

Zeitschrift:	Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber:	Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band:	87 (1969)
Heft:	38: 100 Jahre GEP
Artikel:	Plauderei eines Verfahrens-Ingenieurs über die menschliche Lunge
Autor:	Grassmann, P.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-70775

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 13.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Wie am Anfang schon ausgeführt, können Gewässerverbauungen technisch richtig, aber biologisch vollkommen falsch projektiert werden. Autostrassen können, wenn rücksichtslos erstellt, ganz natürliche Biotope, Lebensgemeinschaften oder Lebensgrundlagen der Tier- und Pflanzenwelt zerstören. Mit praktisch gleichem Aufwand lassen sie sich naturgerecht, rücksichtsvoll planen und ausführen. Anstelle von hässlichen, brutalen, hohen Betonstützmauern können abgestufte Mauern mit Zwischenbeplanzung gebaut werden, die, wenn durch einfache Massnahmen der Zementhaut entfernt wird, ein natürliches Aussehen erhalten. Anstelle von Ufermauern fügen sich Blockwürfe aus Natursteinen, wo möglich mit standorttreuen Wasser- und Uferpflanzen, harmonisch in die Landschaft ein. Oft können beim Straßenbau neue Biotope für die Wasser- und Sumpffauna und -flora geschaffen werden, indem Baggerlöcher für die Gewinnung von Kiesmaterial offen gelassen und richtig bepflanzt werden.

Dass Bauwerke und ganze Siedlungen ästhetisch einwandfrei oder hässlich gelöst, gut oder schlecht in die Landschaft eingepasst werden können, versteht sich von selbst. Auf jeden Fall ist es widersinnig,

mit grossem Aufwand für unsere Naturschönheiten in der ganzen Welt zu werben, deren Zerstörung aber freien Lauf zu lassen.

Eine Maschine, die unseren Lebensraum gefährdet, ihn mit Lärm und Abgasen erfüllt, ist unvollkommen, ja sogar schlecht, wenn sie noch so gut und rationell funktioniert. Ein Fortschritt, der unsere geistige, seelische oder leibliche Gesundheit untergräbt, ist kein Fortschritt. Von einem Menschen mit höherer Bildung sollte man erwarten können, dass er über seine beruflichen Grenzen hinaus sich der Verantwortung der Allgemeinheit und der Nachwelt gegenüber bewusst ist. Auch für den Techniker gilt es, ein Optimum, nicht unbedingt ein Maximum anzustreben.

Nach Prof. G. Grosjean ist die optimale Tragfähigkeit einer Landschaft überschritten, wenn die Industrie so überdimensioniert ist, dass sie der Landwirtschaft die nötigen Arbeitskräfte und dazu noch den Boden durch Ueberbauung entzieht und an den Rohstoffen und Energiequellen Raubbau treibt. Ein gewisses natürliches Gleichgewicht muss gewahrt werden. Der ästhetische Wert unseres Landes, einst unser Stolz und Reichtum, sinkt, ebenfalls laut Prof. Grosjean, von Jahr zu Jahr. Die

schweizerische Landschaft sei im höchsten Massen krank. Wir hätten unsere Freiheit dazu benutzt, unser kleines Land schrankenlos auszubeuten, damit sehr viel Geld verdient, das uns nun wie im Fall der Bodenpreise selber zum Fallstrick werde. Wir hätten es nun in der Hand, auf die Katastrophe zu warten oder vorher das Mass zu suchen. Wir müssten uns Beschränkung auferlegen und auch im Haushalt unserer Landschaft zu einem freiwilligen Proporz der Kräfte kommen. Ohne diese Hineinstellung in den gesamtwirtschaftlichen und geistesgeschichtlichen Rahmen sei das Problem der gefährdeten Landschaft nicht zu lösen.

Zusammenfassend darf wohl gesagt werden, dass die technischen Hochschulen sehr darauf bedacht sein müssen, keine Technokraten, sondern Menschen mit weitem Horizont auszubilden, getreu dem Leitsatz De Sanctis'.

Niemand von uns möchte wohl, dass aus unserem schönen Land, das uns zu bestmöglicher Verwaltung von Generation zu Generation anvertraut ist, ein «deserto rosso» werde.

Adresse des Verfassers: Nationalrat Jakob Bächtold, dipl. Bau-Ing., 3006 Bern, Giacomettistrasse 15.

Plauderei eines Verfahrens-Ingenieurs über die menschliche Lunge

Von Prof. Dr. P. Grassmann, Institut für kalorische Apparate, Kälte- und Verfahrenstechnik der ETH, Zürich¹⁾

DK 612.2:66.02

Ein Blick in die Vergangenheit

Meine Plauderei sei mit einem kurzen Rückblick auf die Entwicklungsgeschichte der menschlichen Lunge eingeleitet. Es ist allgemein bekannt, dass wir heute auf Grund der radioaktiven Altersbestimmung über recht genaue Zeitmassstäbe verfügen. Bild 1 zeigt diese Entwicklung nach einer Zusammenstellung von A. J. Oparin [1], einem russischen Forscher. Wichtig für die Entstehung des Lebens war, dass unsere Erde zunächst mit einer reduzierenden Atmosphäre, also ohne freien Sauerstoff, umgeben war. Sie bestand aus Wasserdampf, Ammoniak, Schwefelwasserstoff und Kohlenwasserstoffen. Wie man auch heute noch im Laboratorium nachweisen kann, bilden sich in einer solchen Atmosphäre unter der Einwirkung elektrischer Entladungen oder ultravioletten Lichts komplizierte organische Moleküle. In einer unvorstellbar langen Zeit (Milliarden von Jahren) sind schliesslich daraus jene sehr komplizierten Moleküle entstanden, die die Eigenschaft haben, in einer geeigneten Nährstofflösung sich selbst zu vermehren. Sie dürfen als Vorformen des Lebens angesehen werden. Einige davon erwarben zusätzlich die Fähigkeit zur Photosynthese und wurden so zu den Urahnen der Pflanzen.

Wir gehen einen grossen Schritt weiter. Vor rund 600 Millionen Jahren gab es vielzellige Lebewesen, gross genug, dass Abdrücke von einigen von ihnen die lange Zeit bis heute als Versteinerungen überlebt haben. Von da an lässt sich die all-

mähliche Entwicklung des Lebens lückenlos bis zu den derzeitigen hochentwickelten Formen und bis zum Menschen verfolgen.

Aber noch einmal 350 Millionen Jahre zurück in die Zeit des Devons. Die Erde trägt bereits ein üppiges Pflanzenkleid. Große Sumpfwälder aus Schachtelhalmen sind entstanden. Die ins Wasser gefallenen Pflanzenteile verwesendort und binden den Sauerstoff. Dies führt später – besonders im Karbon – zur Bildung eines Teils der Kohlenlager, die wir heute abbauen. Sie konnten sich natürlich nur in sehr sauerstoffarmen Gewässern bilden. Ähnlich wie heute durch die Gewässerverschmutzung wurde also der freie Sauerstoff in diesen Sumpfgewässern schon damals mehr und mehr aufgezehrt. Auch in dieser fernen Vergangenheit hätte dies für die im Wasser lebenden Tiere – auf dem Festland lebende Tiere gab es zu dieser Zeit noch nicht – zur Katastrophe werden können. Aber damals erstreckte sich diese Entwicklung im Gegensatz zu heute über Jahrtausende. So konnten sich die Fische den neuen Verhältnissen durch Mutation und Auslese anpassen. Bild 2 zeigt einige der Möglichkeiten, die sich so gut bewährt haben, dass Vertreter dieser Arten auch heute noch leben und im Laboratorium untersucht werden können. Wir dürfen aber annehmen, dass die Natur viel, viel mehr Möglichkeiten durchgespielt hat. Sie vermochten sich aber im Lebenskampf nicht durchzusetzen, und keine Versteinerung zeugt mehr von ihrem Dasein.

Der sehr einfache normale Blutkreislauf eines Fisches ist auf Bild 2a zu sehen. Das Herz besteht nur aus einer Vorkammer und einer Kammer ([3] S. 160). Das O₂-arme und mit CO₂ angereicherte Blut wird durch die Kiemen getrieben, wo es O₂ aus dem Wasser aufnimmt und CO₂ an dieses abgibt. Den Blutkreislauf von Vögeln und Säugetieren und natürlich auch von uns Menschen zeigt Bild 2f. Es sind sozusagen zwei Kreisläufe, die in Form einer 8 miteinander verbunden sind. Beide Kreisläufe sind insofern ideal, als nirgends O₂-reiches und O₂-armes Blut miteinander vermischt werden. Die vier anderen Kreisläufe (Bilder 2b, c, d, e) sind Übergangsformen, denen allen gewisse Nachteile des Kompromisses, des «nicht Fisch und nicht Vogel» anhaften. Allen ist gemeinsam, dass neben den Kiemen ein weiteres

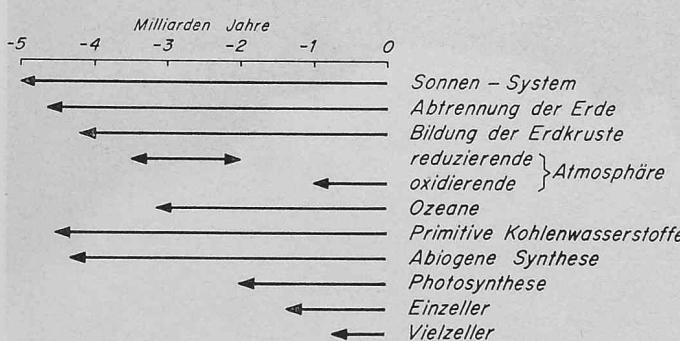
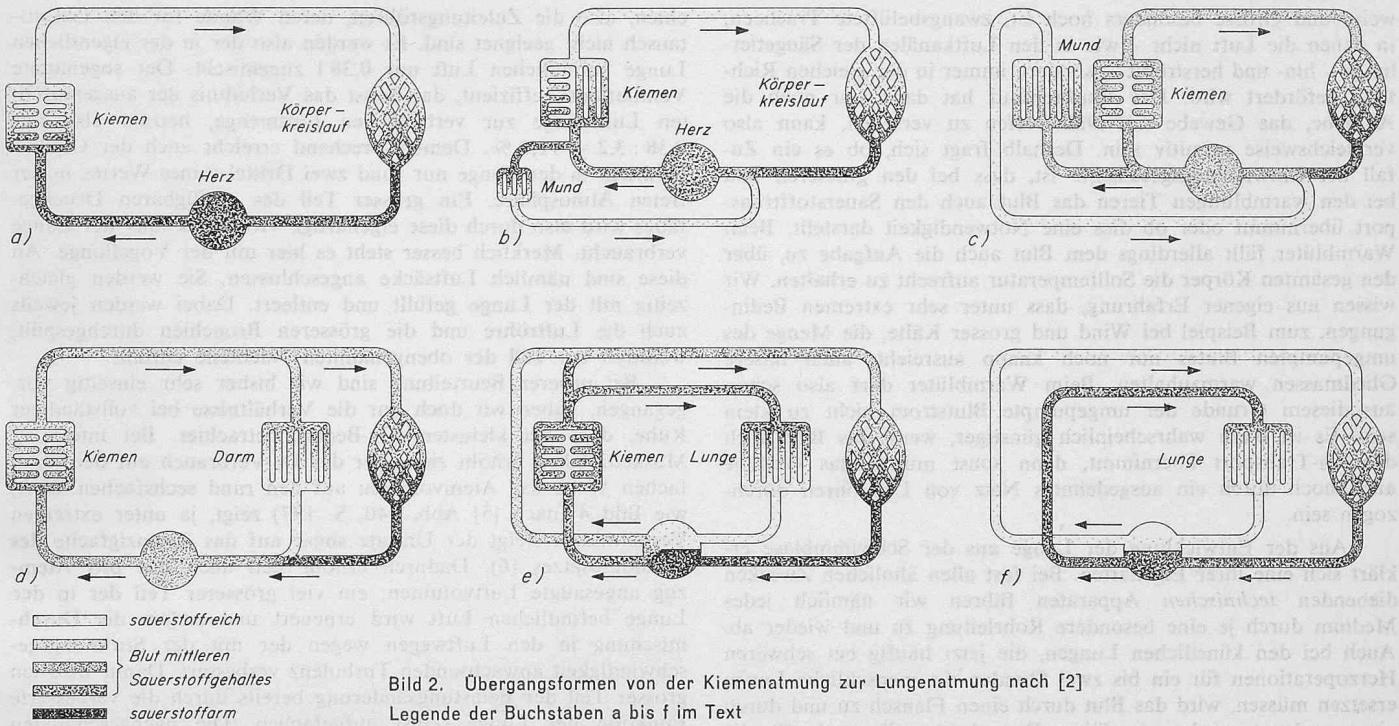


Bild 1. Wichtigste Daten der Erdgeschichte

¹⁾ Vortrag anlässlich der Generalversammlung des Schweizerischen Vereins für Kältetechnik (SVK) am 3. Juni 1969 in Schaffhausen



Organ der O₂-Aufnahme dient, aber eben nicht der O₂-Aufnahme aus dem Wasser, sondern aus der Luft, die damals (vgl. Bild 1) schon grosse Mengen freien Sauerstoffs enthielt.

Am naheliegendsten wäre es vielleicht gewesen, die Kiemen so auszustalten, dass sie auch in Luft atmen könnten. Die üblichen Lamellen der Fischkiemen kleben aber zusammen, sobald sie nicht mehr vom umgebenden Wasser getragen werden. So wurden andere, ebenfalls schon vorhandene Organe für die Luftpumfung herangezogen. Auf Bild 2b ist zu sehen, dass Blutgefäße in der Mundhöhle der Atmung dienen. Das ist nicht so besonders praktisch, denn es werden ja sehr grossflächige Organe benötigt, bei denen Blut und Luft nur durch ganz dünne Membranschichten – meist unter 1/1000 mm dick – voneinander getrennt sind. Ein solches Organ ist aber immer sehr verletzlich und anfällig gegen Infektionen. Dies aber verträgt sich schlecht mit der Hauptfunktion des Mundes, der Nahrungsaufnahme und Nahrungszerkleinerung zu dienen.

Die Natur hat weiter versucht, den Magen-Darm-Kanal für die Atmung heranzuziehen. Von unserem heutigen Standpunkt aus erscheint uns das wenig hygienisch; wäre aber die Entwicklung so gelaufen, so hätten wir uns auch daran gewöhnt und würden das sicher ganz natürlich finden. Am besten bewährt hat sich aber eine vierte Möglichkeit nach Bild 2e, bei der die Schwimmblase zum Atmungsorgan umgestaltet ist. Tatsächlich sind ja unsere Lungen entwicklungsgeschichtlich aus den Schwimmblasen hervorgegangen. Dies war einerseits insofern günstig, als mit dem Übergang vom Leben im Wasser zum Leben auf dem festen Land die Schwimmblase ohnehin arbeitslos geworden war, andererseits erklären sich daraus manche Eigenheiten unseres Atmungssystems, die uns als Ingenieure zunächst erstaunen.

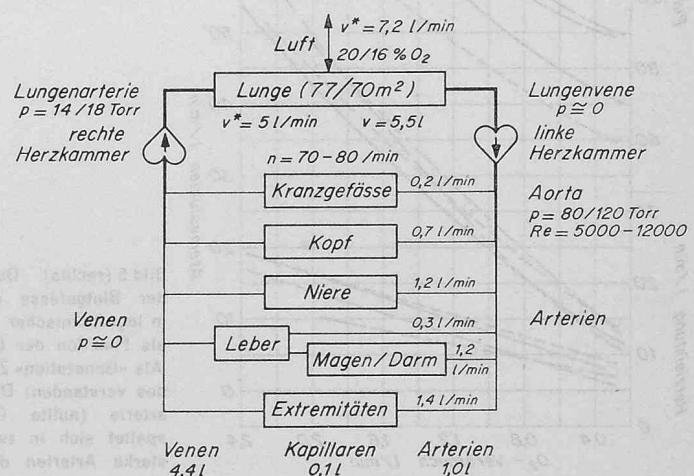
Bevor wir auf die menschliche Lunge eingehen, sei noch kurz auf einige Nachteile der gezeigten Zwischenlösungen eingegangen. Bei allen von ihnen wird das im Mund, Darm oder in der Lunge fast vollständig mit O₂ gesättigte Blut mit ungesättigtem Blut aus den Kiemen gemischt. Dies bedeutet immer einen Verlust! Es erfordert nämlich eine vergleichsweise kleine Fläche, um einem sehr O₂-armen Blut eine gewisse O₂-Menge zuzuführen. Je höher aber die Sättigung des Blutes bereits ist, eine desto grössere Fläche ist für die Übertragung weiterer O₂-Mengen erforderlich. Mischt man also weitgehend gesättigtes Blut mit ungesättigtem, so erhält man schliesslich eine Mischung, die auch mit wesentlich kleineren Austauschflächen hätte erzeugt werden können. Besonders ungünstig kann es bei Fischen werden, die nur gelegentlich an der Oberfläche Luft schnappen, aber zwischen durch ihren O₂-Bedarf mit Hilfe ihrer Kiemen aus dem Wasser decken müssen. Wenn das Wasser sehr O₂-arm ist, kann es dann

nämlich sogar vorkommen, dass die Kiemen O₂ an das Wasser abgeben.

Eigenarten der Lunge der Säugetiere und des Menschen

Bild 3 zeigt in Form eines Blockschemas den menschlichen Blutkreislauf. Die beiden Herzspitzen weisen dabei jeweils in Förderrichtung. Man erkennt den Lungenkreislauf und den Körperkreislauf. Auffallend ist die sehr gute Blutversorgung des Gehirns, dessen Masse zwar nur rund 2 % der Gesamtmasse des Körpers ausmacht, aber weit über 10 % – nach manchen Angaben 19 % – des gesamten O₂-Bedarfs des Körpers beansprucht. Das entspricht etwa einer «Anschlussleistung» von 10 W. Auch ist das Gehirn dasjenige Organ des Menschen, das neben den Koronargefäßen des Herzens am empfindlichsten auf O₂-Mangel reagiert: eine Unterbindung der Blutzufuhr von nur 3 min kann zu unheilbaren Schädigungen führen.

Durch die Lunge strömen größenordnungsmässig etwa gleich viel Luft wie Blut, nämlich beim ruhenden Menschen pro Minute rund 7 l Luft und rund 5 l Blut. 1 l Blut vermag also etwa die gleiche Menge ausnutzbaren Sauerstoffs zu befördern wie 1 l Luft. Man fragt sich also, ob es nicht einfacher wäre, den O₂ unmittelbar in Form von Luft an die Gewebe heranzubringen. Bekanntlich ist dieses Bauprinzip bei den Insekten verwirklicht, ja bei ihnen zu hoher Vollendung entwickelt. So besitzen etwa die Heuschrecken, deren O₂-Bedarf wegen ihrer aktiven Lebens-



weise und Grösse besonders hoch ist, zwangsbefüllte Tracheen, in denen die Luft nicht – wie in den Luftkanälen der Säugetierlunge – hin- und herströmt –, sondern immer in der gleichen Richtung gefördert wird. Der Blutkreislauf hat dann nur noch die Aufgabe, das Gewebe mit Nährstoffen zu versorgen, kann also vergleichsweise primitiv sein. Deshalb fragt sich, ob es ein Zufall der Entwicklungsgeschichte ist, dass bei den grösseren und bei den warmblütigen Tieren das Blut auch den Sauerstofftransport übernimmt oder ob dies eine Notwendigkeit darstellt. Beim Warmblüter fällt allerdings dem Blut auch die Aufgabe zu, über den gesamten Körper die Solltemperatur aufrecht zu erhalten. Wir wissen aus eigener Erfahrung, dass unter sehr extremen Bedingungen, zum Beispiel bei Wind und grosser Kälte, die Menge des umgepumpten Blutes nur noch knapp ausreicht, auch unsere Gliedmassen warmzuhalten. Beim Warmblüter darf also schon aus diesem Grunde der umgepumpte Blutstrom nicht zu klein sein. Es ist dann wahrscheinlich günstiger, wenn das Blut auch den O₂-Transport übernimmt, denn sonst müsste das Gewebe auch noch durch ein ausgedehntes Netz von Luftröhren durchzogen sein.

Aus der Entwicklung der Lunge aus der Schwimmblase erklärt sich eine ihrer Eigenarten. Bei fast allen ähnlichen Zwecken dienenden *technischen* Apparaten führen wir nämlich jedes Medium durch je eine besondere Rohrleitung zu und wieder ab. Auch bei den künstlichen Lungen, die jetzt häufig bei schweren Herzoperationen für ein bis zwei Stunden die menschliche Lunge ersetzen müssen, wird das Blut durch einen Flansch zu und durch einen anderen wieder abgeführt. Das gleiche gilt auch für die Luft, die einen solchen Apparat ebenfalls kontinuierlich von der einen Seite zur andern durchströmt. Durch die menschliche Lunge strömt zwar das Blut einigermassen kontinuierlich hindurch, aber die Luft wird durch dasselbe Rohr – eben die Luftröhre – zunächst eingearbeitet und wieder ausgeatmet. Die Lunge besitzt also insgesamt nur *drei* Anschlüsse, sie ist – um es in der Sprache der Technik auszudrücken – ein Dreiflanschapparat.

Wenn wir uns nicht dauernd davon überzeugen würden, dass sie doch im grossen und ganzen recht befriedigend arbeitet, wären wir erstaunt, dass eine solche Konstruktion überhaupt funktioniert. Beim ruhigen Atmen wird nämlich nur ein kleiner Teil des Lungeninhalts ausgewechselt. Nach mässig tiefem Ausatmen [5] bleiben etwa 3,2 l Luft in der Lunge. Anschliessend werden dann etwa 0,5 l eingearbeitet. Von diesen füllen aber 0,12 l den sogenannten schädlichen Raum, das ist Luftröhre und Bron-

chien, also die Zuleitungsrohren, deren Wände für den Gasaus tausch nicht geeignet sind. Es werden also der in der eigentlichen Lunge befindlichen Luft nur 0,38 l zugemischt. Der sogenannte Ventilationskoeffizient, das heisst das Verhältnis der ausgetauschten Luftmenge zur verbliebenen Luftmenge, beträgt also nur $0,38 : 3,2 = 11,8\%$. Dementsprechend erreicht auch der O₂-Partialdruck in der Lunge nur rund zwei Drittel seines Wertes in der freien Atmosphäre. Ein grosser Teil des verfügbaren Druckgefälles wird also durch diese eigenartige «Konstruktion» der Lunge verbraucht. Merklich besser steht es hier mit der Vogellunge. An diese sind nämlich Luftsäcke angeschlossen. Sie werden gleichzeitig mit der Lunge gefüllt und entleert. Dabei werden jeweils auch die Luftröhre und die grösseren Bronchien durchgespült, wodurch ein Teil der obengenannten Nachteile entfällt.

Bei unserer Beurteilung sind wir bisher sehr einseitig vorgegangen, haben wir doch nur die Verhältnisse bei vollständiger Ruhe, d. h. bei kleinstem O₂-Bedarf betrachtet. Bei intensiver Muskeltätigkeit erhöht sich aber der O₂-Verbrauch auf den achtfachen Wert, das Atemvolumen auf den rund sechsfachen Wert, wie Bild 4 (nach [5] Abb. 140, S. 197) zeigt, ja unter extremen Verhältnissen steigt der Umsatz sogar auf das Zwanzigfache des Grundumsatzes [6]. Dadurch erhöht sich auch das pro Atemzug angesaugte Luftvolumen; ein viel grösserer Teil der in der Lunge befindlichen Luft wird erneuert und zudem die Durchmischung in den Luftwegen wegen der mit der Strömungsgeschwindigkeit anwachsenden Turbulenz verbessert. Damit wird ein grosser Teil der Belastungsänderung bereits durch die verbesserte Funktion der Lunge selbst aufgefangen. Die nachgeschalteten Körperfunktionen können deshalb leichter der Belastungsschwankung angepasst werden.

Optimierungsprinzipien

Wenn der Verfahrensingenieur eine Anlage entwickelt, so beginnt er meist mit dem Schaltungsplan, d. h. er überlegt sich, wie die verschiedenen Stoffflüsse nacheinander durch die einzelnen Apparate geleitet werden sollen. Von diesem Standpunkt aus haben wir bisher auch die menschliche Lunge betrachtet. Anschliessend sucht der Fachmann dann die Anlage zu optimieren, d. h. alle Abmessungen so zu wählen, dass die Wirtschaftlichkeit maximal wird. Wir wenden uns also nunmehr der Frage zu: Wie gut ist die menschliche Lunge optimiert?

Optimierungsprinzipien im Organismus wurden schon Anfang dieses Jahrhunderts vom Zürcher Physiologen und Nobelpreisträger Hess untersucht [7]. Er wies zum Beispiel darauf hin,

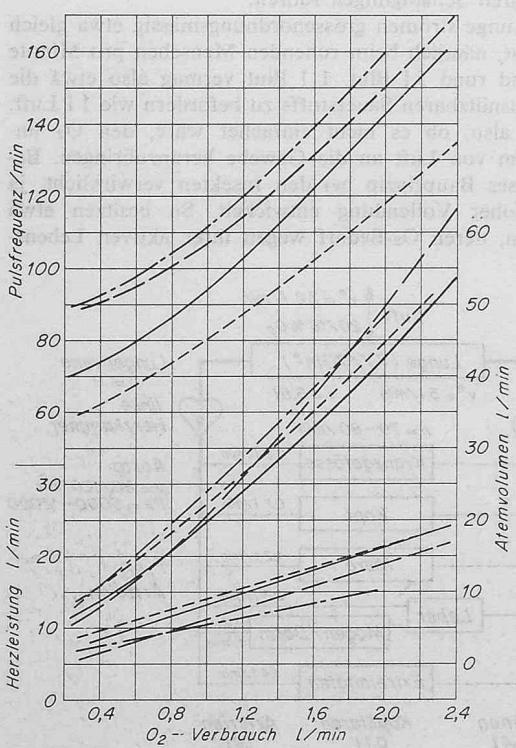
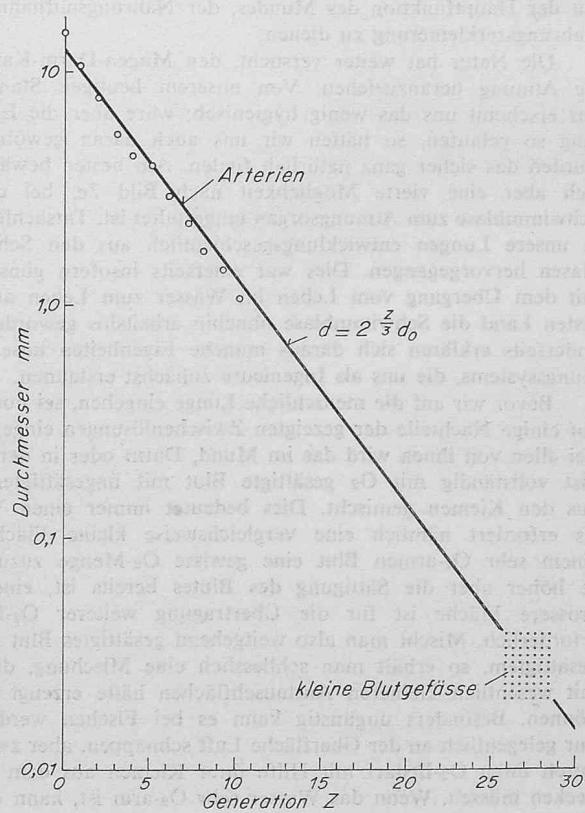


Bild 4 (links). Anpassung des menschlichen Körpers an den gesteigerten O₂-Bedarf bei zunehmender Leistung. Die je vier für Herz-Minutenvolumen (= Förderleistung des Herzens in l/min), Atemvolumen und Pulsfrequenz eingezeichneten Kurven beziehen sich auf vier verschiedene Versuchspersonen. Nach [5]

Bild 5 (rechts). Durchmesser der Blutgefäße der Lunge in logarithmischer Auftragung als Funktion der Generation. Als «Generation» Z ist folgendes verstanden: Die Lungenarterie (nullte Generation) spaltet sich in zwei gleichstarke Arterien der ersten, diese wieder in je zwei Arterien der zweiten Generation usw. Nach [8]



dass bei der Verzweigung von Blutgefäßen das $2^{1/3}$ -Gesetz befolgt wird. Es besagt folgendes: Spaltet sich eine Ader in zwei gleich starke Äste auf, so verhält sich der Durchmesser des Stammes zu dem der Äste wie $2^{1/3} : 1 = 1,26 : 1 = 1 : 0,8$. Als Ingenieur nimmt man dieses Zahlenverhältnis gerne zur Kenntnis, entspricht es doch fast genau der DIN-Normreihe mit dem Modul 10, d. h. $10^{1/10}$. Dies ist aber sicher nicht der Grund, warum sich die Natur an dieses Gesetz hält. Er dürfte vielmehr in einer der beiden folgenden Tatsachen liegen:

1. Bei Einhaltung dieses Gesetzes ergibt sich bei ausgebildeter laminarer Strömung, vorgegebenem Gesamtvolumen und Leitungslänge ein minimaler Druckabfall.
2. Bei Einhaltung dieses Gesetzes ist die Schubspannung an der Wand des Hauptgefäßes gleich derjenigen an den Wänden der Zweiggefäße.

Ich vermute, dass die Natur auf Grund des zweiten Prinzips optimiert, denn erfahrungsgemäß erweitert sich der Querschnitt eines Blutgefäßes sehr rasch, wenn durch Ausfall eines benachbarten Gefäßes der Blutstrom in ihm stark ansteigt. Es erweitert sich solange, bis es sich dem vergrößerten Blutstrom angepasst hat, d. h. bis die Wandschubspannung dem Normalwert entspricht.

Wie genau dieses $2^{1/3}$ -Gesetz für die Blutgefäße der Lunge erfüllt ist, zeigt nach Messungen des Berner Anatomen E. R. Weibel [8] Bild 5. Auch die Durchmesser der Luftgefäße der Lunge befolgen weitgehend dieses Gesetz.

Ich habe vorhin von «Wirtschaftlichkeit» gesprochen. Man fragt sich, wieso dieser Begriff überhaupt auf das organische Leben übertragen werden darf, denn der Organismus als eine Ganzheit trägt ja seinen Sinn in sich und steht damit außerhalb jeder Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Innerhalb des Organismus dient jeder Teil, jedes Organ dem Ganzen und das Ganze jedem seiner Teile. Alles ist geordnet, nicht starr wie die Atome im Kristall, sondern im wahrsten Sinn des Wortes organisch, jedem Teil die Freiheit der Entfaltung belassend, solange es sich ins Ganze fügt.

So sucht jedes Organ die ihm zufallende Aufgabe mit kleinstem Aufwand, das heißt kleinstem Verbrauch an Nährstoffen, zu erfüllen. Hier finden wir einen Ansatzpunkt zu einer Betrachtung, die manche Ähnlichkeit mit den uns gewohnten Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen aufweist. Der Verbrauch an Nährstoffen setzt sich nämlich aus zwei Teilbeträgen zusammen:

1. dem Grundumsatz, den das Organ benötigt, um sich am Leben zu erhalten, auch wenn es keine Arbeit verrichtet,
2. dem zusätzlichen Umsatz bei Arbeitsleistung.

Natürlich vermag sich ein Organismus um so leichter im Lebenskampf durchzusetzen, je kleiner bei vorgegebener Leistung die Summe dieser beiden Beträge ist, denn um so kleiner ist sein Nahrungsbedarf. Diese Summe ist also die Zielfunktion, die minimiert werden soll. Das ist aber eine Aufgabe, die derjenigen sehr ähnlich ist, die sich uns bei der wirtschaftlichen Optimierung einer Anlage stellt. In diesem Fall sind es die gesamten Produktionskosten, die minimiert werden sollen. Auch diese setzen sich im wesentlichen aus zwei Anteilen zusammen:

1. den Amortisationskosten, die ebenso wie der obengenannte Grundumsatz eines organischen Gewebes unabhängig davon sind, ob die Anlage produziert oder nicht,

2. den Energiekosten, die mit der Produktion der Anlage ansteigen.

Velleicht darf ich die Art, wie solche wirtschaftlichen Optimierungen in der Praxis durchgeführt werden, kurz ins Gedächtnis zurückrufen. Wollen wir etwa den wirtschaftlichsten Durchmesser einer Rohrleitung bestimmen, so gehen wir folgendermassen vor: für etwa 3 oder 4 Durchmesser berechnen wir die Summe der jährlichen Amortisations- und Energiekosten. Die so erhaltene Kurve für die Gesamtkosten ergibt dabei ein Minimum, denn die Amortisationskosten wachsen höchstens proportional mit dem Rohrquerschnitt an. Die Energiekosten – in diesem Fall gegeben durch die Leistung der Pumpe, mit der die vorgegebene Flüssigkeitsmenge durch das Rohr gedrückt werden muss – werden bei kleinem Durchmesser, wegen des dann sehr hohen Druckabfalles, sehr hoch. So lässt sich zu jedem vorgegebenen Mengenstrom die wirtschaftlichste Rohrweite bestimmen.

Bei der Lunge stellt sich die Frage nun allerdings gerade umgekehrt: Die Rohrweiten der Luftkanäle sind – zum Beispiel durch die mit aller Präzision durchgeföhrten Messungen von Weibel – bekannt. Daraus lässt sich derjenige Luftdurchsatz berechnen, für den die Lunge optimiert ist. In diese Rechnung gehen nun allerdings zwei Größen ein, die erst ungefähr bekannt sind. Das ist einerseits der Grundumsatz der Lunge, anderseits die energetische Wirkungsgerade der Rippen und Zwerchfellmuskulatur. Setzt man hiefür die derzeit wahrscheinlichsten Werte ein, so ergibt sich nach den Rechnungen von G. Bachy [9], dass die menschliche Lunge für leichte Arbeit optimiert ist.

Vergleich mit technischen Austauschern

Die eben genannten Messungen von Weibel haben auch ergeben, dass die zu drei Vierteln gefüllte menschliche Lunge auf der Luftseite eine Austauschfläche von rund 77 m^2 , auf der Blutsseite von rund 70 m^2 aufweist. Diese recht beachtliche Fläche ist auf einen Raum von nur 5 l untergebracht. Vergleichen wir das mit Wärmeaustauschern konventioneller Bauart! Da würde ein Wärmeaustauscher mit 77 m^2 Fläche aus Rohren $10 \times 12 \text{ mm}$ einen Raum von rund $0,8 \text{ m}^3$ beanspruchen und rund 1 t wiegen. In letzter Zeit ist es allerdings gelungen, hier noch etwas weiter zu miniaturisieren, als es der Natur bisher möglich war. Austauscher aus feinen Kunststoffkapillaren mit einem Aussendurchmesser von $50 \mu\text{m}$ bei einer Wandstärke von $13 \mu\text{m}$ ermöglichen es ebenfalls, eine Austauschfläche von 77 m^2 auf einen Raum von rund 5 l unterzubringen.

Reinhaltung der Lunge

Wenn wir für irgend einen technischen Zweck ein so fein unterteiltes, oberflächenreiches Gebilde schaffen würden, wie es die menschliche Lunge darstellt, würde es wohl sehr bald durch Verschmutzung unbrauchbar. Wie vermag die menschliche Lunge fast 100 Jahre funktionstüchtig zu bleiben?

Natürlich wird bei normaler Atmung die Luft an den ausgedehnten Schleimhäuten der Nase gereinigt, aber schon, wenn wir durch den Mund atmen, kommt sicher Staub in die Lunge. Dieser wird auf zwei Arten dauernd entfernt:

1. In den Wänden der grösseren Luftgefäße und besonders auch der Lufröhre befinden sich Zellen mit Wimpern oder Ci-

Bild 6. Operation mit einer Herz-Lungen-Maschine (etwa in Bildmitte)

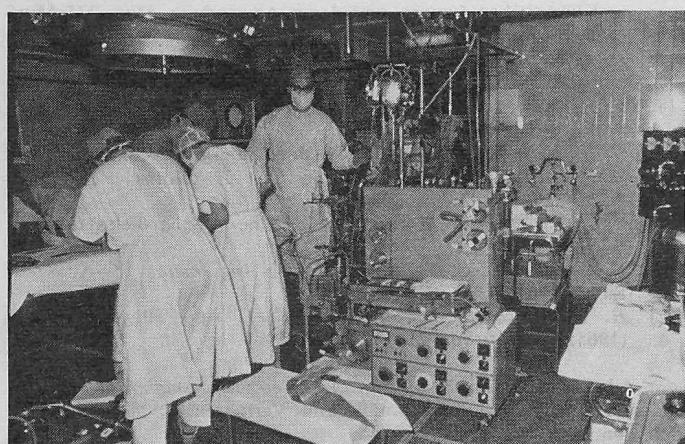
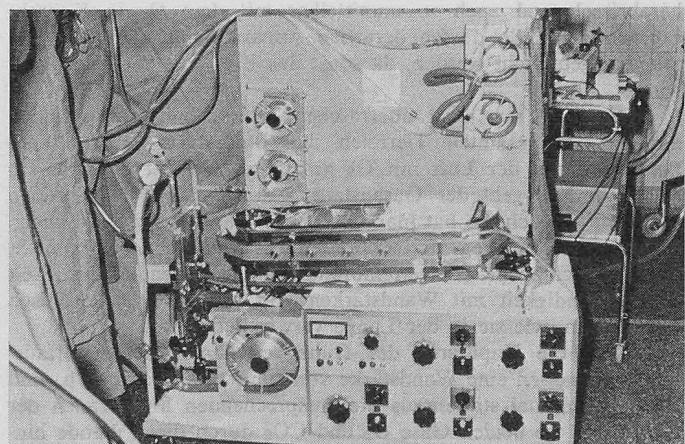


Bild 7. Herz-Lungen-Maschine



- lien [11], deren rhythmischer Schlag die Fremdkörper langsam nach aussen trägt.
2. Verfügt der Körper über weisse Blutkörperchen, die von den Lungenbläschen die Luftwege bis zur Mundhöhle hochwandern, und dabei diese als «Strassenkehrer» von Fremdkörpern reinigen ([5] S. 29).

Funktion der Lunge unter extremen Bedingungen

Wäre die Funktion eines Organs in allen Einzelheiten bekannt, so liesse sich ohne Versuche voraussagen, wie es sich unter stark geänderten Bedingungen verhalten wird. Für die Lunge ergeben sich solche stark geänderten Bedingungen zum Beispiel beim Tauchen, wenn der Druck des Wassers nicht durch eine Panzerung abgefangen, sondern der Taucher unmittelbar dem erhöhten Druck ausgesetzt wird. Würde man ihn dann entsprechend komprimierte Luft atmen lassen, so würde das zu einer ganzen Reihe schwerwiegender Störungen führen. Der O₂-Haushalt des Körpers würde aus dem Gleichgewicht gebracht und der N₂ sich im Blute lösen. Bei der Dekompression würde sich der N₂ in Form feiner Gasbläschen aus dem Blut ausscheiden, ähnlich wie sich CO₂-Bläschen bilden, wenn man eine Mineralwasserflasche öffnet. Im Blutkreislauf kann eine solche Gasausscheidung zu einer Embolie und damit zum Tode führen. Um diese Schwierigkeit zu vermeiden, müssen Gasmischungen mit anderer Zusammensetzung als der der Luft gewählt werden, vor allem ist der O₂-Gehalt des Gases stark zu verringern und der N₂ zum Beispiel durch Helium zu ersetzen. Bekanntlich ist in der Schweiz durch H. Keller und im Druckkammerlabor des Kantonsspitals Zürich unter der Leitung von Prof. Dr. A. Bühlmann hierüber wertvolle Arbeit geleistet worden [12]. Wir kennen die Lunge nicht gut genug, um von vorneherein den Erfolg gewisser Massnahmen angeben zu können, d. h. wir sind immer noch auf lange Versuchsreihen angewiesen. Jedoch ermöglichen es unsere Kenntnisse der Lungenfunktion, derartige Versuche sinnvoll und zielstrebig anzusetzen.

Die künstliche Lunge

Bei schweren Herzoperationen, besonders bei den jetzt publik gewordenen Herztransplantationen, wird der Blutkreislauf für einige Stunden durch eine Herz-Lungen-Maschine aufrechterhalten (Bild 6, Operation mit Herz-Lungen-Maschine; Prof. Dr. Senning, Kantonsspital Zürich). Wie schon der Name sagt, besteht ein solcher Apparat aus einer Pumpe, die das Herz ersetzt, und einem Austauschapparat, der die Funktion der Lunge übernimmt. Das sagt sich recht einfach; die technische Verwirklichung ist aber schwierig (Bild 7, Herz-Lungen-Maschine). Blut ist nämlich ein ganz besonderer Saft. Zu 45 Vol % besteht es aus Blutkörperchen, stark spezialisierten Zellen, also aus lebender Substanz. Eine solche Flüssigkeit muss äußerst schonend behandelt werden ([6] S. 32, 37 ff.). Wollten wir zum Beispiel eine der üblichen Flüssigkeiten mit O₂ sättigen, so würden wir diesen unmittelbar in sie einleiten. Das wird zwar auch bei einigen der künstlichen Lungen so gemacht, aber es ergeben sich zwei Schwierigkeiten:

1. Es bleiben leicht feinste Gasbläschen im Blut, die zu Embolien führen können.
2. An der Phasengrenzfläche werden die Blutkörperchen zerstört und die im Blutplasma befindlichen Eiweiße denaturiert.

Die zuletzt genannte Schwierigkeit tritt auch bei Apparaturen auf, bei denen das Blut als dünner Film über ausgedehnte Flächen herabrieselt und auch so unmittelbar mit dem O₂ in Kontakt gebracht wird. So dürfen derartige Apparate nur maximal zwei Stunden gebraucht werden, da sonst das Blut zu stark geschädigt würde.

Dies darf uns nicht überraschen! Tatsächlich wird nämlich nirgends im gesamten Tierreich das Blut durch unmittelbare Berührung mit der Luft mit O₂ gesättigt. Dazu ist es nicht geeignet! Immer geht der Gasaustausch durch dünne Membranen hindurch vor sich. So hat man auch beim Bau künstlicher Lungen versucht, diesen Weg zu beschreiten. Es war aber bisher nicht möglich, Schläuche oder Membranen von genügender Festigkeit und Beständigkeit mit Wandstärken von nur 0,6 μm technisch herzustellen, wie sie in der Lunge verwirklicht wird.

Auch die Kapillaren des früher erwähnten Kunststofftauschers weisen eine Wandstärke von rund 13 μm auf, d. h. sind über zwanzigmal stärker als die entsprechenden Membranen der Lunge. Da die beiden Gase O₂ und CO₂ durch diese Wände hin-

durch diffundieren müssen und der Widerstand für diese Diffusion der Wanddicke proportional ist, geht der Austausch durch diese Kapillarwände viel langsamer vor sich als unter vergleichbaren Verhältnissen in der Lunge. Dieser Nachteil lässt sich teilweise dadurch ausgleichen, dass man als O₂-Lieferant nicht atmosphärische Luft mit 21 Vol % O₂ wählt, sondern ein Gas mit viel höherem O₂-Gehalt verwendet.

Ferner sind selbst die an sich sehr glatten Kunststoffoberflächen für das sehr empfindliche Blut immer noch zu rauh, d. h. die Blutkörperchen leiden, offenbar durch «Abscheuern» an der Wand, Schaden. So eröffnet sich hier noch ein weites Arbeitsgebiet der medizinischen Technik.

Abschliessende Betrachtungen

Es dürfte wenige Gebiete geben, wo «Mensch und Technik» sich so unmittelbar durchdringen und gegenseitig befrieten wie im Bereich der Bionik und der biomedizinischen Technik, von denen ich hier einen kleinen Ausschnitt zeigen durfte. Auch unsere kompliziertesten technischen Gebilde wirken einfach und plump, wenn wir sie mit den Strukturen des Lebens vergleichen: Eine Mondrakete ist aus einigen Millionen Einzelteilen zusammengesetzt, der Mensch besteht aber aus 10¹³ bis 10¹⁴ Zellen ([11] S. 19). Dabei dürfte jede dieser Zellen um ein Vielfaches komplizierter sein als die Einzelteile einer Mondrakete. Das Leben begann mit winzigen Gebilden molekularer Größenordnung, um sich durch Aufbau schliesslich zu den im Vergleich zur einzelnen Zelle riesigen Organismen, wie sie heute die Welt bewohnen, zu entwickeln. Die Technik begann mit vergleichsweise groben Gebilden und versucht erst jetzt durch Miniaturisierung möglichst viele Funktionen auf engstem Raum zu vereinigen. So treffen sich beide heute auf einer mittleren Größenordnung. Der Vergleich, wie in beiden Bereichen die oft sehr ähnlichen Ziele erreicht werden, erweist sich für beide Gebiete als äußerst fruchtbar. Das Leben hat in der unvorstellbar langen Zeit von etwa einer Milliarde Jahren durch Mutation und Auslese, durch Versuch und Verwerfung die heute lebenden Organismen entwickelt, mit ihrer ungeheuer feinen Abstimmung jeder Einzelheit auf das Ganze, mit ihrer immer wieder in hartem Daseinskampf bewährten Organisation. Für die Entwicklung der modernen Technik stand nur eine rund zehn Millionen mal kürzere Zeit zur Verfügung. Aber sie ersetzte den Weg der Empirie, des Versuchs und der Verwerfung, der «trials and errors» durch planvolles, zielgerichtetes Fortschreiten, so dass sie ungleich schneller die ihr gemässen Ziele erreichen konnte. So ist die Rolle von Leben und Technik vergleichbar der des alten Empirikers und des jungen, wissenschaftlich geschulten Ingenieurs. Möge ihre Zusammenarbeit zu einer fruchtbaren Synthese führen!

Literaturverzeichnis

- [1] A. I. Oparin: Genesis and Evolutionary Development of Life, Academic Press, New York 1968.
- [2] K. Johansen: Air-breathing Fishes, «Scientific American» 219 (Oct. 1968), S. 102–111.
- [3] W. v. Buddenbrock: Vergleichende Physiologie, Bd. VI Blut und Herz, S. 160. Basel 1967, Birkhäuser Verlag.
- [4] P. Grassmann: Verfahrenstechnik und Medizin, «Chem. Ing. Techn.» 40 (1968), S. 1094–1100.
- [5] M. Schneider: Physiologie des Menschen, 15. Aufl., Berlin 1966, Springer Verlag, S. 193.
- [6] G. H. Marx: Verfahrenstechnische Grundvorgänge in natürlichen und künstlichen Lungen und deren Anwendung. Diss. TH München 1969.
- [7] Zur Literatur vgl. zum Beispiel P. Grassmann: Verfahrenstechnik und Biologie, «Chem. Ing. Techn.» 39 (1967), S. 1217–26.
- [8] E. R. Weibel: Morphometry of the Human Lung. Berlin 1963, Springer Verlag.
- [9] G. Bachy: Verfahrenstechnische Berechnungen zur menschlichen Lunge, Diplomarbeit 1966 am Institut für kalorische Apparate, Kälte- und Verfahrenstechnik der ETH.
- [10] Vgl. zum Beispiel «Du Pont Magazine» Januar-Februar 1969, S. 29–31.
- [11] Vgl. zum Beispiel G. Vogel und H. Angermann: dtv-Atlas zur Biologie, München 1967, S. 33.
- [12] H. Keller und A. A. Bühlmann: «J. Appl. Physiology» 20 (1965), 1267/70 und 23 (1967), S. 458.

Adresse des Verfassers: Prof. Dr. Peter Grassmann, Institut für Kalorische Apparate, Kältetechnik und Verfahrenstechnik, ETH Zürich, Sonneggstrasse 3, 8006 Zürich.