



Atemlos – Wenn die Luft knapp wird



Quarks & Co

Atemlos – wenn die Luft knapp wird



Weitergehende Informationen zu diesem Thema, sowie Link- und Lesetipps, finden Sie auf unserer Homepage unter:

www.quarks.de

Atemlos – wenn die Luft knapp wird

Inhalt

S. 4	Die beste Luft der Welt
S. 7	Wie die Luft auf die Erde kam
S. 11	Wenn die Luft zum Schneiden ist
S. 16	Sauerstoff im Körper
S. 17	Mehr Luft! Ranga Yogeshwar im Selbstversuch
S. 20	Dünne Luft und dickes Blut: Sport und Sauerstoff
S. 25	Die Flüssigkeitsatmung
S. 27	Lesetipps

Impressum

Text: Christoph Goldbeck, Uli Grünwald, Wobbeke Klare, Ilka aus der Mark, Silvio Wenzel

Redaktion und Koordination: Wolfgang Lemme

Copyright: WDR, März 2006

Gestaltung: Designbureau Kremer & Mahler, Köln

Bildnachweise

alle Abbildungen WDR außer:

S. 22	Radrennfahrer; Rechte: dpa
S. 24	Lance Armstrong; Rechte: dpa

Die beste Luft der Welt

Wie gut muss die Luft sein?

Luft – einerseits alltäglich, andererseits absolut lebensnotwendig. Nur wenige Minuten ohne dieses Gemisch und wir würden sterben. Doch welche Rolle spielt dabei die Qualität der Luft? Was ist überhaupt gute Luft? Um das herauszufinden hat Quarks & Co einen ganz besonderen Test gemacht: In einer Luftpumpe des Forschungszentrums Jülich haben drei Probanden unterschiedliche Luftarten getestet: Südseeluft, Bergluft und Stadtluft. Das Quarks-Team wollte wissen, ob eine dieser besonderen Brisen bevorzugt wird. Es nutzte dafür das Wissen der Jülicher Atmosphärenforscher und ihre weltweit einmalige Anlage: In einer 370-Kubikmeter-Röhre, „Saphir“ genannt, mischten die Wissenschaftler die drei Luft-Cocktails für den Quarks-Test zusammen. Eigentlich untersuchen die Forscher mit dem Saphir, wie die Atmosphäre der Erde funktioniert, wie stark der Mensch sie verschmutzt und wie sich die Luft wieder reinigen lässt. Doch für Quarks & Co haben sie den Lufttest möglich gemacht. Mit dabei waren drei Testpersonen, die die beste Luft erschnuppeln sollten. Alle hatten ein besonderes Verhältnis dazu: eine Asthmatikerin mit besonders sensiblen Atemwegen, eine Profinase, beruflich mit Geruchsempfindungen befasst, und ein Raucher.

Test 1: Südseeluft

Zuerst lösen die Forscher aus, welche Luft im ersten Durchgang hergestellt werden soll: es ist Südseeluft. Wie überall auf der Welt ist Stickstoff auch in der Südsee der Hauptbestandteil der Luft: 78 Prozent Stickstoff und 21 Prozent Sauerstoff lassen die Forscher also in die Luft-Kammer fließen. Das sind insgesamt 300.000 Liter. Dazu geben sie auch Wasser in den Luftstrom, denn in der Südsee ist die Luft recht feucht. Die drei Tester haben die Aufgabe, die drei Luftsorten erst zu erkennen und ihnen dann ein

Qualitätsurteil zu verpassen. Südseeluft ist eigentlich sehr saubere Luft, denn die Sonne hat die meisten Schadstoffverbindungen schon auf dem Weg dorthin abgebaut. Nicht lange lassen daher Profinase und Asthmatikerin auf ihr Urteil warten: Das, was sie riechen, ist Südseeluft. Nur der Raucher liegt falsch, er tippt auf Bergluft.

Test 2: Bergluft

Während sich die Testnasen eine kleine Erholungspause gönnen, nutzen die Forscher diese Unterbrechung, um Bergluft herzustellen. Wieder pumpen sie die größeren Anteile an Stickstoff und Sauerstoff in das Luftlabor. Hoch oben an der Waldgrenze gibt es mehr Ozon, also kommt jetzt das Treibhausgas hinzu. Außerdem bestimmen Duftnoten von Gräsern, Kiefern und anderen Nadelhölzern den Geruch in den Bergen. Auch dieser Cocktail kommt in den Luftstrom – in einer extrem hohen Verdünnung, als ob man ein Schnapsglas mit Wasser in den Bodensee kippen würde. Trotz der geringen Menge an Baumgerüchen ist der Profinase sofort klar, dass es sich um Luft aus den Bergen handeln muss. Ganz deutlich hat der Tester den typischen Kieferngeruch identifiziert. Die Asthmatikerin hätte eigentlich leichte Atemprobleme bekommen können, denn Ozon kann die Atemwege reizen und im schlimmsten Falle sogar schädigen. Doch nichts hat sie davon gespürt und tippt ebenfalls relativ schnell auf Bergluft. Nur der gelegentlich rauchende Normalriecher hat wieder Schwierigkeiten mit der Zuordnung. Da er Bergluft schon vergeben hat, entscheidet er sich für die Südseeluft. Aber wirklich einordnen kann er die Gerüche, die er wahrgenommen hat, nicht.



Ein Waldcocktail und Ozon bestimmen die Bergluft



Das Luftlabor im Forschungszentrum Jülich



Südseeluft ist die sauberste Luft!



Stadtluft ist am stärksten verschmutzt

Test 3: Stadtluft

Vor dem nächsten Versuch müssen zunächst die Rückstände der Bergluft aus dem Luftlabor gespült werden. Die Probanden regenerieren in der Zwischenzeit ihre Atemwege, indem sie wieder Jülicher Luft einatmen und damit ihre Geruchseindrücke neutralisieren. Für die Stadtluft geben die Atmosphärenforscher inzwischen Kohlendioxid, Kohlenmonoxid, Stickoxide und Kohlenwasserstoffe ins Sauerstoff-Stickstoff-Gemisch – also Abgase, Zigarettenrauch, Lösungsmitteldämpfe. Viele von den Zusätzen sind auf Dauer gesundheitsschädlich. Chronische Atemwegserkrankungen bis hin zu Krebs können ihre Ursache in verdreckter Luft haben. Für den kurzen Test sind die Abgase für die Teilnehmer aber kein Problem. Weil Stadtluft einen sehr eigenen Geruch hat, liegen alle drei Tester auf Anhieb richtig.

Das Ergebnis: Die beste Luft gibt es in den Bergen!

Die beste Luft der Welt ist also nicht immer leicht zu erschnüppern. Doch die drei Probanden sind sich einig: Bergluft war für sie mit Abstand die beste Luft.

Wie die Luft auf die Erde kam

Ein geheimnisvoller Stoff

Schon seit Jahrtausenden beschäftigen sich die Menschen mit der Luft – das unsichtbare Medium gab frühen Wissenschaftlern und Philosophen viele Rätsel auf. Denn es war klar, dass kaum ein Organismus auf dem Planeten ohne Luft auskommt – nur was sie da genau einatmen, war nicht bekannt.

Erst im achtzehnten Jahrhundert entdeckten drei Forscher fast gleichzeitig das für Menschen, Tiere und Pflanzen so wichtige Gas – den Sauerstoff. Der deutsch-schwedische Apotheker Carl Wilhelm Scheele, der englische Geistliche Joseph Priestley und der Franzose Antoine Lavoisier untersuchten zwischen 1770 und 1780 die Zusammensetzung der Luft. Mit Verbrennungs- und Tierexperimenten konnten sie nachweisen, dass die Luft ein Gemisch ist, und dass es für die Lebewesen vor allem auf einen einzigen Bestandteil ankommt: den Sauerstoff. Lavoisier nannte das neue Gas „oxygène“.

Doch was ganz natürlich erscheint – dass Sauerstoff einfach da ist – ist keineswegs selbstverständlich. Denn weder Luft noch Sauerstoff waren von Anfang an auf der Erde.

Am Anfang war Materie

Vor vielen Milliarden Jahren raste eine Anhäufung von Materie durchs All: die Vor-Erde. Es war nur ein Massebrocken ohne Wasser und schützende Atmosphäre, denn Luft gab es noch nicht auf diesem Himmelskörper – er war zu heiß. Ununterbrochen schlugen Meteoriten auf dem kleinen Planeten ein und fegten alles weg, was sich an seiner Oberfläche ansammelte.



Vulkanausbrüche sorgten dafür, dass die Ur-Atmosphäre entstand



Doch langsam ordnete sich das Chaos: Vor etwa vier-einhalb Milliarden Jahren kühlte sich die Erdkruste etwas ab und erstarrte. Darunter blieb das Gestein heiß und flüssig, es kam zu den heftigsten Vulkan-ausbrüchen in der Geschichte des Planeten: die wer-dende Erde spuckte gewaltige Mengen von Asche, Lava und Gasen aus.

Diese Gase bildeten vor etwa vier Milliarden Jahren eine giftige Hülle rund um den Globus, die Ur-atmosphäre: Kohlendioxid, Stickstoff, Methan, Schwefelgase, Wasserstoff und etwa 0,01 Prozent Sauerstoff. Es waren schmutzige Wolken, die von der Schwerkraft der Erde festgehalten wurden. Langsam nahmen die Meteoriteneinschläge ab. Damit änderte sich alles, denn nun verringerten sich auch die Vulkanausbrüche und die Erdoberfläche konnte sich abkühlen.

Die erste Sintflut

Die kühlen Außentemperaturen ließen den Wasser-dampf in der Uratmosphäre an Ascheteilchen kondensieren, schwere Tropfen lösten sich aus den Wolken. Es begann zu regnen – Jahr-millionsen lang. Die Täler liefen voll Wasser und die Ozeane entstanden. Zwar bombardierten noch gefährliche UV-Strahlen von der Sonne die Erdoberfläche, doch Wasser, Temperaturen und Atmosphäre wurden lebensfreundlicher. Denn auch das Treibhausgas Kohlendioxid wurde vom Regen aus der Atmosphäre gewaschen

und der Stickstoff setzte sich durch. Viele chemische Verbindungen sammelten sich in dieser Zeit – vor etwa 3,9 Milliarden Jahren – im Meer an.

Eine Schutzhülle für den jungen Planeten

Noch fehlte der lebenswichtige Sauerstoff und mit ihm die schützende Gasschicht um die Erde. Dann, vor etwa 3,8 Milliarden Jahren, vollzog sich das Wunder der Evolution: Ur-Lebewesen entstehen, Bakterien, die von Wasser und Kohlendioxid leben. Und sie produ-zieren das Gas, von dem später die höheren Orga-nismen leben können: Sauerstoff – ein Abfallprodukt aus dem Stoffwechsel dieser Bakterien.



Im Wasser lebende Cyanobakterien produzieren den ersten Sauerstoff

Allerdings ist das lebenswichtige Gas noch nicht in der Luft, sondern noch im Wasser. Dort verbindet es sich zuerst mit dem Eisen des Meeresbodens. Nach über zwei Milliarden Jahren ist das Wasser in den Welt-meeren jedoch so mit Sauerstoff gesättigt, dass das Gas in die Atmosphäre entweicht und sich rund um die Erde verbreitet. Die ersten atmenden Lebewesen entwickelten sich. Unter der neuen Gashülle, die die Erde vor den tödlichen UV-Strahlen abschirmt, können sich jetzt die höheren Lebewesen entwickeln. Deren Dasein richtet sich nach dem Sauerstoffgehalt der Atmosphäre, der allerdings noch stark schwankt.

Riesenwuchs bei Tieren und Pflanzen

Vor 600 Millionen Jahren gab es schließlich so viel Sauerstoff in der Luft, dass sich sauerstoffabhängige Lebensformen explosionsartig entwickelten. Einen Schub gab es vor etwa 300 Millionen Jahren, als der

Sauerstoffgehalt in der Atmosphäre auf etwa 30 Prozent anstieg. Tiere und Pflanzen wurden gigantisch groß: es gab Libellen von fast einem Meter Länge, meterlange Tausendfüßler oder 50 Meter hohe Pflanzen wie der Bärlapp. Dann ging der Sauerstoffgehalt wieder auf 21 Prozent zurück.

Pflanzen sorgen für das Gleichgewicht in der Luft

Die vielen Landpflanzen, die damals die Erde überwucherten, griffen jetzt in den Sauerstoffhaushalt ein – sie verbrauchten Kohlendioxid und produzierten neuen Sauerstoff. Und je mehr Landpflanzen es gab, desto besser regulierte sich auch der Sauerstoffgehalt. Vor etwa 200 Millionen Jahren pendelte er sich auf etwa 21 Prozent ein. Diese regulierende Funktion haben Pflanzen noch heute! Der Sauerstoffgehalt in der Atmosphäre bleibt durch ein kompliziertes Wechselspiel zwischen atmenden Tieren und atmenden Pflanzen stabil – und zwar genau auf dem richtigen Wert, um effizient dem Leben zu dienen.

Besonders wichtig ist dabei das Gleichgewicht zwischen Sauerstoff und Stickstoff. Bis heute ist das Leben auf dem blauen Planeten abhängig von der Balance dieser Gase in der Atmosphäre. Das Verhältnis sollte etwa bei 78 Prozent Stickstoff zu 21 Prozent Sauerstoff liegen, das verbleibende Prozent setzt sich aus vielen anderen Gasen und Stoffen zusammen. Dieses Gleichgewicht sorgt für die Beständigkeit des Lebens.



Bis heute ist das Verhältnis zwischen Sauerstoff, Stickstoff und Kohlendioxid gleich geblieben und sorgt damit für die Beständigkeit des Lebens



Wenn die Luft zum Schneiden ist

Viele Menschen – schlechte Luft

In Deutschland verbringen die meisten Menschen mehr als 20 Stunden am Tag in Innenräumen: zu Hause, im Büro, in der Schule, in Geschäften, Restaurants oder Sportzentren. Trotzdem wird normalerweise kaum beachtet, welche Luftqualität dort herrscht. Nur wenn viele Menschen in einem Raum zusammen kommen, zum Beispiel in einem überfüllten Konferenzraum, wird die Luft für jeden spürbar schlecht: Sie ist „zum Schneiden“, der lebenswichtige Sauerstoff scheint knapp zu werden. Aber stimmt das auch? Quarks & Co macht den Test: Was passiert mit der Luft in einem schlecht gelüfteten Konferenzraum? Und wie wirkt sich die Luftqualität auf die Menschen aus?



Gedränge bei der täglichen Themenkonferenz im ARD-Hauptstadtstudio

Eine lange Konferenz für den Quarks-Test

Im ARD-Hauptstadtstudio in Berlin schließen wir über fünf Stunden lang zehn Personen in einen kleinen Konferenzraum. Es gibt keine Fenster, die einzige Tür bleibt geschlossen, die Klimaanlage ist ausgeschaltet. Verschiedene Messgeräte bestimmen die ganze Zeit über die Zusammensetzung und Qualität der Luft. Gleichzeitig machen Schlafforscher mit zwei Teilnehmern immer wieder Reaktions- und Aufmerksamkeitstest. So kontrollieren sie, wie wach und fit die beiden noch sind.



Eingesperrt für Quarks & Co: Der Konferenzraum hat zwar eine große Glasscheibe, aber kein Fenster, mit dem gelüftet werden kann

Die Ausgangssituation: normale Luft

Beginn dieser besonderen Quarks-Konferenz ist 10.30 Uhr. Da ist die Luftqualität noch in Ordnung; alle Teilnehmer sind frisch und munter. Durch den Aufbau der Messgeräte und die Vorbereitung des Experiments haben sich einige Werte aber schon verändert. Die Bestandsaufnahme vor Beginn ergab folgendes:

Sauerstoffkonzentration: 20,9 Prozent – Das entspricht der besten Luft im Grünen.

Kohlendioxidkonzentration: 510 ppm = 0,051 Prozent

Normale Luft hat im Freien nur eine Konzentration von rund 340 ppm – der Wert ist durch die atmen- den Menschen, die die Geräte im Raum aufgebaut haben, schon leicht erhöht.

TVOCs: 247 µg pro Kubikmeter (µg/m³)

TVOC steht für die Summe der flüchtigen organischen Substanzen (Englisch: „total volatile organic compounds“). Dazu gehört unter anderem Essigsäure, die der Mensch als Stoffwechselprodukt aus- dünstet. Meistens werden rund 60 unterschiedliche Verbindungen nachgewiesen und zu einem Summenwert, dem TVOC, zusammengefasst. Auch der Wert für die TVOCs ist nach dem Aufbau im Konferenzraum schon leicht erhöht, eine vorherige Kontrollmessung hatte eine Grundbelastung von 89 µg pro Kubikmeter ergeben.

Temperatur: 22,5 Grad Celsius

Reaktionszeit der Testpersonen: 498 Millisekunden – das ist ein ganz normaler Wert.

Sauerstoff ist genug da



Die Sauerstoffkonzentration sinkt selbst bei zehn Menschen im Raum nur minimal ab

Im Laufe der Konferenz empfinden die Teilnehmer die Luft als zunehmend schlecht. Mit jedem Atemzug der Teilnehmer wird zwar ein Teil des Sauerstoffs verbraucht, doch der Gesamtanteil dieses Gases in der Luft ist so hoch, dass die Verluste kaum eine Rolle spielen: Am Ende der immerhin fünfständigen Test-Konferenz ist die Sauerstoffkonzentration lediglich von 20,9 auf 20,1 Prozent gesunken. Erst ein Wert unter 18 Prozent würde sich bei Aufmerksamkeit und Konzentration bemerkbar machen.

Kohlendioxid steigt extrem

Während der gesamten Konferenz atmen die Teilnehmer Kohlendioxid (CO₂) aus. Je mehr sie sich bewegen, umso steiler ist der Anstieg in der Konzentration. Der Messwert

steigt im Testraum von 510 ppm auf 4987 ppm. Das ist fast zehn Mal so viel wie zu Beginn der Konferenz und entspricht rund 0,5 Prozent CO₂-Anteil in der Luft. Doch sogar bei dieser hohen Konzentration hat das Kohlendioxid als solches noch keine gesundheitlichen Auswirkungen. Erfahrungen, die man in U-Booten und auf der ISS, der Internationalen Raumstation, gesammelt hat, zeigen, dass erst ab mehr als einem Prozent Beeinträchtigungen nachweisbar sind. Und wirklich problematisch wird es erst bei einer Konzentration über vier Prozent. Dann können zum Beispiel Halluzinationen auftreten.



Die Kohlendioxidkonzentration steigt schnell an

Indikator für schlechte Luft

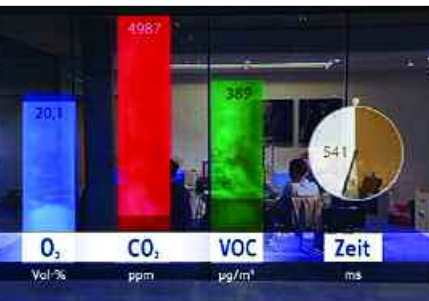
Obwohl das Kohlendioxid gesundheitlich keine kritische Rolle spielt, nutzt man CO₂-Messwerte, um die Luftqualität in Innenräumen zu bestimmen. Der Grund: Der Anstieg der Kohlendioxidkonzentration spiegelt sehr gut die Verschlechterung der Luft durch menschliche Aktivitäten, also durch Atmung und andere Ausdünstungen, wider. Die einzelnen Stoffe, die sich dabei in der Luft ansammeln, lassen sich jedoch wesentlich schwerer nachweisen als Kohlendioxid. Daher dient das CO₂ als Referenzwert. Für eine gute Luftqualität sollte der Indikator Kohlendioxid den Wert von 0,1 Prozent (1.000 ppm) nicht übersteigen.

Der entscheidende Faktor

Die flüchtigen organischen Substanzen (VOCs), die aus dem Atem und aus Möbeln, Tapeten oder Teppichen entweichen, steigen im Test-Konferenzraum von anfangs 89 µg/m³ auf 389 µg/m³ bei Ende des Tests. Auffällig ist zum Beispiel der Anstieg des Stoffwechselproduktes Essigsäure, aber auch die Kamera und sogar der Orangensaft, den die Teilnehmer trinken, geben VOCs ab. Die Grenze für normale Luft liegt



Flüchtige organische Substanzen verschlechtern die Luft



Die Luftqualität am Ende des fünfständigen Versuchs

bei rund 300 µg/m³ und wird also im Quarks-Testfall leicht überschritten. Doch genau diese VOCs stehen im Verdacht, für Müdigkeit und verminderte Aufmerksamkeit verantwortlich zu sein. Es ist noch nicht gelungen, dabei einzelnen Komponenten aus der Mischung eine Wirkung zuzuordnen – es scheint sich um einen Kombinationseffekt zu handeln: Erst bei einer bestimmten Zusammensetzung tritt die negative Wirkung auf das Reaktionsvermögen von Menschen auf.

Müde Teilnehmer am Ende der Konferenz

Wie erwartet, sind die Teilnehmer am Ende der Konferenz ziemlich erschöpft. Das zeigt sich auch in den Wachheits- und Aufmerksamkeitstests: Die Reaktionszeit ist um 10 Prozent von 498 auf 541 Millisekunden gestiegen. Alle Beteiligten sind froh, als sie nach fünf Stunden den stickigen Raum mit seinen inzwischen 29 Grad Raumtemperatur verlassen und frische Luft schnappen können.

Schlechte Luft ist der Normalzustand

Die Werte, die während des Quarks-Tests erreicht wurden, sind sicher extrem hoch; und zum Glück mutet man Menschen eher selten eine fünfständige Konferenz in einem Raum ohne Lüftung zu. Doch schlechte Luft in Innenräumen ist leider ein verbreitetes Phänomen, nicht nur in überfüllten Konferenzräumen. Vor allem in Schulen führt eine ungünstige Kombination aus großer Schülerzahl, fehlender Klimaanlage und unzureichender Fensterlüftung zu gesundheitlich bedenklichen Werten. Verschiedene deutsche und internationale Studien haben gezeigt, dass zum Beispiel der Richtwert von

1.000 ppm als maximale Kohlendioxidkonzentration nur selten eingehalten wird. Üblicherweise steigt der Wert in Schulen am Vormittag auf 3.000 bis 4.000 ppm, vereinzelt sogar auf bis zu 6.000 ppm. (Näheres zu den Studien bei den Linktipps im Internet). Doch es gibt auch eine gute Nachricht – die Luftqualität lässt sich meistens sehr einfach verbessern, das Prinzip heißt: Fenster auf!

Tipps zum richtigen Lüften

Damit die Luft im Raum frisch bleibt, sollte man am besten einmal in der Stunde die Raumluft komplett austauschen. In älteren Gebäuden sorgen meist schon undichte Stellen an den Fenstern und im Mauerwerk dafür, dass ständig frische Luft in den Raum strömt. In modernen Häusern, die gut isoliert sind, muss man die Fenster aufmachen, um richtig zu lüften. Wie schnell die Luft dabei ausgetauscht wird, hängt zum einen vom Temperaturunterschied zwischen Innen und Außen sowie von der äußeren Windgeschwindigkeit ab. Zum anderen von der Fensterstellung. Hier eine Übersicht dazu, wie lange man bei einer bestimmten Fensterstellung lüften muss, damit die Luft komplett ausgetauscht wird:

Fenster in Kippstellung	15 bis 200 Minuten
Fenster halb geöffnet	6 bis 15 Minuten
Fenster ganz geöffnet	3 bis 15 Minuten
Querstromlüftung*	1 bis 6 Minuten

*(mehrere gegenüberliegende Fenster ganz geöffnet, Durchzug)

Quelle: „Schimmel-Leitfaden“ des Umweltbundesamtes

Sauerstoff im Körper

Die Lunge wird niemals leer

Ein gesunder junger Erwachsener atmet ungefähr fünfzehn Mal pro Minute ein und aus. Dabei gelangt pro Atemzug etwa ein halber Liter Frischluft in die Lunge; wenn man sich körperlich anstrengt, entsprechend mehr. Die Luft vermischt sich dort mit Luft, die schon in der Lunge ist – denn die Lunge ist niemals ganz leer: Auch nach heftigem Ausatmen bleiben immer mindestens eineinhalb Liter Luft darin. Das hat durchaus seinen Sinn: Die Restluft sorgt dafür, dass die Hohlräume der Lunge beim Ausatmen nicht in sich zusammenfallen.

Aus der Luft ins Blut

Beim Einatmen hebt sich der Brustkorb, und gleichzeitig senkt sich das Zwerchfell. Die Lunge wird dadurch größer; ein Unterdruck entsteht. Er sorgt dafür, dass Frischluft angesaugt wird. Die gelangt durch die Luftröhre in die Bronchien, die sich mehr und mehr verzweigen. Die letzten Verästelungen enden in traubenförmig angeordneten Hohlräumen, den Lungenbläschen. Jedes Lungenbläschen ist von feinen Blutgefäßen eingefasst. Die Wände dieser Bläschen sind sehr dünn – der Sauerstoff aus der Luft kann durch sie hindurchwandern und gelangt so ins Blut.

Rote Blutkörperchen: Das ganz besondere Taxi

Einmal im Blut angekommen, bindet sich der Sauerstoff an die roten Blutkörperchen. Sie haben dafür ein besonderes Speichereiweiß, das Hämoglobin. Das Hämoglobin ist es auch, was dem Blut seine charakteristische rote Farbe gibt. Mithilfe des Hämoglobins transportieren die roten Blutkörperchen den Sauerstoff

in den ganzen Körper. Da, wo der Sauerstoffgehalt im Blut niedrig ist, geben sie ihre Fracht wieder ab – die Körperzellen können ihn jetzt aufnehmen und ihn für ihre Energieproduktion verwenden.

Effektive Abfallbeseitigung

Die Lunge hat aber noch eine andere Funktion: Hier wird nicht nur Sauerstoff aufgenommen, sondern auch Kohlendioxid abgegeben. Kohlendioxid ist eine Art Abfallprodukt aus dem Energiestoffwechsel des Körpers. Befindet sich zuviel davon im Blut, schlagen spezielle Sensoren im Hirnstamm und in der Halsschlagader Alarm: Bitte jetzt atmen! Der Einfluss, den die Kohlendioxid-Sensoren auf den Atemtrieb haben, ist im Normalfall sogar stärker als der der Sauerstoff-Sensoren. Die Kohlendioxid-Abgabe funktioniert genau andersherum als die Sauerstoffaufnahme: Im Blut ist die Konzentration höher als in den Lungenbläschen – darum wandert das Kohlendioxid durch die Wand des Blutgefäßes in das Lungenbläschen hinein. Beim Ausatmen wird das Kohlendioxid dann wieder nach draußen befördert.

Erstaunliche Bilanz

Die Luft, die wir schließlich wieder ausatmen, hat eine ganz andere Zusammensetzung als beim Einatmen: Aus den ursprünglichen 0,03 Prozent Kohlendioxid sind plötzlich über vier Prozent geworden. Der Sauerstoffgehalt verändert sich dagegen nicht ganz so stark: Von den 21 Prozent der Einatemluft nutzt der Körper nur etwa fünf. Das ist auch der Grund dafür, dass eine Mund-zu-Mund-Beatmung funktioniert: Die Luft kann im Notfall auch ein zweites Mal geatmet werden.



Beim Einatmen vergrößert sich die Lunge und es entsteht ein Unterdruck



Mithilfe des Hämoglobins bindet sich der Sauerstoff an die roten Blutkörperchen



Kohlendioxid ist eine Art Abfallprodukt aus dem Energiestoffwechsel

Mehr Luft! Ranga Yogeshwar im Selbstversuch

Dünne Luft wie auf 6700 Metern Höhe

Um zu demonstrieren, wie der Körper auf eine Abnahme des Sauerstoffs reagiert, hat sich Moderator Ranga Yogeshwar im Quarks-Studio zu einem Selbstversuch bereit erklärt. Mit dabei ist ein Arzt, der den Versuch überwacht und die Messwerte erhebt. Über eine spezielle Maske atmet Ranga ein Luftgemisch ein, das nur acht Prozent Sauerstoff enthält. Normalerweise liegt der Sauerstoffanteil bei knapp 21 Prozent. Der geringe Sauerstoffanteil entspricht etwa der Luft im Himalaya auf der Höhe von rund 6700 Metern. Da so weit oben weniger Sauerstoff in der Lunge ankommt, sinkt auch die Sauerstoffsättigung im Blut langsam ab. Das beeinträchtigt über kurz oder lang auch das Gehirn.

Der Rechen-Wettbewerb

Besonders eindrucksvoll zeigt sich der Mangel an Sauerstoff bei normalerweise einfachen kognitiven Leistungen. Im Test tritt Ranga gegen die neunjährige Nora im Kopfrechnen an. Beide haben die Aufgabe, von 1.000 immer weiter 7 abzuziehen. So entsteht eine Zahlenreihe: 1.000, 993, 986, 979 usw.. Das Ergebnis sollen sie jeweils mit Hilfe von Dominosteinen mit den Ziffern 0 bis 9 aufstellen.

Zu Beginn: Kopf an Kopf

Sobald das Gasmisch mit acht Prozent Sauerstoff aufgedreht ist, geht es mit der Sauerstoffsättigung in Rangas Körper abwärts. Zunächst merkt er davon noch nichts, das Atmen erscheint ganz normal. In den ersten 20 Sekunden liegt die Sauerstoffsättigung in seinem Blut auch noch bei über 90 Prozent, Ranga und Nora rechnen gleich schnell.

Rückstand nach wenigen Minuten

Doch schon nach drei Minuten liegt die Sauerstoffsättigung nur noch bei 60 Prozent. Das spürt Ranga körperlich: das Hin- und Herlaufen wird anstrengend, sein Puls ist auf über 140 gestiegen. Auch das Rechnen fällt ihm schwerer und die kleine Nora ist inzwischen deutlich schneller als er. Nach fünf Minuten hat Rangas Blut nur noch eine Sauerstoffsättigung von 54 Prozent. Seine Rechenergebnisse sind zwar immer noch richtig. Aber jeder Rechenschritt braucht viel Zeit, er vergisst manchmal, welche Zahlen er aufstellen muss.

Rechnen bis der Arzt kommt

Nach knapp sechseinhalb Minuten steht Ranga längere Zeit bewegungslos vor der nächsten Rechenaufgabe, sein Blut enthält nur noch 52 Prozent Sauerstoff. Da beendet der anwesende Arzt den Versuch und nimmt Ranga die Maske ab. Sonst wäre der Moderator wahrscheinlich wenig später ohnmächtig geworden. Doch nach einigen Atemzügen ist Ranga schnell wieder fit – und sein Blut hat wieder die normale Sauerstoffsättigung von 98 Prozent erreicht. Gewonnen hat allerdings die neunjährige Nora, sie ist bis in die 860er gekommen. Ranga ist dagegen im 900er-Bereich stehen geblieben und musste schließlich abbrechen – und das, weil ihm buchstäblich die Luft ausging...



Wie hält Ranga Yogeshwars Körper die dünne Luft aus?



Ranga im Rechenwettbewerb mit der neunjährigen Nora



Nach dem Versuch ist Ranga erschöpft



Dünne Luft und dickes Blut: Sport und Sauerstoff

Brennstoff für den Körper

Sport kostet Energie – je mehr man sich bewegt, desto höher ist der Energiebedarf des Körpers. In jeder Zelle läuft dann, einfach ausgedrückt, ein kleiner Verbrennungsvorgang ab, der diese Energie liefert. Die Zutaten dafür sind ein passender Brennstoff und der richtige Brandbeschleuniger: Traubenzucker aus der Nahrung ist der Brennstoff, der Brandbeschleuniger ist Sauerstoff. Bei hohem Energiebedarf – wenn man sich beim Sport also kräftig anstrengt – wird der Atem sofort tiefer, denn der Organismus sorgt für höhere Sauerstoffzufuhr. In den Bergen kann es da manchmal zu Problemen kommen, Alpensportler wissen es: die Luft ist oben dünner als im Flachland. Mit der Höhe nimmt der Sauerstoffgehalt kontinuierlich ab. Das spürt der Bergsteiger mit jedem Meter, denn die Schritte werden schwerer, je höher er kommt. Wenn der Körper aber ab einer gewissen Höhe zu wenig Sauerstoff bekommt, droht Unterversorgung – und das kann lebensgefährlich werden.

Höhenkrankheit: Unter Umständen lebensbedrohlich

Der Organismus versucht zwar sofort, den Sauerstoffmangel auszugleichen, indem er Puls- und Atemfrequenz steigert. Aber dieser Zustand darf nicht ausgereizt werden – ab 2.500 Höhenmetern heißt es deshalb: dem Körper Zeit geben, sich an die dünnere Luft anzupassen, also sich ausreichend zu akklimatisieren. Wer nicht krank werden will, muss seinem Körper dafür genügend Zeit geben – wie viel, ist individuell sehr unterschiedlich. Anzeichen einer gelungenen Anpassung ist unter anderem die Rückkehr des Ruhepulses auf den Wert vor der Anpassung. In dieser fortgeschrittenen Phase der Akklimatisierung vermehren sich die roten Blutkörperchen. Dadurch erhöht sich die Anzahl an Sauerstoffträgern, die den Sauerstoff zum Gewebe transportieren, und der Mangel wird ausgeglichen. Wer die Anpassung aber nicht einplant, dem droht die

Höhenkrankheit. Erste Anzeichen sind Schwindel und Kopfschmerzen, im Extremfall folgen Ödeme in Hirn und Lunge: Dort dringt Gewebeflüssigkeit ein, was zum Schlaganfall oder zum Erstickten führen kann.

Die Fitten sind besonders gefährdet!

Die Höhenkrankheit kann jeden Bergsteiger befallen, auch die Jungen und Fitten – sie sind sogar besonders gefährdet. Ihr Ehrgeiz treibt sie oft schnell in die Höhe, doch wer mehr als 500 Meter pro Tag aufsteigt, riskiert Gesundheit und Leben. Denn so schnell kann der Körper sich nicht an die neue Zusammensetzung der Luft gewöhnen. Das Akklimatisieren ist ein fein abgestimmtes, ständiges Wechselspiel zwischen Körperanpassung und Höhengewinn. Die Regel lautet also: oberhalb von 2.500 Höhenmetern ist Akklimatisieren nötig.



Ehrgeizige Bergsteiger sind besonders gefährdet, die Höhenkrankheit zu bekommen

Einmaleins des Aufstiegs

Gipfelstürmer im Himalaja halten sich leider nicht immer an die Grenzen, die ihr Körper ihnen setzt. Viele ehrgeizige Bergsteiger, die am Mount-Everest vom Basislager auf 5400 Metern den Aufstieg wagen, halten 800-1.000 Höhenmeter am Tag für normal. Sie riskieren ihr Leben, doch es ist ihnen einfach zu aufwändig, alle 500 Höhenmeter ein Lager aufzubauen und zu rasten. Wer sich aber nach dem schnellen Aufstieg der 7.000 Meter-Marke nähert, muss wirklich vorsichtig sein. Hier ist wochenlanges Akklimatisieren nötig, falls man nicht zum Sauerstoffgerät greifen will. Das heißt: Mehrmals bis auf 7.000 Meter aufsteigen, ein Stück zurückgehen, übernachten, und wieder und wieder aufsteigen.



Wanderer im Himalaja: Vorsicht vor dünner Luft!



Ab 2.500 Höhenmetern ist sorgsames Akklimatisieren lebenswichtig

Die Todeszone



Die Todeszone: Über 8.000 Meter herrscht akute Lebensgefahr

Über 8.000 Metern herrscht akute Lebensgefahr – das ist die Todeszone. Hier beträgt der Sauerstoffgehalt gerade mal 30 Prozent des Niveaus auf Meereshöhe. So weit oben baut der Mensch selbst im Schlaf ab; der Körper verzehrt sich selbst, denn im gesamten Organismus fehlt der Sauerstoff. Alle Körperfunktionen leiden unter der extrem dünnen Luft. Jetzt kommt es nur noch darauf an, möglichst schnell wieder runterzukommen.

Unlautere Mittel im Spiel



Im Leistungssport entscheiden oft die kleinsten Unterschiede über den Platz auf dem Siegereppchen

Selbst professionelle Bergsteiger klettern nicht andauernd auf Achttausender – Spitzensportler dagegen verlangen ihrem Körper ziemlich häufig extreme Leistungen ab. Die Konkurrenz ist gnadenlos, und nur mit hartem und ständigem Training können sich die Athleten in der absoluten Spitze behaupten. Dabei kommt es auf das kleinste Detail an. Häufig entscheiden winzige Materialunterschiede über Sieg und Niederlage. Und auch der Körper erreicht irgendwann seine Leistungsgrenze. Dann hilft selbst die beste Trainingsmethode nicht mehr – die Leistung stagniert. Immer wieder greifen einzelne Sportler in solchen Situationen zu Dopingmitteln: Sie schlucken, spritzen oder inhalieren Chemikalien, um ihrem Körper die winzigen Leistungssteigerungen zu entlocken, die sie ganz an die Spitze bringen. Mit Anabolika, Diuretika, Beta-Blockern und vielen anderen Stoffen versuchen sie, mehr Muskeln aufzubauen oder Schmerzen besser zu ertragen.

Mehr Ausdauer mit einem künstlichen Hormon

Besonders beim Radsport und beim Skilanglauf erwischen Kontrolleure immer wieder Doping-Sünder, die ihre Ausdauer verbessern wollen. Eine der beliebtesten

Substanzen ist dabei ein Hormon, das die Anzahl der roten Blutkörperchen reguliert: Erythropoietin, kurz EPO. Dieses Hormon wird auf natürliche Weise in der Niere gebildet und sorgt dafür, dass rote Blutkörperchen entstehen. Weil die roten Blutkörperchen für den Sauerstofftransport im ganzen Körper zuständig sind, ist es gut, viele davon zu haben: Je mehr dieser kleinen Zellen das Blut enthält, desto mehr Sauerstoff kann transportiert werden und desto mehr Leistung kann der Sportler erbringen. Es gibt sogar einen natürlichen Weg, die Anzahl der roten Blutkörperchen zu erhöhen: intensives Höhentraining in den Bergen. Doch das kostet Zeit und Mühe – da scheint der Griff zur Spritze verlockend...

Tests erst seit dem Jahr 2000

Seit 1988 wird Erythropoietin für medizinische Zwecke gentechnisch hergestellt, denn viele Nierenkranke können nicht mehr genügend körpereigenes EPO produzieren. Prompt entdeckten die Ausdauersportler das nachgebaute Hormon für ihre Zwecke, nachweisen konnte man ihnen das jahrelang nicht. Erst Ende der 1990er Jahre entwickelten Professor Dr. Jaques de Ceaurriz und seine Kollegen am Laboratoire National de Dépistage du Dopage (LNDD) bei Paris einen Test für künstliches EPO. Bei den Olympischen Sommerspielen in Sydney im Jahr 2000 unternahm Dopingkontrolleure damit erste Tests. Die Unterschiede zwischen dem natürlichen und dem künstlichen EPO sind nur winzig, daher ist jeder einzelne Test sehr aufwändig und dauert drei Tage.



Jaques de Ceaurriz (r.) und seine Kollegen haben den EPO-Test entwickelt

Vergangenheit unter Verdacht

Etlichen prominenten Sportlern wurde seitdem das EPO-Doping nachgewiesen. Sie mussten ihre Medaillen zurückgeben und wurden für mindestens zwei Jahre von allen Wettkämpfen ausgeschlossen. Die internationale

Dopingbehörde WADA vermutet jedoch, dass die Substanz schon deutlich länger zum Einsatz kam. Um den Test weiter zu verbessern, untersuchten die französischen Wissenschaftler im Jahre 2004 die Urinproben der Teilnehmer der Tour de France 1999. Zur Erinnerung: Damals konnte noch nicht auf EPO-Doping getestet werden. Das Ergebnis überraschte die Wissenschaftler nicht wirklich – von den beinahe achtzig getesteten Proben waren zwölf positiv. Doch Jaques de Ceaurriz und seine Kollegen arbeiteten mit anonymen Proben. Sie wussten nicht, welche Proben zu welchem Sportler gehörten.

Ein Mythos wankt

Doch dann gelingt es einem Journalisten der französischen Sportzeitung „L'Equipe“, die Codenummern der Proben den Sportlern zuzuordnen. Am 23. August 2005 platzt die Bombe: Sechs der positiven Proben stammen von Lance Armstrong – dem dominierenden Radsportler der letzten Jahre! Lance Armstrong bestreitet alle Vorwürfe, doch die Fakten sprechen gegen ihn. Der Titel des Toursiegers von 1999 wird ihm wahrscheinlich nicht aberkannt, denn von der Urinprobe ist nichts mehr übrig, um den positiven Befund zu bestätigen. Doch die Erfolge des – inzwischen vielleicht – besten Radsportlers aller Zeiten stehen jetzt in einem völlig anderen Licht.



Die Erfolge von Lance Armstrong erscheinen seit den Enthüllungen in einem völlig anderen Licht



Die Flüssigkeitsatmung

Letzte Chance: Die Spezialisten aus Berlin

An einem der letzten schönen, warmen Sommertage im Jahr 2000 ringt Murat Bulic mit dem Tod – während einer Gallenblasen-Operation ist es bei dem 47-jährigen zu schweren Komplikationen gekommen. Seine Lunge versagt, der Mann droht zu ersticken. Die Ärzte alarmieren Spezialisten im Berliner Virchow-Klinikum. Dort arbeiten Kollegen, die europaweit als Experten bei der Behandlung von akutem Lungenversagen gelten. Murat Bulic wird ins Virchow-Klinikum überführt, Professor Dr. Udo Kaisers übernimmt den Patienten. Zunächst lässt er eine Computer-Tomografie von der Lunge machen. Der Befund ist beunruhigend: das Organ ist so sehr in Mitleidenschaft gezogen, dass eine herkömmliche künstliche Beatmung nicht ausreichen wird, um Bulic zu retten. So entschließt sich Udo Kaisers zu einem ungewöhnlichen Schritt: Er füllt die Lunge mit Flüssigkeit, um sie zu stabilisieren. Was widersinnig klingt, ist vielleicht die letzte Chance für den Patienten – denn es ist eine besondere Flüssigkeit: Perfluorocarbon.

Die wundersame Flüssigkeit

Perfluorocarbon (PFC) sieht aus wie ganz normales Wasser. Doch gleich mehrere Eigenschaften machen es zu einem flüssigen Schatz. So speichert das PFC ganz hervorragend Sauerstoff und Kohlendioxid, die Gase, die bei der Atmung permanent mit der Umgebung ausgetauscht werden. Zudem ist PFC doppelt so schwer wie Wasser, schon deshalb kann es eine kollabierte Lunge wieder erweitern und so einen besseren Gasaustausch vorbereiten. Die Arbeitsgruppe um den Spezialisten Udo Kaisers hatte sich schon seit einigen Jahren mit der Anwendung von Perfluorocarbonen bei Lungenproblemen beschäftigt – bis zum Sommer 2000 allerdings nur im Labor. Das Forschungsteam nahm an einer internationalen Studie teil, die die Verwendung von PFC erforschen sollte. Ärzte in den USA hatten es schon einige Male in die Lungen von Patienten



Anhand der Computer-Tomografie entscheidet sich Dr. Kaisers für eine Behandlungsmethode, die in Europa noch nie zuvor angewendet wurde



Über einen kleinen Schlauch füllen die Ärzte die wundersame Flüssigkeit in die Lunge des Patienten

gepumpt, doch in Europa gab es damit noch keine Erfahrungen. An dem Tag, als Murat Bulic eingeliefert wird, müssen sich die Ärzte schnell entscheiden – und Bulic wird der erste erwachsene Mensch, der diesseits des Atlantiks mit einer Lunge voller Flüssigkeit wieder Luft bekommt.

Schonender als die künstliche Lunge

Nachdem die Ärzte einen Großteil der Lunge mit PFC gefüllt haben, führen sie dem Patienten noch Sauerstoff in die Lunge ein. Der Sauerstoff löst sich dann im PFC und kommt über die Lungenbläschen ins Blut. Allerdings muss der Patient während der ganzen Zeit im künstlichen Koma gehalten werden, denn er darf keine selbständigen Atembewegungen machen. Sonst würde er die Flüssigkeit einfach abatmen. Der große Vorteil dieser Flüssigkeitsbeatmung war nach Ansicht der Berliner Forschungsgruppe, dass der Patient nicht mit einer so genannten künstlichen Lunge beatmet werden muss. Das PFC verdunstet sehr schnell. Deshalb muss die Flüssigkeit in regelmäßigen Abständen nachgefüllt werden.

Trotz der Rettung: Forschungsprojekt gestoppt



Nach über fünf Jahren ist Murat Bulic das erste Mal wieder auf der Station

Die Behandlung hat Erfolg – schon eine halbe Stunde nachdem die Berliner Ärzte zwei Liter PFC in die Lunge des Patienten gefüllt haben, verbessert sich der Zustand des 47-jährigen deutlich. Udo Kaisers ist erleichtert, seine Entscheidung war richtig. Noch fünf Tage lang wird Sauerstoff über einen Beatmungsschlauch in die mit Flüssigkeit gefüllte Lunge gepumpt. Doch obwohl Kaisers dem Patienten mit den PFC das Leben gerettet hat, wird die Studie kurze Zeit später eingestellt: Die oberste Arzneimittelbehörde der USA hat Bedenken und stoppt die Anwendung der Perfluorocarbone. Sie sieht keinen Vorteil gegenüber konventionellen Methoden.

Bis ins Jahr 2006 jedoch hoffen Experten wie Udo Kaisers, dass sie irgendwann wieder auf PFC zurückgreifen können. Denn Murat Bulic verdankt dem einzigartigen Eingriff sein Leben. Nach über fünf Jahren hat er die Intensivstation zum ersten Mal wieder betreten – als er auf dem Gang Udo Kaisers begegnet, gibt es für ihn kein Halten mehr: „Herr Kaisers, ich weiß nicht, wie oft ich ‚Danke‘ sagen soll!“

Lesetipps

ZU: DIE BESTE LUFT DER WELT

Chemie der Atmosphäre. Bedeutung für Klima und Umwelt.

Autoren: T. E. Graedel, Paul J. Crutzen
Verlagsangaben: Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 1994
Sonstiges: ISBN 3-86025-204-6

Detailgenaue wissenschaftliche Abhandlung über die Bedeutung der Atmosphäre.

ZU: WIE DIE LUFT AUF DIE ERDE KAM

Luft

Autor: Detlev Möller
Verlagsangaben: De Gruyter Verlag, Berlin 2003
Sonstiges: ISBN 3-11-016431-0

Wissenschaftliche Abhandlung über die Entstehung der Atmosphäre.

ZU: DÜNNE LUFT UND DICKES BLUT: SPORT UND SAUERSTOFF

Nicht alle Helden tragen Gelb. Die Geschichte der Tour de France.

Autoren: Ralf Schröder, Hubert Dahlkamp
Verlagsangaben: Verlag Die Werkstatt, ISBN 389533510X
Sonstiges: 400 Seiten, Preis 24,90 €

Der Titel sagt eigentlich alles. Dieses Buch nehmen Sie nur einmal zur Hand – denn bevor nicht auch die letzte Seite gelesen ist, werden Sie es nicht mehr weglegen können. Das Buch erzählt die Geschichten, Dramen und Höhepunkte aus den ersten einhundert Jahren der Tour de France. Ein Kapitel ist auch ganz den immer wiederkehrenden Dopingdiskussionen gewidmet.

Gedopt

Autor: Willy Voet
Verlagsangaben: Sportverlag, ISBN 3328008586
Sonstiges: 144 Seiten, Preis ca. 25 €, zur Zeit vergriffen

Der ehemalige Masseur des Radsport-Profi Teams Cofidis, Willy Voet, wurde bei der Tour de France 1998 festgenommen – in seinem Auto wurden 534 Ampullen mit dem Blutdopingmittel EPO gefunden. In seinem Buch rechnet Voet mit der Radsportszene ab. Anhängern des sauberen Sports wird bei der Lektüre der Atem stocken.