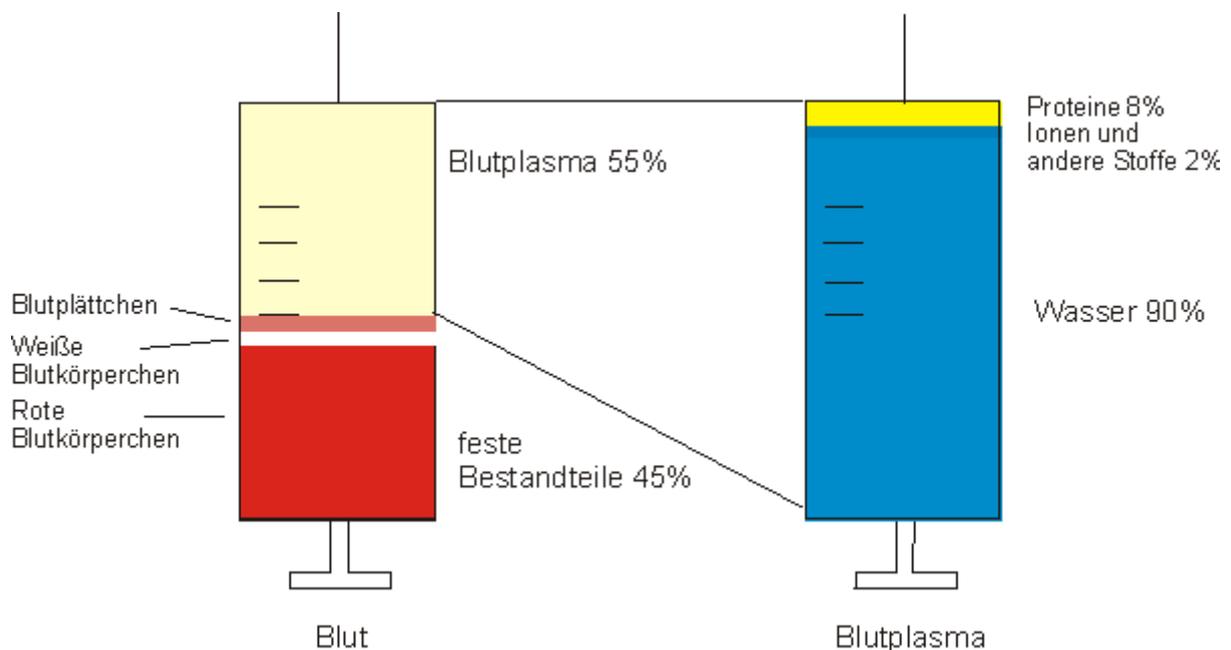


Zusammensetzung des Blutes

Das Blut der Wirbeltiere besteht zu 55% aus flüssigem Blutplasma und zu 45% aus darin schwimmenden festen Bestandteilen, den Blutkörperchen. Das Blutplasma ist eine wässrige Lösung aus Proteinen, Fetten, Glucose und Kochsalz. In schwankender Konzentration sind ebenfalls Stoffwechselprodukte wie Kohlenstoffdioxid, Harnstoff und Milchsäure gelöst. Die festen Bestandteile sind Weiße und Rote Blutkörperchen (Leucocyten bzw. Erythrocyten) sowie die Blutplättchen (Thrombocyten), Bruchstücke von Knochenmarksriesenzellen. Der Körper eines erwachsenen Menschen, auf den sich die folgenden Beschreibungen beziehen, besitzt 5-6 Liter Blut.



Ungefähre Zusammensetzung des Blutes und des Blutplasmas

Die häufigsten Bestandteile des Blutplasmas (Mittelwerte)

Wasser	90%
Proteine	8%
Fette und andere Lipide	0,5-0,8%
Glucose	0,1%
Kochsalz	0,6%

Für die Pufferwirkung im Blut zeichnet sich im Wesentlichen das Blutplasma verantwortlich. Das dort wirkende System wird in 3. Das Hydrogencarbonat-Puffersystem erklärt.

Funktion des konstanten pH-Wertes im Blut

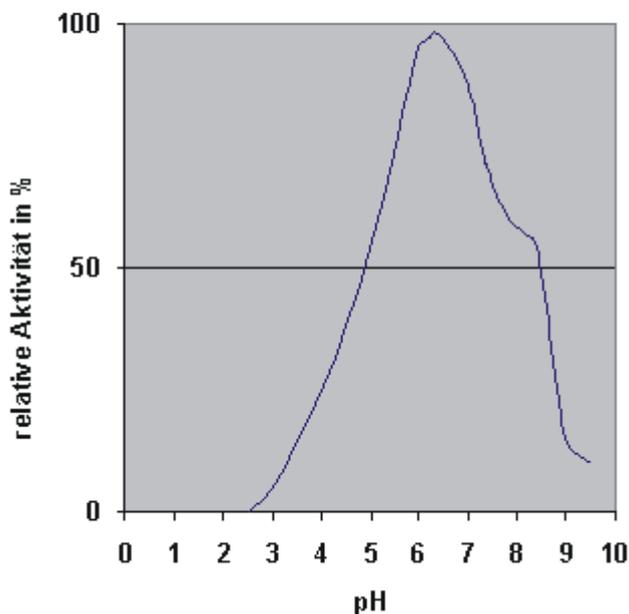
Die wechselnden Konzentrationen gelöster Stoffwechselprodukte, die als Säuren oder Basen wirken können (Milchsäure, Harnstoff, Kohlenstoffdioxid bzw. Kohlensäure), beeinflussen den pH-Wert des Blutes nicht sonderlich, da ein eigenes Puffersystem wirkt. Sollte dieses pH-regulierende System einmal versagen, wie es z.B. bei schwerem unkontrollierbarem Diabetes zur Übersäuerung des Blutes durch Überproduktion von Stoffwechselsäuren vorkommt, kann der pH-Wert auf $\text{pH} = 6,8$ oder tiefer fallen. Andere Krankheiten können zu einem unverhältnismäßigen Anstieg des pH-Wertes im Blut führen. Beides kann zu irreparablen Schäden und sogar zum Tod führen.

Für ein Absinken des pH-Wertes von 7,4 auf 6,8 bedarf es in einem ungepufferten System nur der Konzentrationserhöhung der Hydroxonium-Ionen um $1 \times 10^{-8} \text{ mol/l}$ ($0,0000001 \text{ mol/l}$).

Welche Mechanismen sind also so ungewöhnlich empfindlich, dass eine solche Konzentrationsänderung lebensbedrohlich sein kann?

Sehr viele Zellstrukturen und -funktionen werden durch den pH-Wert beeinflusst. Ganz besonders empfindlich sind die Enzyme, dessen katalytische Aktivitäten im Stoffwechsel pH-Wert abhängig sind. Eine typische Kurve der pH-Wert Abhängigkeit des Enzyms Trypsin (ein Verdauungsenzym, das im Dünndarm wirkt) soll dieses verdeutlichen.

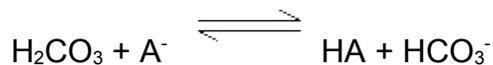
**Wirkung des pH-Wertes auf die
Aktivität des Verdauungsenzyms
Trypsin**



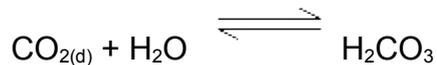
Das Hydrogencarbonat-Puffersystem

Der Hauptpuffer des Blutplasmas ist das sogenannte Hydrogencarbonat-Puffersystem, welches im folgenden ausführlich erklärt wird.

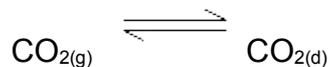
Das Hydrogencarbonat-Puffersystem resultiert aus der gleichzeitigen Anwesenheit von Kohlensäure-Molekülen als Protonendonator und Hydrogencarbonat-Ionen als Protonenakzeptor (zur Vereinfachung wird als Reaktionspartner allgemein A^- als Base bzw. HA als Säure angegeben; da das Blutplasma eine wässrige Lösung ist, ist z.B. für A^- H_2O oder OH^- denkbar):



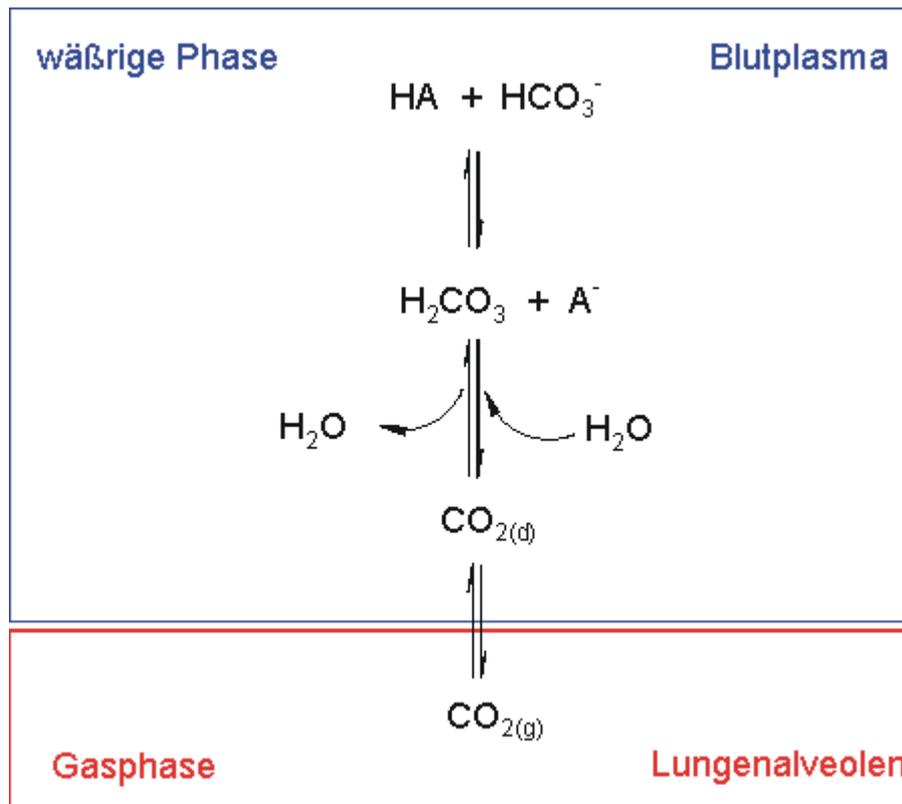
Es wirkt wie andere Puffersysteme, ist aber einzigartig darin, dass eine seiner Komponenten, die Kohlensäure, nach folgender reversibler Reaktion aus physikalisch gelöstem Kohlenstoffdioxid ($CO_{2(d)}$) und Wasser gebildet wird:



Unter Normalbedingungen ist Kohlenstoffdioxid gasförmig ($CO_{2(g)}$). Es besteht also ein dynamisches Gleichgewicht zwischen gelöstem und gasförmigem Kohlenstoffdioxid.



Die letzten beiden Reaktionen sind für das Puffersystem zu berücksichtigen. Der pH-Wert eines Hydrogencarbonat-Puffersystems hängt von dem Verhältnis der Konzentration an gelöster Kohlensäure zum Hydrogencarbonat ab. Die Konzentration der Kohlensäure ist jedoch von der Konzentration des gelösten Kohlenstoffdioxids und dieses wiederum vom Partialdruck des Kohlenstoffdioxids in der Gasphase abhängig. Letztendlich wird der pH-Wert eines Hydrogencarbonat-Puffersystems, das einer Gasphase ausgesetzt ist, von der Konzentration des Hydrogencarbonats in der wässrigen Phase und dem Partialdruck des Kohlenstoffdioxids in der Gasphase bestimmt. Im Organismus der Wirbeltiere entspricht das Blutplasma der wässrigen Phase und der Raum in den Lungenbläschen (Alveolen) der Gasphase:

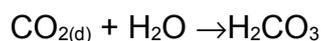
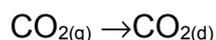
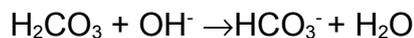


Zum Schema: Das Kohlenstoffdioxid in den Alveolen der Lunge steht im Gleichgewicht mit dem Hydrogencarbonat-Puffer des Blutplasmas, das durch die Lungenkapillaren strömt.

Pufferwirkung

Das Puffersystem im Blut ist ein wirksamer physiologischer Puffer im Bereich um $pH = 7,4$, da die Kohlensäure im Blutplasma im labilen Gleichgewicht mit einer großen Reservekapazität von gasförmigem Kohlenstoffdioxid in den Lufträumen der Lunge steht. Dessen Konzentration kann durch die Atmung ständig reguliert werden.

Wann immer das Blut überschüssige Hydroxid-Ionen aufnehmen muss, werden die Kohlensäure-Moleküle (H_2CO_3) des Blutes, welche durch Protonenabgabe an die Hydroxid-Ionen Hydrogencarbonat-Ionen (HCO_3^-) bilden, schnell aus dem Reservoir von gasförmigem Kohlenstoffdioxid in den Lungen wieder aufgefüllt (Verringerung der Atemtätigkeit). Gebildetes HCO_3^- kann über die Nieren ausgeschieden werden.



Bei einem Überschuß an Hydroxonium-Ionen wirken Hydrogencarbonat-Ionen (HCO_3^-) als Brønsted-Basen und bilden Kohlensäure-Moleküle (H_2CO_3). Diese zerfallen in Wasser- und Kohlenstoffdioxid-Moleküle. Das Kohlenstoffdioxid kann in den Lungen freigesetzt und ausgeatmet werden.

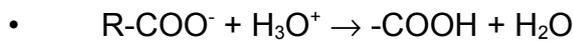
Weitere Puffersysteme im Blutplasma: Das Proteinatpuffersystem

Neben dem Hydrogencarbonat-Puffersystem sind außerdem die Serumproteine für eine Pufferung verantwortlich: Die Proteine besitzen als Seitengruppen positiv geladene Amino-Gruppen ($-\text{NH}_3^+$) und negativ geladene Carboxylat-Gruppen ($-\text{COO}^-$).

Amino-Gruppen können überschüssige Hydroxid-Ionen durch Protonen-Abgabe neutralisieren (die zugehörigen Moleküle wirken dann als Brønsted-Basen):



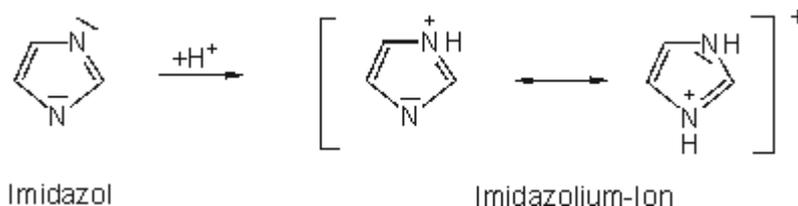
Bei einem Überschuß an H^+ -Ionen (=Hydroxoniumionen) werden Protonen an die Carboxylat-Gruppen angelagert:



Die zugehörigen Moleküle wirken dann also als Brønsted-Säuren. Beide Gruppen stehen nun in umgekehrter Wirkung für eine Kompensierung eines Überschusses an Hydroxonium- oder Hydroxid-Ionen zur Verfügung.

Diese Seitengruppen haben für die Pufferung des Blutes keine allzu große Bedeutung. Wesentlich wichtiger sind ionisierbare Seitengruppen wie der Imidazolring des Histidins.

Imidazol ist eine schwache Base ($\text{pK}_\text{B}=7,05$), dessen Moleküle durch Addition eines Protons an ein Stickstoffatom hoch symmetrische, mesomeriestabilisierte Kationen bilden:



Zu dieser Art Proteinpufferung tragen sowohl die Plasmaproteine, insbesondere das Albumin (Anteil an der Plasmaproteinmenge: 60%), als auch das intraerythrocytäre (in den weißen Blutkörperchen vorhandene) Hämoglobin bei. Der Hauptanteil der Pufferkapazität entfällt dabei auf das Hämoglobin, weil es in hoher Konzentration vorliegt und sein Histidinanteil relativ groß ist.