangen zwischen 18—35 mm Wasser. Ich habe wiederholt den Gasdruck in der Rohrleitung während mehrerer Stunden verfolgt und von Zeit zu Zeit an der Gasuhr die verbrauchte Gasmenge abgelesen und habe auch dann noch nicht ganz unbedeutliche Schwankungen im Gasverbrauch gefunden, wenn ein Schwanken des Gasdruckes am Wassermanometer nicht wahrnehmbar war.

Die fünf ersten, mit Nachtkerzen angestellten Versuche können aus den oben angeführten Gründen nur als Vorarbeit betrachtet werden; irgend welche Schlüsse lassen sich aus ihnen nicht ziehen.

Für die weiteren Versuche war zunächst die Entscheidung der Frage von größter Wichtigkeit, nach wie langer Zeit die Zusammensetzung der aus dem Kasten abgesaugten Luft eine gleichmäßige würde. Bei Beginn eines jeden Versuches ist die Zusammensetzung der abgesaugten Luft derjenigen der Zimmerluft gleich. Allmählich beginnt ihr CO_2 -gehalt zu steigen und erreicht nach einer bestimmten Zeit ein Maximum. Ist dieses Maximum einmal erreicht, dann tritt ein Gleichgewichtszustand

1) Ed. Cramer, Arch. f. Hygiene Bd. X, S. 307.

ein, es wird nunmehr von der Flamme in der Zeiteinheit ebenso viel CO_2 gebildet, als durch die Ventilationsluft weggeführt wird. Bei der ersten Reihe der diesbezüglichen Versuche wurde als CO_2 -quelle die Flamme der Amylacetatlampe benützt, im zweiten Teil eine Gasflamme.

Um die gefundenen Resultate übersichtlich zu machen, stelle ich die zur Lösung dieser Frage angestellten Versuche in der folgenden Tabelle I zusammen.

Die Ausführung dieser Versuche war derart, dass in den unter 1—8 aufgeführten eine Stunde lang allein durch die Pumpenventilation ventiliert und dann erst die Heberventilation in Gang gesetzt wurde. Gleichzeitig mit dem Ingangsetzen der Heberventilation, also in dem Augenblick, wo die CO_2 -absorption in den Barytgefäßen begann, wurde, damit die Größe der Gesamtventilation sich nicht änderte, die Pumpenventilation um soviel erniedrigt, als die Heberventilation betrug; das war bei diesen Versuchen ungefähr 25 l. Bestimmt wurde also die von der Flamme während der zweiten Brennstunde gelieferte CO_2 .

In den unter 9—22 in der Tabelle I aufgeführten Versuchen, bei denen es mir darauf ankam, mehrere CO_2 -bestimmungen rasch an einander anzuschließen, blieb die Pumpenventilation 4 bis 8 Stunden in Gang, in der ersten Stunde immer allein, in den folgenden Stunden für die Dauer der messenden Versuche zusammen mit der Heberventilation. Während die Wasserstrahlpumpe die Ventilation besorgte, bereitete ich die Kette von Apparaten für die CO_2 -bestimmung so vor, dass ich im gegebenen Augenblick nur einen Quetschhahn zu lösen brauchte, um die Heberventilation im Gang zu setzen. War V_h etwa eine Stunde im Gang gewesen, so brach ich den messenden Versuch durch Anlegung des Quetschhahns ab, entleerte rasch die Erlenmeyer'schen Kolben und Pettenkofer'schen Röhren, füllte sie wieder mit frischer Barytlösung und schloss nun so bald als möglich einen zweiten messenden Versuch an. Die vier Versuche 19—22 habe ich in dieser Weise innerhalb 8 Stunden ausgeführt. Wie aus dem Obengesagten schon hervorgeht, habe ich jedesmal beim Freigeben der Heberventilation die Pumpenventilation entsprechend abgeschwächt und umgekehrt beim Abschließen der Heberventilation, also in den Pausen zwischen den auf einander folgenden messenden Versuchen, die Pumpenventilation wieder auf ihre ursprüngliche Größe ein-

Tabelle I.

No. der Reihe	Fortl. No.	CO ₂ -Quelle	Ventilation in der Stunde	% CO ₂ in der Ventilationsluft	Beginn der Vp.	Zeit der Einschaltung d. V.h.	Dauer der Versuche	Bemerkungen
1	18	Amylacetatlampe	166,5 l	2,4677	4 U. 22 M.	5 U. 22 M.	66. Min. 2. Brennstunde	
2	20	"	161,8 "	2,5028	4 " 7 "	5 " 7 "	66 Min. 2. Brennstunde	
3	22	"	171,7 "	2,4863	7 " 27 "	8 " 27 "	66 Min. 2. Brennstunde	
4	23	"	170,1 "	2,425	3 " 17 "	4 " 17 "	62 Min. 2. Brennstunde	
5	26	"	165,8 "	2,5056	10 " 45 "	11 " 45 "	61 Min. 2. Brennstunde	
6	27	"	170,4 "	2,508	5 " 48 "	6 " 58 "	66 Min. 2. Brennstunde	
7	29	"	172,9 "	2,5073	2 " 45 "	3 " 45 "	78 Min. 2. u. 3. Brennst.	
8	31	"	178,5 "	2,4409	9 " 50 "	10 " 50 "	60 Min. 2. Brennstunde	
9	20	"	161,8 "	2,5028	4 " 7 "	5 " 7 "	66 Min. 2. Brennstunde	Vers. 9 u. 10 zusammenhängend
10	21	"	170,95 "	2,4848	6 " 13 "	6 " 39 "	66 Min. 3. u. 4. Brennst.	
11	24	"	170,7 "	2,538	3 " 36 "	5 " 36 "	65 Min. 3. Brennstunde	
12	25	"	173,9 "	2,462	6 " 41 "	7 " 7 "	60 Min. 4. u. 5. Brennst.	Vers. 11 u. 12 zusammenhängend
13	32	"	171,6 "	2,5632	3 " 21 "	4 " 21 "	65 Min. 2. Brennstunde	
14	38	"	172,9 "	2,5892	5 " 26 "	7 " 21 "	67 Min. 4. Brennstunde	
15	34	"	159,9 "	2,5778	7 " 6 "	8 " 6 "	65 Min. 2. Brennstunde	Vers. 13 u. 14 zusammenhängend
16	35	"	160,8 "	2,5736	9 " 11 "	11 " 5 "	82 Min. 5. Brennstunde	
17	41	Leuchtgas	185,2 "	3,544	10 " 7 "	1 " 33 "	61 Min. 4. Brennstunde	
18	42	"	178,7 "	3,584	2 " 34 "	2 " 55 "	73 Min. 6. Brennstunde	Vers. 15 u. 16 zusammenhängend
19	43	"	170,5 "	2,677	8 " 21 "	9 " 21 "	63 Min. 2. Brennstunde	
20	44	"	168,1 "	2,691	10 " 23 "	10 " 43 "	60 Min. 3.-4. Brennst.	Vers. 17 u. 18 zusammenhängend
21	45	"	172,3 "	2,686	11 " 43 "	12 " 2 "	63 Min. 5. Brennstunde	
22	46	"	169,4 "	2,659	1 " 4 "	2 " 57 "	58 Min. 7.-8. Brennst.	Vers. 19--22 zusammenhängend

gestellt, so dass der Brennraum immer gleichmäßig ventiliert blieb. Auf diese Weise gelang es, Ventilationsluft zur Untersuchung zu bringen, welche die von der Flamme während der zweiten bis achten Brennstunde gelieferte CO_2 enthielt.

In den Versuchen 1—8, die sämtlich in die zweite Stunde nach Entzündung der Flamme fallen, schwankte die Ventilation zwischen 161,8 l und 178,5 l in der Stunde, der Prozentgehalt der Ventilationsluft an CO_2 zwischen 2,425 und 2,508; die Differenz im CO_2 -gehalt beträgt 3,4 % des kleineren Wertes.

Von den Versuchen 9—22 müssen die mit der Flamme der Amylacetatlampe angestellten (9—16 umfassend) besonders betrachtet werden. In diesen betrug die niedrigste Ventilation 159,9, die höchste 173,9 l, und der CO_2 -gehalt der Ventilationsluft lag zwischen 2,452 % und 2,5736 %; die Differenz im CO_2 -gehalt beträgt 5 % des kleineren Wertes. Es besteht also kein wesentlicher Unterschied im CO_2 -gehalte der Ventilationsluft, mag der Versuch in die zweite oder in eine spätere Stunde nach Entzündung der Flamme fallen. Ebenso differieren diese Werte von den in Versuch 1—8 gefundenen so wenig, dass sie als übereinstimmend angesehen werden können. Ganz dasselbe Verhältnis zeigen die mit der Leuchtgasflamme angestellten Versuche. In Versuch 17 und 18 beträgt die Ventilation 185,2 l und 173,7 l, der Gehalt der Ventilationsluft an CO_2 3,544 % und 3,584 %; in den Versuchen 19—22, die bei etwas kleinerer Flamme ausgeführt wurden, liegt der CO_2 -gehalt zwischen 2,659 und 2,691 %, während die Ventilation zwischen 168,1 und 172,3 l schwankt. Es besteht also auch hier Uebereinstimmung im CO_2 -gehalte der Ventilationsluft, gleichgiltig, ob der Versuch in die zweite oder eine beliebig spätere Brennstunde fällt.

Das Resultat, das sich aus dieser Versuchsreihe folgern lässt, kann dahin zusammengefasst werden, dass nach Ablauf einer Stunde die Luft eines Raumes, in welchem eine Flamme von mittlerer Grösse brennt, bei stündlich dreimaliger Erneuerung der Luft ihr Maximum an CO_2 erreicht, und dass der CO_2 -gehalt in den späteren Stunden, sofern die Ventilation und die Zufuhr von Brennmaterial sich nicht ändern, innerhalb so geringer Grenzen schwankt, dass er als konstant betrachtet werden kann.

In einer zweiten Versuchsreihe stellte ich mir die Aufgabe, die Flammenhöhe zu messen, in der Meinung, dass sich vielleicht

zwischen dieser und dem CO_2 -gehalte der Ventilationsluft eine bestimmte Beziehung finden lassen würde. Zur Messung der Flammenhöhe wurde folgende Einrichtung getroffen. Ein etwa 15 cm langer und 3 cm breiter Spiegel wurde an seiner spiegelnden Fläche so mit Millimeterpapier überklebt, dass in seiner Mitte nur ein schmaler Spalt übrig blieb, eben groß genug, um noch eine gute Beobachtung des Flammenbildes zu gestatten. Auf das Millimeterpapier wurde eine Zahlenskala aufgetragen. Diesen Spiegel befestigte ich der Flamme direkt gegenüber an der Innenfläche der einen Langseite des Kastens. Um das Spiegelbild der Flamme genau beobachten zu können, legte ich auf die andere Langseite des Kastens in der Höhe der Flammenspitze einen Streifen schwarzer Pappe, in welchen ein Loch von kaum mehr als 1 mm Durchmesser eingeschnitten war. Von diesem Loch aus konnte ich über die Spitze der Flamme hin scharf nach deren Spiegelbild visieren und an der Papierskala die Flammenhöhe ablesen, ohne dass die Beobachtung durch parallaktische Fehler getrübt worden wäre.

Die 12 in dieser Richtung angestellten Versuche sind in Tabelle II, nach der Höhe der Flamme geordnet, zusammengestellt. Der CO_2 -gehalt der Ventilationsluft nimmt in ihnen augenscheinlich mit der größeren Flammenhöhe zu, ein Abhängigkeitsverhältnis beider von einander lässt sich wohl aus den beiden ersten Parallelreihen der Tabelle II herausfinden. Jedoch scheint mir vorläufig die durch wechselnden CO_2 -gehalt hervorgerufene Vergrößerung oder Verkleinerung eines Gasflämmchens noch zu minimal, um als ein Maß für den CO_2 -gehalt gelten zu können. Es ist möglich, dass es bei einer glücklicher gewählten Versuchsanordnung gelingt, das Verhalten eines Leuchtflämmchens als Kriterium für die Beurteilung des CO_2 -gehaltes der Zimmerluft zu benutzen.

Tabelle II.

No. der Reihe	Fortlf. No.	% CO ₂ der Ventilationsluft	Flammenhöhe	Ventilation
1	50	1,42	30—31 mm	169,7 l
2	47	1,399	30—31 "	164,7 "
3	48	2,226	32—33 "	170,6 "
4	49	2,063	32—33 "	172,1 "
5	46	2,659	33—35 "	169,4 "
6	44	2,691	34—35 "	168,1 "
7	43	2,677	35 "	170,5 "
8	45	2,686	34—36 "	172,3 "
9	38	2,708	35—38 "	173,9 "
10	41	3,544	43—44 "	185,2 "
11	42	3,584	43—45 "	173,7 "
12	40	3,915	45—47 "	178,3 "

Eine andere Reihe von Versuchen sollte ermitteln, ob bei gleicher Ventilationsstärke eine Veränderung im CO₂-gehalte der Ventilationsluft sich zeige, wenn diese an verschiedenen Stellen des Kastens abgesaugt würde. Zu diesem Zwecke habe ich, um die Luft aus der Nähe der Flamme abzusaugen, bei dem größeren Kasten eine 15 cm lange Glasröhre mittelst Gummistopfens in die Abzugsöffnung eingefügt. Bei dem neuen Kasten wurde die Luft abwechselnd durch den obersten und den untersten Rohrstopfen abgesaugt, während sie durch das unterste oder das oberste Loch eintrat, so dass der Ventilationsstrom das eine Mal in der Richtung von unten nach oben, das andere Mal in der Richtung von oben nach unten durch den Kasten ging. Eine einfache Überlegung musste zu der Annahme führen, dass die Ventilationsluft dann reicher an CO₂ sein müsse, wenn sie näher der Flamme abgesaugt würde, ferner dass eine Zunahme der CO₂ in der Ventilationsluft sich geltend machen könne, wenn der Luftstrom in der Richtung von oben nach unten den Kasten passierte; falls nämlich die CO₂ ihrer Schwere folgend, sich am Boden des Kastens ansammelte, so musste sie leichter von dem absteigendem Ventilationsstrom mitgerissen werden. Durch die Untersuchungen, die von verschiedenen Forschern hierüber gemacht worden sind, wurde die Richtigkeit dieser Annahme sehr in Zweifel gestellt. Renk¹⁾ sagt:

1) Fr. Renk, Die Luft. v. Ziemssen's und v. Pettenkofer's Handb. d. Hygiene I, 2, 2. Hälfte, S. 31.

„Neuere Untersuchungen über die Verteilung der Kohlensäure machten jedoch noch auf einen anderen hierbei zu berücksichtigenden Faktor, die mechanischen Strömungen in der Luft, im Gegensatz zu den Diffusionsströmen der einzelnen Gase aufmerksam“. (Forster, Zeitschr. f. Biologie Bd. II, S. 392; Erismann, ebend. Bd. XII, S. 315; Forster und E. Voit, ebend. Bd. XIII, S. 1.)

Forster hatte allein und später mit E. Voit die Beobachtung gemacht, dass unter gewissen Umständen eine Ansammlung von Kohlensäure in den unteren Partien eines Raumes stattfinden könne, dann nämlich, wenn mechanische Strömungen, welche eine Mischung der verschiedenen Luftschichten verursachen könnten, fehlen. Die Erwärmung eines Raumes durch einen Ofen, ja selbst die Erwärmung, welche die Luft in Berührung mit dem menschlichen Körper erfährt, sowie das Umhergehen und Arbeiten von Menschen verursachten in jenen Versuchen Luftströmungen, die eine Mischung der Luft mit der künstlich entwickelten Kohlensäure herbeiführten. Erismann fand, dass, wenn CO_2 aus Chemikalien entwickelt und gleich temperiert mit der in seinem Versuchsraume enthaltenen Luft in diesen eingeleitet wurde, der größte Teil davon sich am Boden des Raumes lagerte, dass dagegen, wenn die CO_2 an der Einströmungsstelle erwärmt, oder wenn sie durch brennende Kerzen im Versuchsraume selbst erzeugt wurde, die Verteilung eine viel gleichmäßigere war als im ersten Falle. Es geht daraus hervor, dass für die Verbreitung der spezifisch schwereren Kohlensäure in der leichteren atmosphärischen Luft mechanische und besonders thermische Strömungen in höherem Grade in Betracht kommen als die Diffusion der Gase. „Hauptsächlich sind es die durch Temperaturdifferenz bedingten Strömungen in der Luft eines Raumes, welche zu einem raschen Ausgleich des CO_2 -gehaltes der Luft führen, gegen sie treten mechanische Bewegungen durch Ventilationsapparate und besonders die Diffusion bedeutend zurück.“

Budde¹⁾ kam bei seinen Versuchen zu ähnlichen Resultaten. Auch er konnte eine regelmäßige Abnahme des CO_2 -gehaltes vom Boden gegen die Decke hin nicht nachweisen. Im Gegenteil zeigte sich, dass, wie auch die Form der Ventilation und die Art der

1) Budde, Ueber die Ventilation bewohnter Räume, Zeitschr. f. Hygiene Bd. VIII, S. 520.

Heizung gewählt werden mochte, kohlenäurereichere Luftschichten mit kohlenäurärmeren in verschiedenen Höhen wechselten.

Vergleichen wir die Resultate der in Tabelle III angeführten Versuche mit einander, so lässt sich nirgends ein deutlicher Unterschied im CO₂-gehalte der Ventilationsluft herausfinden, mag die Luft aus der Nähe der Flamme abgesaugt worden sein, oder mag der Ventilationsstrom von oben nach unten oder von unten nach oben gerichtet gewesen sein. Die Erklärung für diesen Befund giebt das oben angeführte Citat aus dem Werke von Renk.

Tabelle III.

Nr. der Reihe	Fortl. Nr.	CO ₂ -gehalt der abgesaugten Luft	Ventilation in der Stunde	Nr. der Reihe	Fortl. Nr.	CO ₂ -gehalt der abgesaugten Luft	Ventilation in der Stunde
Glaskröhre eingefügt				ohne Glaskröhre			
1	53	1,408 ‰	175,2 l	1	65	1,4599 ‰	206,5 l
2	64	1,3195 ‰	175,9 ‰	2	58	1,295 ‰	222,1 ‰
3	62	1,134 ‰	179 ‰	3	56	1,2143 ‰	224,9 ‰
4	55	1,306 ‰	181,6 ‰	4	54	1,2285 ‰	225,15 ‰
5	57	1,4269 ‰	186 ‰	5	59	1,2778 ‰	232,6 ‰
				6	60	1,2726 ‰	233,3 ‰
Luft Eintritt: unterster Rohransatz Luft Austritt: oberster ‰				Luft Eintritt: oberster Rohransatz Luft Austritt: unterster ‰			
1	81	3,649 ‰	119 l	1	82	3,355 ‰	117 l
2	84	3,2159 ‰	119 ‰	2	83	3,1334 ‰	121,3 ‰
3	75	2,1873 ‰	129,9 ‰	3	76	2,295 ‰	132,3 ‰
4	87	2,996 ‰	174 ‰	4	88	2,9549 ‰	176 ‰
5	90	3,1415 ‰	174 ‰	5	89	2,959 ‰	195,3 ‰
6	80	2,2016 ‰	234 ‰	6	79	2,14 ‰	238,4 ‰
7	74	1,9289 ‰	262 ‰	7	72	2,0058 ‰	262,2 ‰
8	71	1,9557 ‰	265 ‰	8	73	1,998 ‰	264 ‰
9	77	2,0043 ‰	306,3 ‰	9	78	1,9512 ‰	307,4 ‰

Nachdem diese Fragen erledigt waren, wurde zur Bearbeitung des eigentlichen Themas, der Abhängigkeit des CO₂-gehaltes von der Ventilation, übergegangen. Um eine Grundlage für die Beurteilung dieser Abhängigkeit zu gewinnen, habe ich eine große Anzahl von Versuchen durchgeführt.

Bei denselben ist die Rechnung insofern erweitert worden, als aus dem analytisch gefundenen Wert für die bei jedem einzelnen Versuch erzeugte CO_2 die auf 1 l verbrannten Leuchtgasen entfallende CO_2 -menge berechnet wurde. Das verbrauchte Leuchtgasquantum wurde auf 0° und 760 mm Hg reduziert; eine Berücksichtigung des Gasdruckes hat dagegen nicht stattgefunden. Wie schon erwähnt, schwankt der Gasdruck in Erlangen zwischen 18—35 mm Wasser, die größte Differenz beträgt also ca. 20 mm Wasser oder ungefähr 1,5 mm Hg. Dieser Wert macht aber bei der Reduktion so wenig aus, dass man ihn, ohne dadurch einen irgendwie nennenswerten Fehler zu begehen, vernachlässigen kann.

Eine Analyse des Erlanger Leuchtgasen, die zur Beurteilung der in den Versuchen gefundenen Werte für die von 1 l Leuchtgas gelieferte CO_2 -menge herangezogen werden könnte, ist nicht gemacht worden. Als Anhaltspunkte dienten die von Fischer¹⁾ und Schilling²⁾ gemachten Angaben. Nach dem ersten Autor giebt 1 cbm Leuchtgas bei der Verbrennung 0,570 cbm CO_2 oder in g umgerechnet, liefert 1 l Leuchtgas 1,121 g CO_2 . Nach Schilling entwickeln 100 Vol. Leuchtgas 68,08 Vol. CO_2 , 1 l Leuchtgas also 0,681 l CO_2 oder 1,339 g CO_2 . Wie ersichtlich, besteht zwischen beiden Analysen eine grosse Differenz (ca. 19%), die sich aus der verschiedenen Zusammensetzung des Leuchtgasen an den verschiedenen Orten erklärt. Aber auch in einundderselben Stadt ist die Zusammensetzung des Leuchtgasen keineswegs konstant, da das aus den Retorten austretende Gasgemisch sich mit den unvermeidlichen Ungleichmäßigkeiten in der Beschaffenheit der Kohlen und in dem Gang der Verkokung ändert. Es war deshalb bei meinen Versuchen von vornherein anzunehmen, dass die auf 1 l verbrannten Leuchtgasen berechneten CO_2 -mengen keinen konstanten Wert ergeben, sondern eine in einer gewissen Breite hin und her schwankende GröÙe darstellen würden.

Die Ventilation hat bei meinen Versuchen zwischen 117—420 l in der Stunde gewechselt, d. h. die Luft in dem Kasten ist 3—10 mal stündlich erneuert worden.

Bei der schwächsten Ventilation, also bei einer Ventilation von 117 l in der Stunde betrug der Gehalt der abgesaugten Luft

1) Fischer, Chemische Technologie S. 963.

2) Schilling, Handbuch der Gasbeleuchtung S. 90.

an CO_2 rund 3,5 %. Das auffallendste hierbei war der außerordentlich niedrige Wert, der für die von 1 l Leuchtgas gelieferte CO_2 -menge gefunden wurde. Er war jedenfalls sowohl nach den von Fischer und Schilling angegebenen Werten, als auch nach den Resultaten der Versuche mit höherer Ventilation um ein beträchtliches zu klein. Diese Erscheinung ist folgendermaßen zu erklären. Nach Erismann¹⁾ ist in einer Leuchtflamme eine vollständige Verbrennung nur möglich bei Anwendung von gereinigtem Leuchtmaterial, bei möglichst gleichmäßiger Zufuhr desselben zur Flamme, bei genügender Erhitzung an der Stelle, wo die Verbrennung stattfindet, damit die Vergasung der Kohlenwasserstoffe vollständig vor sich gehe, — und endlich bei einer gewissen Größe der Luftzufuhr. Bei den hier beschriebenen Versuchen spielt neben der allerdings nur wenig ungleichmäßigen Zufuhr des Leuchtgases zur Flamme letzterer Faktor die Hauptrolle: eine Ventilation von 117 l Luft in der Stunde reicht zur vollständigen Verbrennung des der Flamme zugeführten Leuchtgases nicht aus. Welche Produkte sich bei einer solchen unvollständigen Verbrennung bilden, habe ich nicht näher untersucht. Um aber dafür, dass in der That die Verbrennung unvollkommen bleibe, einen sichern Beweis zu liefern, habe ich die Anwesenheit von CO in der Ventilationsluft konstatiert, und zwar auf folgende Weise. Ein aus drei aneinander geschmolzenen geräumigen Glaskugeln bestehender Apparat²⁾ wurde mit etwas Blut beschickt und in den Weg der Pumpenventilation eingelegt: enthielt die aus dem Kasten abgesaugte Luft Kohlenoxyd, so musste dies in dem Blute zurückbleiben. Es wurden in dieser Weise drei Versuche angestellt. Bei dem ersten ging der Pumpenstrom eine halbe Stunde durch etwa 25 ccm Blut, bei den beiden andern eine Stunde lang durch 5 ccm Blut. Die Ventilation betrug in den drei Versuchen 132, 150 und 159 l in der Stunde. Im ersten lieferte 1 l Leuchtgas 0,66411 g CO_2 , im zweiten 0,96935 g CO_2 und im dritten 0,9283 g CO_2 . Der Nachweis, dass sich in dem durchströmten Blute Kohlenoxydhämoglobin gebildet hatte, wurde durch das Spektroskop und die Natron-

1) Erismann, Zeitschr. f. Biologie Bd. XII, S. 320.

2) Der Apparat wird im hiesigen physiologischen Institute zur Demonstration der Farbenveränderungen, welche das Blut beim Durchleiten von CO , H_2S , CO_2 , O und anderen Gasen erleidet, benutzt.

probe erbracht. Für den ersten Versuch fiel dieser Nachweis negativ aus. Dagegen wurde für die beiden andern Kohlenoxyd mit Sicherheit konstatiert: das Blut zeigte im Spektrum zwischen D und E die bekannten, den Oxyhämoglobinstreifen naheliegenden Absorptionsstreifen, die nach Zusatz von Ammoniumsulfid auch bei längerer Beobachtung nicht schwanden; ebenso zeigten nach Zusatz von 20 %iger Natronlauge die Blutproben die für Kohlenoxydhämoglobin beweisende zinnoberrote Färbung.

Wie groß musste nun bei meinen Versuchen die Ventilation sein, damit sie zur vollständigen Verbrennung des Leuchtgases genügte? Offenbar genügte sie dann, wenn bei der Analyse der Ventilationsluft so viel CO_2 gefunden wurde, als von dem verbrannten Gase erzeugt werden konnte. Nach Fischer soll 1 l Leuchtgas 1,12 g CO_2 liefern. Einen fast ebenso großen Wert, nämlich 1,1317 g CO_2 , habe ich bei einer Ventilation von 174 l erhalten. Aus dieser Uebereinstimmung und mehr noch daraus, dass die CO_2 -werte für 1 l verbrannten Leuchtgases auch bei ganz beträchtlich stärkeren Ventilationen nicht wesentlich von 1,13 g differierten, war mit Sicherheit zu entnehmen, dass eine Ventilation von 174 l unter den gewählten Versuchsbedingungen eine vollständige Verbrennung herbeigeführt habe.

Bei den Versuchen mit unzureichender Luftzufuhr ließen sich an der Flamme einige interessante Beobachtungen machen. Es zeigte sich nämlich bei einer stündlichen Ventilation von 117—160 l die Flamme so vollkommen entleuchtet, dass es absolut unmöglich war, sie mit dem Auge wahrzunehmen. Man hätte glauben können, sie sei erloschen, wenn nicht die größere Wärme, die an den Blechwänden des Kastens zu fühlen war, sowie das Wiederaufleuchten der Flamme beim Abheben des Kastens das Gegenteil bewiesen hätten. Diese Beobachtungen stimmen mit den von Rosenthal¹⁾ gemachten vollkommen überein. Rosenthal hatte, um diese Erscheinung demonstrieren zu können, einen aus enger, runder Oeffnung austretenden Gasstrahl entzündet, der eine schmale, leuchtende Flamme von 3—4 cm Höhe lieferte. Diese umgab er mit einem zylindrischen Glimmerschlot von 3 cm Durchmesser und 8 cm Höhe. Der Schlot wurde unten abge-

1) J. Rosenthal, Zur Theorie der Flamme. Münch. med. Wochenschr. 1888, S. 155.

schlossen durch einen messingenen Teller, welche von kleinen, den Brenner konzentrisch umgebenden Löchern durchbohrt war. Durch diese Löcher trat die Zimmerluft zur Flamme und entwich mit den Verbrennungsprodukten oben aus dem Glimmerzylinder. Legte man auf die Mündung dieses Zylinders einen Deckel so auf, dass diese nicht vollkommen abgeschlossen wurde, so zuckte die Flamme auf und ruhte für eine ganz kurze Zeit, um dann scheinbar zu erlöschen; in Wirklichkeit brannte sie weiter, jedoch so vollkommen entleuchtet, dass sie nur bei tiefer Beschattung des Brenners eben noch zu sehen war. Rosenthal gibt für dieses Phänomen folgende Erklärung: „Wenn unsere Flamme in der gewöhnlichen Anordnung brennt, so strömt die atmosphärische Luft in Form eines zylindrischen Mantels an der in der Axe brennenden Flamme vorbei, und nur ein sehr geringer Teil des Sauerstoffes dieser Luft beteiligt sich an dem Verbrennungsvorgang. Die Mischung zwischen Luft und Gas ist eine unvollkommene und genügt nicht zur Erzeugung einer nicht leuchtenden Flamme. Wird aber die Luftströmung durch starke Verengerung der Abzugsöffnung sehr herabgesetzt, so breitet sich das aus der Brennöffnung ausströmende Gas seitwärts aus, diffundiert in die es umgebende, fast ruhende atmosphärische Luft hinein und mischt sich so vollkommen mit ihr, dass die Verbrennung sofort (ohne vorherige Ausscheidung glühend werdender Kohlenpartikelchen) zur Bildung der nicht leuchtenden Flamme führt.“

Bei den Versuchen, in denen wegen unzureichender Ventilation die Flamme vollständig entleuchtet war, hat der Gehalt der Ventilationsluft an CO_2 nur in einem Versuche 4% erreicht, in den übrigen hat er im Durchschnitt 3,5% betragen. Dieser Befund steht in Widerspruch zu einer Beobachtung von Emmerich¹⁾ oder geht wenigstens über dessen Beobachtung wesentlich hinaus. Emmerich gibt an, dass, wenn der CO_2 -gehalt der Luft auf 6% steigt, die Flamme „klein und entleuchtet“ wird, dass sie bei 8% CO_2 erlischt. Nach meinen Versuchen findet die Entleuchtung einer Flamme bei einem viel geringeren CO_2 -gehalte der Luft statt, nämlich bei 3,5%. Außerdem habe ich niemals beobachten können, dass vor der Entleuchtung die Flamme klein

1) Emmerich, Münch. med. Wochenschr. 1888, S. 412.

würde, ich habe im Gegenteil stets wahrnehmen können, dass die Flamme sehr lichtschwach, dabei aber gerade sehr groß wird.

Bei welchem CO_2 -gehalt der Luft eine Flamme erlischt, ist von mir nicht festgestellt worden.

Bei einer Ventilation von etwa 170 l stündlich und einem CO_2 -gehalte der Ventilationsluft von etwas mehr als 2,5% wird die Flamme wieder wahrnehmbar, sie brennt dann, wie erwähnt, sehr lichtschwach; nur ihre Spitze leuchtet, während der übrige Teil noch vollständig farblos ist. Dabei ist sie geradezu auffallend hoch, so dass sie beim Abheben des Kastens förmlich zusammenfällt.

Die Grenze, bei welcher die Flamme völlig normal erscheint, d. h. die gleiche Form und gleiche Helligkeit zeigt, wie wenn sie ausserhalb des Kastens brennt, dürfte nach meinen Beobachtungen bei einer Ventilation von 240 l in der Stunde und bei einem CO_2 -gehalte der Ventilationsluft von etwas über 2% liegen.

Diesen Angaben liegen die mit dem kleineren Kasten ausgeführten Versuche zu Grunde. Bei allen ist die Flamme dieselbe gewesen — sie hat ununterbrochen und unverändert, sowohl in den Pausen zwischen den einzelnen Versuchen wie während der Nacht, weiter gebrannt —, bei allen ist zu Beginn eine Stunde lang allein durch die Pumpenventilation ventiliert und dann erst die Heberventilation eingeschaltet worden, so dass also stets die während der zweiten Versuchsstunde erzeugte CO_2 bestimmt wurde.

Die Versuche, bei welchen die Flamme in dem größeren Kasten brannte, zeigen, wie aus der auf der nächsten Seite stehenden Tabelle IV, A zu ersehen ist, etwas andere Verhältnisse. Bei diesen Versuchen habe ich die von der Flamme während der ersten 30 bis 45 Minuten gelieferte CO_2 -menge bestimmt; ein Gleichgewichtszustand im CO_2 -gehalte der Ventilationsluft konnte dabei nach den früheren Beobachtungen noch nicht eintreten. Infolgedessen sind die von 1 l Leuchtgas gelieferten CO_2 -mengen in diesen Versuchen viel geringer als in jenen mit einer ein- oder mehrstündigen Vorperiode. Dass der Fortfall einer Vorperiode in der That der einzige Grund für diesen Befund ist, beweisen die wenigen Versuche, bei denen absichtlich nicht die Ventilationsluft der ersten Versuchsstunde, sondern die einer späteren auf ihren CO_2 -gehalt untersucht worden ist.

Tabelle IV, A.

Fortl. Nr.	Ventilation in der Stunde	CO ₂ geliefert von 1 l Leuchtgas
	l	g
52	158,1	0,52894
51	159,9	0,47643
47	164,7	0,73947
37	167,1	0,79042
50	169,7	0,7672
38	173,9	1,0312
53	175,2	0,56084
39	175,8	0,87962
64	175,9	0,57534
66	176,5	0,65816
62	179	0,60496
61	180	0,64704
53	181,6	0,6236
41	185,2	1,0766
57	186	0,68523
36	197,3	0,97448
68	198	0,62827
65	206	0,65183
58	221,1	0,83302
56	224,9	0,82252
54	225,2	0,71177
63	227	0,7697
59	232,6	0,9221
60	233,3	0,86372
67	257	0,75206

Bei diesen Versuchen, die ich in der Tabelle IV, B zusammengestellt habe, betrug bei einer Ventilation von 170 l die von 1 l Leuchtgas gelieferte CO₂-menge 1,1182—1,2276 g; sie kommt also den von Fischer angegebenen Werten vollkommen gleich.

Die Versuche, bei denen die Flamme in dem größeren Kasten brannte, lehren also, von welcher Bedeutung die Innehaltung einer Vorperiode bei derartigen Untersuchungen ist. Eine vergleichende Prüfung der Zahlen der Tabelle IV, A zeigt, dass,

Tabelle IV, B.

Fortl. Nr.	Ventilation in der Stunde	CO ₂ geliefert von 1 l Leuchtgas
	l	g
48	170,6	1,1972
45	172,3	1,19
49	172,1	1,1182
40	178,3	1,2276

wenn in der Ventilationsluft der ersten Versuchsstunde die CO₂ bestimmt wurde, die von 1 l Leuchtgas gelieferten CO₂-mengen so großen Schwankungen unterworfen waren, dass sich irgendwelche Beziehungen zwischen CO₂-gehalt und Ventilationsstärke nicht herausfinden lassen.

Die mit dem kleineren Kasten angestellten Versuche habe ich nach der Größe der Ventilation in der Tabelle V zusammengestellt. Der Gehalt der Ventilationsluft an CO₂ hat bei diesen Versuchen zwischen 4,002 % und 1,4531 %, die Ventilation zwischen 117 l und 421 l geschwankt, die Differenz im CO₂-gehalte beträgt also im Maximum rund 2,5 %, die in der Ventilation 300 l. Nähme der CO₂-gehalt der Ventilationsluft, wie man erwarten könnte, ganz gleichmäßig in demselben Maße zu, wie die Ventilation fällt, wäre also, um es kurz auszudrücken, der CO₂-gehalt umgekehrt proportional der Ventilationsstärke, so müsste bei einer Steigerung der Ventilation um 30 l eine Abnahme des CO₂-gehaltes um 0,25 % eintreten. Ein solches mathematisches Verhältnis lässt sich nun aus der Tabelle V nicht entnehmen. Ja, es unterliegt auch bei gleicher Ventilation der CO₂-gehalt der Ventilationsluft nicht unbedeutenden Schwankungen. Bei den Versuchen mit geringer Ventilation, bei welchen das Leuchtgas unvollständig verbrannte und jene Schwankungen außerordentlich hohe waren, wirkt dieser Umstand so störend, dass eine Beziehung zwischen CO₂-gehalt und Ventilationsstärke überhaupt nicht auffindbar ist. So finden wir in Versuch 76 bei einer Ventilation von 154 l stündlich die von 1 l Leuchtgas gelieferte CO₂-menge zu 0,6283 g und den CO₂-gehalt der Ventilationsluft zu 2,295 %, in Versuch 111 bei einer Ventilation von 150 l stündlich die von 1 l Leuchtgas gelieferte CO₂-menge

Tabelle V.

Fortl. Nr.	Ventilation in der Stunde	CO ₂ in der abge- saugten Luft	CO ₂ geliefert von 1 l Leuchtgas
	l	%	g
82	117	3,355	0,83073
81	119	3,649	0,93055
84	119	3,2159	0,76674
83	121,3	3,1334	0,76247
75	129,9	2,1873	0,56793
110	132,2	2,9513	0,66411
76	132,3	2,295	0,6283
111	150	4,002	0,96935
115	154,1	3,842	0,9674
85	155,5	3,13	0,99102
112	159	3,578	0,9283
113	159,7	3,781	0,9619
87	174	2,996	1,0165
90	174	3,1415	1,1317
88	176	2,9549	1,0195
114	179,1	3,805	1,148
89	195,3	2,959	1,187
79	238,4	2,1408	1,1267
80	234,6	2,2016	1,1753
70	261,5	2,0262	1,1893
74	262	1,9289	1,111
72	262,2	2,0058	1,1541
73	264	1,998	1,12
71	265	1,9557	1,1303
69	272,6	1,9086	1,166
78	307,4	1,9512	1,287
98	323,5	1,948	1,2594
109	323,7	1,9925	1,0963
103	346,3	1,7439	1,1014
107	352,8	1,9644	1,1509
108	361	1,9103	1,1855
104	365,9	1,7059	1,2194
106	375	2,0082	1,253
105	386	1,6558	1,2461
96	393,3	1,5938	1,1886
94	395	1,5785	1,1924
95	397,5	1,5266	1,192
97	400,4	1,4913	1,1825
99	403,5	1,4886	1,1575
101	404,3	1,4531	1,1126
100	421,4	1,524	1,218

zu 0,96935 g und den CO₂-gehalt der Ventilationsluft zu 4,002%. In den Versuchen dagegen, wo die Ventilation größer, und besonders wo für 1 l verbrannten Leuchtgases immer die gleiche CO₂-menge gefunden wurde, zeigt sich mit der Steigerung der Ventilation eine ganz gleichmäßige Abnahme im CO₂-gehalte der Ventilationsluft. Die Erklärung dafür, dass auch bei den Versuchen mit hoher Ventilation, wo die Verbrennung des Leuchtgases sicher eine vollständige war, die von 1 l Leuchtgas gelieferten CO₂-mengen noch gewisse Schwankungen aufweisen, — in unseren Versuchen zwischen 1,10 g und 1,29 g — ist zu suchen nicht sowohl in der wechselnden Zusammensetzung des Leuchtgases, als vielmehr in der ungleichmäßigen Gaszufuhr zum Brenner, welche auch während des messenden Versuches noch Schwankungen im CO₂-gehalt der Kastenluft herbeiführt.

Die praktische Nutzenanwendung, die sich aus vorliegender Arbeit ergibt, ist vor allem die, dass in Räumen, deren Luft sehr viel Kohlensäure enthält, und in denen die Ventilationsverhältnisse ungünstig sind, Leuchtgasflammen sich zur Beleuchtung nicht eignen, einmal weil sie sehr lichtschwach brennen, dann aber besonders wegen der Bildung von Kohlenoxyd und anderen schädlichen Produkten einer unvollkommenen Verbrennung. Als solche Räume kommen in Frage hauptsächlich Gährkeller und die Arbeitsräume von Presshefefabriken, in denen nach der Schätzung von Hirt¹⁾ wenigstens in der Höhe von 2—2¹/₂ Fuß über dem Boden die Luft bis zu 10 % CO₂ enthält, während zugleich die Ventilationsverhältnisse häufig die denkbar ungünstigsten sind.

1) Hirt, Die Gasinhalationskrankheiten und die gewerbl. Vergiftungen. Handb. d. Hygiene von v. Ziemssen u. v. Pettenkofer Bd. II, 4. S. 51.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Sitzungsberichte der Physikalisch-Medizinischen Sozietät zu Erlangen](#)

Jahr/Year: 1892-1894

Band/Volume: [26](#)

Autor(en)/Author(s): Hübner Reinhold

Artikel/Article: [Über die Beziehungen zwischen der Ventilation und dem Kohlensäuregehalt der Luft geschlossener Räume. 135-159](#)