

Zur Frage nach der Kohlensäurediffusion aus dem Blut beim Atmen.

Von I. Setschenow.

(Nach der zurückgebliebenen Handschrift).

Indem ich diejenige meiner Arbeiten, die in verschiedenen Zeitschriften zerstreut sind und es verdienen erhalten zu werden, behufs Herausgabe derselben nach meinem Tode, sammelte und ordnete, gewährte ich, dass ich in meiner Abhandlung «Die Kohlensäure des Blutes»¹⁾ die durch in derselben angeführte experimentelle Daten begründete Möglichkeit des Beweises, dass die Ausatmung der Kohlensäure aus dem Blut durch Diffusion allein, ohne irgend welche andere Einflüsse, vor sich gehen kann, ausser Acht gelassen hatte. Vorliegende Notiz soll diese Lücke ausfüllen.

Vor allem ist es notwendig die dieser Frage entsprechenden experimentellen Daten anzuführen. Dieselben resultiren aus Versuchen über die Absorption der Kohlensäure durch Serum, aufgelöstes Cruor (eine serumfreie Lösung von roten Blutkörperchen) und Hämoglobin von drei Blutarten (Hunde-, Kalbs- und Pferdeblut) und beziehen sich auf die Fähigkeit aller drei Bestandteile des Blutes, CO_2 zu absorbiren und chemisch zu binden. Diese Thatsachen sind durch eine grosse Anzahl von übereinstimmenden Versuchen bewiesen worden, doch genügt es hier, in diesem Auszug aus einer grösseren Arbeit, einige der handgreiflichsten Beispiele anzuführen.

In der untenstehenden Tabelle sind alle für unsern Zweck notwendigen Zahlenwerte angeführt. Die Volumina (V) der absorbirenden Flüssigkeit sowie diejenigen der Gase sind in Ccm. gegeben und die letzteren auf 0° und 1 M. Druck reducirt. P bedeutet den Druck, unter welchem die Absorption stattfand; t —die Temperatur des Versuchs; A—die totale Absorptionsgrösse Y—den Lösungscoefficienten; V_x —die mittelst desselben ausgerechnete, den verschiedenen Druckverhältnissen entsprechende Grösse der chemischen Absorption. Die sich ihrem Sinne nach unterscheidenden Versuche sind von einander durch dicke Striche getrennt.

¹⁾ Mémoires de l'acad. des Scienc. de St.-Pétersb. VII Série.T. XXVI, № 13.

N ^o	Benennung.	V	t	Pmm	A	Y	Vx
1	Pferdeblutserum normales.	45,62	15,2° C.	{ 676,41 790,13	40,560 45,678	0,99	10,02 10,00
2	Dasselbe Serum mit Wasser 1 : 1 verdünnt.	>	>	{ 676,51 793,92	35,637 40,991	>	5,09 5,14
3	Kalbsblutserum.	50,179	15°,2° C.	{ 507,16 682,70	40,848 49,604	0,99	15,66 15,69
4	Pferdeblutserum.	>	>	{ 39,92 519,76 734,50	12,827 41,217 51,842	>	10,85 15,40 15,36
5	Hundeblutserum.	45,21	>	{ 230,44 574,82 680,55	17,955 35,863 40,884	>	7,91 10,00 10,26
6	Pferdeblutcruur.	45,62	15,2° C.	{ 442,55 509,38 610,21	58,818 62,935 68,761	0,98	39,04 40,16 41,48
7	Dasselbe Cruor mit Wasser 1 : 1 verdünnt.	>	>	{ 534,40 610,39 752,34	44,030 48,021 54,848	>	20,14 20,73 21,22
8	Serumfreies Pferdeblutcruur.	50,179	15,2° C.	{ 344,01 444,65	67,796 75,228	0,98	50,67 53,09
9	Hundeblutcruur.	45,21	15,2° C.	{ 41,44 476,45 711,84	20,475 55,248 68,272	0,98	18,64 34,14 36,73
10	Dicker Bodensatz von Hämoglobinkristallen von honigähnlicher Consistenz.	53,15	16,8° C.	{ 321,61 362,99 419,36	73,340 76,120 82,227	0,95	57,10 57,79 61,06
11	Wasser.	50,179	37°—37,5 C.	{ 369,85 474,95	10,57 13,51	0,569 0,569	

Das Serum, welches Alkalien enthält und CO_2 chemisch bindet, löst diese zugleich auf, und die leichteste Methode, den Lösungscoefficienten zu bestimmen, besteht darin, dass man die totalen durch normales und durch mit dem gleichen Volum Wasser verdünntes Serum absorbierten CO_2 -Mengen mit einander vergleicht. In letzterem ist die Alkalienmenge um das Doppelte verringert, und es bindet daher zweimal weniger Kohlensäure. Wenn ausserdem der Lösungscoefficient des normalen Serums sich wenig von dem Lösungscoefficienten des Wassers derselben Temperatur unterscheidet, so stellt die Differenz zwischen den gleichen Druckverhältnissen entsprechenden totalen Absorptionsgrössen durch normales und verdünntes Serum die Grösse der chemischen Absorption des verdünnten Serums vor. Nach Abzug dieser Grösse von der totalen Absorptionsgrösse bleibt eine Zahl zurück, welche die Gesamtmenge des gelösten Gases ausdrückt; daraus lässt sich der gesuchte Coefficient schon leicht berechnen. In den zwei ersten Versuchen finden wir alle Angaben zu einer solchen Berechnung. In Versuch 1 hat normales Serum bei 676,41 mm. Druck 40,56 cc. CO_2 , und verdünntes (Vers. 2) bei 676,51 mm. 35,64 cc. CO_2 absorbiert. Die Differenz zwischen diesen CO_2 -Mengen zeigt die Grösse der chemischen Absorption durch das verdünnte Serum, nach Abzug derselben von 35,64, der totalen Absorptionsgrösse, erhält man $35,64 - 4,92 = 30,72$, eine Zahl, welche die in dem gegebenen Volum absorbierender Flüssigkeit (45,62 cc.) unter 676,51 mm. Druck gelöste CO_2 -Menge vorstellt. Daraus ergibt sich der gesuchte Lösungscoefficient, d. h. die Absorptionsgrösse auf 1 ccm. Flüssigkeit bei 1000 mm. Druck, wie folgt:

$$\frac{30,72 \times 1000}{45,62 \times 676,51} = 0,995. \text{ Auf dieselbe Weise wurde in Vers. 6 und 7 aus}$$

den gleichen Druckwerten (610,21 und 610,39) entsprechenden Gesamtgrössen, der Lösungscoefficient von CO_2 im Cruor (0,98) berechnet, und erwies sich, ebenso wie im Serum, sehr nahe dem Lösungscoefficienten in Wasser, da letzterer bei $15,2^\circ \text{C}$. ebenfalls ungefähr 1 ist. Mittels dieser Coefficienten sind in der Tabelle aus den totalen Absorptionsgrössen (unter A) die der Reihe von Druckwerten entsprechenden Grössen der chemischen Absorption (unter Vx) berechnet (über Vers. 11 mit Wasser wird weiter unten die Rede sein).

Vers. 1—5 zeigen den Verlauf der chemischen CO_2 -Absorption durch Serum in der Abhängigkeit vom Druck. In den ersten 3 Versuchen findet die Absorption bei $\frac{1}{2}$ Atmosphäre übersteigenden Spannungen des zu absorbierenden Gases statt, und die Grössen der chemischen Absorption bleiben hier mit der Steigerung des Druckes fast unverändert; in Vers. 4 und 5 dagegen stehen neben solchen Druckwerten relativ niedrige (230 und 40 mm.) und diesen letzteren entspricht eine bedeutende Abnahme der chemischen Absorption,—in Vers. 5 etwa auf $\frac{1}{4}$, in Vers. 4, wo der Druck bedeutend niedriger ist, schon auf $\frac{1}{3}$. Dies bedeutet, dass bei der Druckabnahme von 1 Atmosphäre bis $\frac{1}{3}$ Atm. die chemische Absorption sich nicht merklich ändert, von da an aber beginnt abzunehmen und zwar um so schneller, je niedriger der Druck wird, da bei 0_{mm} Spannung auch die chemische Absorption = 0 ist.

Vers. 8, 9 und 10 zeigen dasselbe für das Cruor (die aufgelösten Blutkörperchen) und für das Hämoglobin. Hier ist die Abhängigkeit der chemischen Absorption vom Druck noch schärfer ausgesprägt als beim Serum: in Vers. 9 entspricht der Druckerniedrigung von 700 mm. bis auf 40 eine Abnahme der Grösse der chemischen Absorption von $\frac{1}{2}$ und in Vers. 4, auf $\frac{1}{3}$. Auch bei mittleren Druckwerten bleibt die Absorption durch das Cruor und durch das Hämoglobin nicht unverändert, sondern nimmt überall mit der Druckerhöhung zu.

Für unseren Zweck ist noch Folgendes zu bemerken. Bekanntlich, ist das Hämoglobin dem Gewichte nach der Hauptbestandteil der roten Blutkörperchen, und haben meine Versuche ergeben, dass das Hämoglobin, unabhängig von den Alkalien, CO_2 chemisch absorbiert. Diese Absorption wiederholt, sowohl der Grösse als dem Charakter (d. h. der Abhängigkeit von dem Druck) nach, dasselbe, was das Cruor, d. h. die Auflösung der ganzen Blutkörperchen, giebt. Mit anderen Worten, die chemische Absorption der CO_2 durch die Blutkörperchen wird durch deren Hauptbestandteil—das Hämoglobin—bestimmt.

Am Ende der Tabelle ist ein an Wasser bei 37° — $37,5^\circ$ C., d. h. bei der Temperatur des Blutes der Warmblütler, angestellter Versuch angeführt und der dieser Temperatur entsprechende Lösungscoefficient, 0,569, gegeben. Wir haben oben gesehen, dass CO_2 durch beide Bestandteile des defibrinirten Blutes fast ebenso wie durch Wasser,—nur etwas schwächer,—aufgelöst wird; aus diesem Grunde muss der Lösungscoefficient der CO_2 im defibrinirten Blute demjenigen in Wasser fast gleichkommen. Denselben werden wir im Weiteren gleich 0,56 annehmen und nicht blos für das defibrinirte sondern auch für das normale Blut, da der durch Difibrinirung bewirkte Unterschied in der Zusammensetzung des Blutes nicht der Art ist, die Löslichkeit der Gase zu beeinflussen.

Zum Schluss noch eine Bemerkung. Beim Atmen kommt nicht defibrinirtes sondern normales Blut in Betracht; die oben beschriebenen Versuche wurden dagegen an anormalem, durch Gerinnung verändertem Blute angestellt. Folglich entsteht noch die Frage, ob die erhaltenen Resultate sich auf normales Blut übertragen lassen.

Gegen das Blutserum hat ein solcher Einwurf seinen Grund und ist bis jetzt noch nicht näher geprüft worden; deshalb werde ich bei der weiteren Untersuchung der physiologischen Frage zwei Fälle im Auge haben: 1) wenn die am Blutserum erhaltenen Resultate auf das Plasma übertragbar sind, d. h. wenn dieses, gleich dem Blutserum, CO_2 in Abhängigkeit von dem Druck chemisch bindet und 2) wenn eine solche Uebertragung nicht stattfinden kann, d. h. wenn das Plasma CO_2 chemisch unabhängig von dem Druck, oder richtiger in einer ebenso schwachen Abhängigkeit wie schwache Na_2CO_3 -Lösungen, absorbiert. Was nun die Möglichkeit anbetrifft, die Resultate, welche an den Blutkörperchen des durch Gerinnung veränderten Blutes erhalten wurden, auf diejenigen des normalen zu übertragen, so kann darüber kein Zweifel herrschen, und zwar aus folgendem Grunde: die chemische Absorption von CO_2 durch die Blutkörperchen des defibrinirten Blutes wird der Grösse und dem Charakter nach durch deren Hauptbestandteil, nämlich das Hämoglobin,

bestimmt; dieses aber erleidet, wie bekannt, bei der Blutgerinnung keine Veränderungen. Daher wird bei der Untersuchung der physiologischen Frage in beiden zu prüfenden Fällen angenommen werden, dass die Blutkörperchen des normalen Blutes die Fähigkeit besitzen, CO_2 in grosser Menge und bedeutender Abhängigkeit von dem Druck zu binden.

Ich trete nun an die Untersuchung unserer Frage für die folgenden, als normal geltenden Bedingungen des respiratorischen CO_2 -Umtauschs heran.

Ein erwachsener Mann, der im Ruhezustande 15 Mal in der Minute je ein Vol. Lungenluft mit 4% CO_2 ausatmet, scheidet in 24 Stunden aus dem Körper bis 900 gr. CO_2 aus. Diesen Verhältnissen entspricht durchschnittlich die Ausscheidung von 20 cc. CO_2 aus den Lungen mit jedem Atemzug oder 300 cc. in 1', beim stationären 5%-igen CO_2 -Gehalt der Alveolenluft, entsprechend einer CO_2 -Spannung von 38 mm. Quecksilber. Andererseits wird auf Grund des normalen Kohlensäuregehalts im venösen Blut anerkannt, dass die Sättigung dieses letzteren in den Geweben mit Kohlensäure unter einer CO_2 -Spannung von 50 mm. Quecks. stattfindet, wobei das Blut bei jedem Umlauf die ganze aufgenommene CO_2 -Menge an die Lungenluft abgibt. Folglich scheiden sich aus dem Blute in die Lungenluft gleichfalls 300 ccm. CO_2 in 1' aus, und durchaus nicht weniger, da andernfalls CO_2 -Anhäufung im Blute stattfinden würde.

Wollen wir nun sehen, auf welche Weise das Blut unter dieser Bedingung mit seiner Aufgabe fertig wird.

Betrachten wir zuerst die CO_2 -Ausscheidung aus dem Blute in die Lungenluft für den Fall, wenn beide Bestandteile des Blutes, das Plasma und die Blutkörperchen, CO_2 in Abhängigkeit vom Druck chemisch binden.

Die Bedingungen zum Austritt aus dem Blute der in demselben aufgelösten Kohlensäure sind offenbar vorhanden (das Blut fliesst von den Stellen grösserer CO_2 -Spannung nach der Stelle geringerer hin); es fragt sich aber, ob die Menge derselben genügt um die 300 cc. in 1' zu decken. Das ist leicht zu berechnen ¹⁾. Wenn der Körper eines erwachsenen Mannes 5 Liter Blut enthält, und die ganze Blutmasse den Körper (folglich auch die Lungen-capillaren) zweimal in 1' durchläuft, so löst sich die Frage folgendermaassen. Es lässt sich berechnen, wie viel Kohlensäure bei 50 mm. Quecksil. und 37°—37,5° C. in 10000 ccm. Blut, und wie viel in denselben 10000 ccm. bei gleicher Temperatur, aber geringerem Druck, nämlich 38 mm., (da gerade diese CO_2 -Menge nach der Ausscheidung des Gases in die Lunge im Blute zurückbleibt) sich auflöst. Der Lösungscoefficient der Kohlensäure im Blut (0,56) ist uns bekannt, folglich finden wir

$$\text{bei 50 mm. Druck. } 10000 \times 0,56 \times \frac{50}{1000} = 280$$

$$\text{» 38 » » } 10000 \times 0,56 \times \frac{38}{1000} = 212,8$$

¹⁾ Zu grösserer Sicherheit des Schlusses sind absichtlich etwas grössere Zahlenwerte genommen worden.

Die Differenz $280 - 212,8 = 67$ stellt den im Blute aufgelösten und in 1' aus dem Blute in die Lunge übergegangenen Teil des Gases vor.

Woher kommen nun die fehlenden 233 ccm.?

Dieses Deficit kann offenbar nur durch die vom Blute schwach-chemisch gebundene CO_2 gedeckt werden, soweit eine dazu genügende CO_2 -Menge aus dem ganzen Vorrat derselben, der Spannungserniedrigung von 50 mm. auf 38 mm. entsprechend, sich ausscheiden kann.

Um diese Frage zu entscheiden, führe ich zwei an frischem defibrinirtem Hundeblut angestellte Versuche an.

N ^o	V	t	P	A	Y	Chemische Absorption auf 100 Blut.
12	50,179	37°—37,5° C.	48,58	16,456	0,56	30,07
13	>	>	30,15	11,630	0,56	21,50

Die Versuche zeigen, dass 100 ccm. Blut, bei dessen normaler Temperatur und circa 50 mm. Druck mit CO_2 gesättigt, beim Fallen des Drucks um 18 mm. 8,5 cc. Gas abzugeben vermögen; mit andern Worten, 100 Blut enthalten 8,5 ccm. CO_2 , welche mittels Diffusion in die Atmosphäre, mit einer um 18 mm. geringeren CO_2 -Spannung sich ausscheiden können.

Um aber den CO_2 -Mangel von 233 ccm. zu ersetzen, genügen schon (für eine Druckerniedrigung von 12 mm.), 2,5 ccm. aus dem Vorrat an schwach-gebundener Kohlensäure, weil 10000 ccm. dann 250 ccm. liefern würden; folglich ist der Ersatz des Mangels aus genannter Quelle sogar im Ueberfluss möglich, so dass das Blut, nachdem es das den Geweben Entlehnte den Lungen übergeben hat und zu den Geweben zurückgekehrt ist, vermag denselben aufs neue Gas zu entleihen, nicht nur im früheren sondern in erhöhtem Grade, da der diffusionsfähige Vorrat des chemisch-gebundenen Teils der CO_2 offenbar grösser als 2,5 auf 100 ccm. Blut ist.

Betrachten wir jetzt den anderen Fall, wo die CO_2 von den Blutkörperchen in Abhängigkeit vom Druck allein gebunden, vom Plasma aber gleich einer schwachen NaCO_3 -Lösung, d. h. beinahe unabhängig von dem Druck, zwischen 50—38 mm. dieses letzteren, absorbiert wird.

Unter solchen Bedingungen würden die mit CO_2 bis zur Verwandlung des Na_2CO_3 in Bicarbonat einmal gesättigten Plasmaalkalien unfähig werden sowohl der Lunge eine der Spannungsdifferenz 50—38 entsprechende, merkliche Gasmenge abzugeben, als die CO_2 den Geweben zu entnehmen; und die ganze Arbeit des Umtausches würde auf den in beiden Bestandteilen des Blutes aufgelösten Teil der CO_2 und auf den alleinig durch die Blutkörperchen chemisch-gebundenen Teil derselben fallen. Die Grösse des aufgelösten Teils, der in die Lungen überzugehen vermag, würde die frühere bleiben, nämlich 67 ccm., und die Deckung des Deficits auf die CO_2 der Blutkörperchen fallen. Die Blutkörperchen nehmen 0,4 des Blutvolums ein, und wenn sie auf gleiche Volumina ebensoviel CO_2 binden würden wie das Serum, so würde im normalen Blut mit inactivem Plasma auf ihren Teil ein bis auf 0,4 reducirter Vorrat an chemisch schwachgebundener CO_2 kommen.

Die Blutkörperchen binden aber bei circa 50 mm. Druck ungefähr anderthalbmal mehr CO_2 als das Serum; folglich würde auf ihren Teil, den Zahlenwerten der Vers. 12 und 13 gemäss, die Hälfte von 8,5 ccm., oder sogar etwas mehr, der bei der Druckdifferenz 50—38 mm. diffusionsfähigen Kohlensäure kommen. Es wären also die Blutkörperchen allein im Stande, das Deficit von 233 ccm. durch die Abgabe von 2,5 ccm. CO_2 auf 100 Blut zu decken; möglicherweise würden sie auch bei verstärkter Bildung von CO_2 in den Geweben (resp. verstärkter Abgabe dieses Gases aus dem Blute in die Lungen) mit dieser Arbeit fertig werden, da bei der Ausatmung von Kohlensäure aus dem Blute stets eine verstärkte Ventilation der Lunge (Verstärkung der Atembewegungen), d. h. Verminderung der CO_2 -Spannung in den Lungenalveolen unter 38 mm. zu Hilfe kommt.

Theoretisch wäre also der respiratorische CO_2 -Wechsel sogar in dem Falle möglich, wenn das Plasma unfähig wäre, CO_2 in Abhängigkeit von dem Druck zu binden ¹⁾.

Welche Bedeutung hätten dann aber die Alkalien des Blutplasma?

Das Plasma sowohl des Blutes als der Lymphe würde die wichtige Bedeutung einer Vorratskammer für die Alkalien haben, welche letztere die fast ununterbrochen im Körper sich entwickelnden und dem Organismus schädlichen Säuren, abgesehen von der Kohlensäure, zu neutralisieren und in Gestalt unschädlicher Salze aus dem Körper auszuschleiden vermögen. Dabei dürften die ins Blut gelangenden Säuren die Befreiung der chemisch-gebundenen CO_2 vermitteln und dadurch die verstärkte Ausscheidung derselben durch die Atmung bedingen; trotzdem wäre diese Thätigkeit keine respiratorische, da sie in keiner Verbindung mit der Atmung der Gewebe steht. Diese Nebenfunction behalten die Alkalien des Plasma offenbar auch dann, wenn dieses die CO_2 in Abhängigkeit vom Druck bindet.

Somit beweisen die angeführten Versuche,

dass die Kohlensäure aus dem Blute durch Diffusion ausgeatmet und die Möglichkeit dazu, abgesehen von der Auflösung des Gases, durch die schwache chemische Absorption desselben durch die beiden Hauptbestandteile des Blutes oder durch die Blutkörperchen allein gegeben wird.

¹⁾ Als einziges Argument gegen die Möglichkeit des respiratorischen CO_2 -Umtausches durch die alleinige Thätigkeit der Blutkörperchen würde die Thatsache dienen, dass sowohl der Mensch als die Tiere ungestraft grosse Blutverluste ertragen können; doch hängt diese Fähigkeit vielleicht davon ab, dass bei starken Blutverlusten die Kohlensäureentwicklung in den Geweben bedeutend abnimmt.