

# IV. Studien über die Pathophysiologie der Atmung bei der Silikose

## Die Lungenfunktion im Arbeitsversuch

Von

P. H. ROSSIER und A. BÜHLMANN

Im Bestreben, die Wirkung körperlicher Arbeit auf den menschlichen Organismus, seine Leistungsfähigkeit und seine Regulationsmechanismen zu studieren und um der Forderung der sozialen Versicherungen nach möglichst präzisen Angaben der Arbeitsfähigkeit gerecht zu werden, sind die verschiedensten Belastungsversuche entwickelt worden. Man ist immer wieder zu dem Schluss gekommen, dass das Studium des Gaswechsels unter Arbeitsbedingungen den tiefsten Einblick in die sehr komplexen Vorgänge gestattet. Alle Methoden der Arbeitsphysiologie führen schliesslich zur Spirometrie im weitesten Sinne. Diese ist anfänglich, namentlich in Deutschland, durch KNIPPING

und seine Schule entwickelt worden, während die skandinavischen und angelsächsischen Forscher den Blutgasuntersuchungen bei Belastung grössere Bedeutung zumessen. Als Arbeitsinstrument haben sich das Fahrrad- und das Kurbel-Ergometer am besten bewährt, weil sie gegenüber anderen Belastungsmethoden, wie Schnellauf, Treppensteigen, laufendes Band usw., die konstanteren Versuchsbedingungen, eine quantitativ genau dosierbare Belastung und dementsprechend besser vergleichbare Werte geben. Training und individuelle Geschicklichkeit spielen bei dieser Dreharbeit mit den Armen oder Beinen eine kleinere Rolle als bei anderen. Es ist immer wichtig, dass eine bestimmte, grössere Muskelgruppe dosierbar belastet wird und energieverbrauchende Mit- und Nebenbewegungen weitgehend ausgeschaltet werden.

Um den Gaswechsel zu bestimmen, wird der Douglassack oder das Spirometer benutzt. Die Sackmethode erlaubt eine resistenzarme Atmung, und weil nur die Expirationsluft aufgefangen wird, bietet die Konstanz der eingeatmeten Zimmerluft einen grossen Vorteil. Zudem ist die Versuchsperson nicht an einen Ort gebunden. Um aber genaue und länger dauernde Versuche machen zu können, müsste man mit sehr grossen und mehreren Säcken arbeiten. Das Spirometer hingegen, das wegen seiner Vorteile der direkten Volumenregistrierung gern benutzt wird, bedarf für den Arbeitsversuch komplizierter Anpassungen, wenn dieser physiologisch bleiben soll. Für die Blutgasanalysen wird entweder eine Arterie punktiert oder der Sauerstoffgehalt des Kapillarblutes elektrophotometrisch bestimmt, was eine laufende Kontrolle erlaubt (J. GEORG, J. FROST und J. GEORG). Die methodischen Schwierigkeiten der Blutgasbestimmungen beim Arbeitsversuch haben die deutsche Schule veranlasst, sich auf die Spirometrie zu beschränken. Grössere Versuchsreihen, die das Aufstellen von Standardzahlen ermöglicht haben (z. B. die Arbeiten von ED. JÉQUIER-DOGE), wurden bisher auch nur mit der rein spirometrischen Methode gemacht. Die Beurteilungskriterien dieser Arbeitsversuche sind dementsprechend das maximale Sauerstoffaufnahmevermögen, das spirographische Sauerstoffdefizit, die spezifische Ventilation, die Sauerstoffschuld, der Wirkungsgrad, das Verhältnis der Ventilation während der Arbeit zu den in Ruhe festgestellten Atemreserven sowie die Anpassungs- und Erholungszeit. Die bisherigen Ergebnisse der Blutuntersuchungen beim Arbeitsversuch betreffen nur Einzelversuche. Meistens wurde nur der Sauerstoff- und Kohlen säuregehalt analysiert. D. P. BARR und Mitarbeiter untersuchten auch das pH und die Milchsäurekonzentration. Infolge der verschiedenen Methodik sind eindeutige und übereinstimmende Ergebnisse selten, dafür die Hypothesen und Theorien zahlreich. Die eine Gruppe von Forschern wie unter anderem CH. LUNDSGAARD und E. MÖLLER, L. CHALMERS und X. GEMILL beschreiben im «steady state» eine leichte Sauerstoffuntersättigung im arteriellen Blut durch eine Verschiebung der Sauerstoffdissoziationskurve infolge einer Milchsäureazidose, andere Autoren hingegen wie G. BIRATH und J. GEORG fanden eine Erhöhung der Sauerstoffsättigung infolge einer alveolären Hyperventilation mit Erhöhung des Sauerstoffpartialdruckes. Bei erschöpfender Arbeit kommt es immer zu einer schweren arteriellen Sauerstoffuntersättigung und

Azidose, wie es auch in unserem Laboratorium die Versuche von E. MEILI bei Kurzstreckenschwimmern gezeigt haben.

Kreislauf und Atmung sind funktionell eng verbunden. Darum erlauben die spirometrischen Untersuchungen in Verbindung mit den Blutgasanalysen, sowie die Kontrolle der Pulsfrequenz und des Blutdruckes auch weitgehende Rückschlüsse auf Herz und Kreislauf. Es gilt die allgemeine Regel, dass sich eine Kreislaufinsuffizienz bei Belastung viel stärker auswirkt als eine pulmonale und auch schneller zum Versagen führt.

Wir müssen grundsätzlich zwei Arbeitsweisen beim Arbeitsversuch unterscheiden. Erstens die erschöpfende Arbeit, zweitens die Arbeit im steady state, die nur durch die natürliche Ermüdung der Muskulatur ihre zeitliche Begrenzung findet. Als Beispiel für erschöpfende Arbeit gilt unter anderem ein Hundertmeterlauf oder 50 Meter Schwimmen. Derartige kurzfristige Belastungen können in Apnoe bewältigt werden, die Ventilationssteigerung beginnt erst nach Arbeitsende, erst während der Erholung wird der Sauerstoff aufgenommen, der für die Energiegewinnung verbraucht worden ist. Bei einer Arbeit im steady state ist nach Arbeitsende die allmähliche Rückkehr der Ventilation, der Sauerstoffaufnahme sowie der Pulsfrequenz charakteristisch. Da bei körperlicher Arbeit in erster Linie Kohlehydrate verbrannt werden, steigt der respiratorische Quotient gegen 1. Das ist für die Ventilation und für die alveoläre Gaszusammensetzung nicht ohne Bedeutung, weil bei einem respiratorischen Quotienten von 1 die in der Lunge aufgenommene Sauerstoffmenge relativ kleiner wird als bei einem normalen Quotienten von 0,82. Natürlich ist beim Menschen wie auch bei der bestkonstruierten Maschine der Energieverbrauch bedeutend grösser als es dem Kalorienwert der geleisteten Arbeit entspricht. Der Nutzeffekt, um beim Vergleich mit der Technik zu bleiben, schwankt beim Erwachsenen je nach Grösse der körperlichen Arbeit zwischen 15 und 30 %. Ein günstiger Nutzeffekt kann Ausdruck einer rationellen Arbeitsweise, d. h. Vermeiden von unproduktiven Mit- und Nebenbewegungen sein. Definitionsgemäss sind im steady state der Sauerstoffaufnahme auch die Lungenventilation und das Herzminutenvolumen angepasst. Das gilt jedoch nur für den gesunden Menschen. Während der Nutzeffekt für eine bestimmte Arbeit immer ungefähr gleich bleibt, so können Ventilation und Kreislauf je nach individuellen und vor allem pathologischen Lungen- und Kreislaufveränderungen stark wechseln. Das optimale Verhältnis wird bei pathologischen Zuständen mehr oder weniger weit verlassen. Wird z. B. die Ventilation zu klein und sinkt damit der alveoläre Sauerstoffpartialdruck, so kommt es zu einer manifesten im arteriellen Blute nachweisbaren Insuffizienz im Sinne einer mangelhaften Arterialisierung. Andererseits kann in einem pathologischen Falle das Blut normale Verhältnisse aufweisen, das aber nur dank einem zum Sauerstoffverbrauch bzw. zur Arbeitsgrösse unverhältnismässig grossen Aufwand an Atmung, ein Zustand, der subjektiv als Dyspnoe empfunden wird. Diese pathophysiologischen Zustände zu erfassen, ist schliesslich der Sinn unserer Arbeitsversuche. Um über die Art der Anpassung, die Atemökonomie, über das Entstehen einer manifesten oder latenten Insuffi-

zienz etwas aussagen zu können, müssen wir einen Arbeitsversuch im steady state durchführen, weil wir dann den Versuch zeitlich ausdehnen können und vernünftige Mittelwerte bekommen. Die Schwierigkeit liegt hier in der Bestimmung der oberen Belastungsgrenze eines Patienten, die für die Beurteilung der Arbeitsfähigkeit von Interesse wäre.

Wir haben daher folgende Versuchsanordnung eingeführt. In jedem Fall wird vorher ein Ruheversuch, wie wir ihn in früheren Arbeiten beschrieben haben, gemacht, damit uns die Lungenfunktionsverhältnisse des Patienten, den wir belasten wollen, nicht unbekannt sind. Dann wird in einem orientierenden Vorversuch auf dem Fahrradergometer ohne Atemmaske und ohne Arterienpunktion nur unter Pulskontrolle und Beobachtung der Atmung die obere Belastungsgrenze approximativ bestimmt, gewissermassen abgetastet, indem der Patient erst einmal das ihm mögliche Maximum kurzfristig arbeitet. Er reduziert dann von sich aus die Arbeit bis zu der ihm möglichen Dauerbelastung. In einem zweiten oder dritten Anlauf wird noch einmal kontrolliert, ob diese Dauerbelastung noch etwas vergrößert werden kann, bleibt sie einigermaßen konstant, wobei Simulation durch eine sinnreiche Vorrichtung ausgeschaltet oder wenigstens erschwert werden kann, so wird der eigentliche Arbeitsversuch entweder nach einer längeren Erholungspause oder am nächsten Tag mit dieser Belastung durchgeführt. Zu Beginn werden Puls und Atmung in Ruhe auf dem Fahrradergometer sitzend während ca. 3 bis 5 Minuten bestimmt. Dann beginnt der Explorand zu treten und erreicht in wenigen Sekunden die vorgeschriebene Wattzahl. Er bleibt mindestens 10 Minuten dabei. Während den ersten Minuten nach Arbeitsbeginn werden sich Atmung und Kreislauf der Belastung anpassen. Die Anpassungszeit an den steady state ist somit ein wichtiges Beurteilungskriterium. Nach 10 Minuten Arbeit im steady state wird, während der Patient noch arbeitet, eine Arterie punktiert, dann beendet der Patient die Arbeit. Atmung und Sauerstoffaufnahme, Pulsfrequenz usw. gehen auf ihren ursprünglichen Umfang zurück. Diese Erholungsphase ist ebenfalls wichtig für die Beurteilung. Vor allem die Sauerstoffaufnahme während der Erholung ist interessant, weil auch beim Gesunden das während der Anpassungszeit entstehende Sauerstoffdefizit erst während der Erholungsphase aufgefüllt wird, und weil der erhöhte Energieumsatz nicht augenblicklich mit der Beendigung der Arbeit zurückgeht.

### **Spezielle Methodik des Arbeitsversuches**

Der Explorand sitzt auf einem normalen Fahrradsattel, stützt sich wie gewohnt auf eine Lenkstange und tritt ein mit einem Synchronmotor gekoppeltes Tretlager. Damit ist die Umdrehungsgeschwindigkeit mit der Drehzahl des Motors konstant, diese beträgt 36 Umdrehungen pro Minute, was einem gemüthlichen Tempo mit dem Velo entsprechen würde. Die Dreharbeit variiert mit der Kraft, mit der die Pedale getreten werden und bewirkt eine Verdrehung des Motors, der in zwei starken Feldern elastisch gelagert ist. Das

Ausmass der Verdrehung ist also von der Arbeit abhängig und wird mit einem Zeigersystem direkt in Watt gemessen und auf dem Spirometerpapier laufend registriert. Kommt es während dem Versuch zu einer Arbeitsverminderung, so ist diese sofort erkennbar. Die Gesamtarbeit lässt sich auf diese Weise sehr leicht ermitteln. Sollte der Patient in Erinnerung an einen früheren Arbeitsversuch in Simulationsabsicht seine Arbeit nach einem ihm sichtbaren Anzeigeelement reduzieren, so lässt sich die Empfindlichkeit dieses Zeigers verändern und der Simulant kann überlistet werden, indem er bei niedrigerer Zeigerstellung eine grössere Arbeit leistet. Dieses von M. A. RHINER und W. SIGRIST entwickelte Ergometersystem hat sich bei wiederholter Eichung als sehr konstant erwiesen und im Gebrauch vorzüglich bewährt.

Für die Registrierung der Atmung benutzen wir ein geschlossenes Spirometersystem, bei dem alle Stenosen in den Schläuchen, Schaltern, Anschlüssen, sowie in der Atemmaske vermieden sind. Die Spirometerglocke aus Leichtmetall wiegt wie der als Gegengewicht dienende Kymographionschreiber nur 220 g. Das Gewicht der vom Patienten zu bewegenden Massen wurde damit im Vergleich zu der üblichen Anordnung auf ein Zehntel vermindert. Trotzdem enthält diese Glocke 8 Liter Luft. Die Kreislaufpumpe leistet im geschlossenen System bei maximaler Belastung etwas mehr als 200 Liter pro Minute und wird für jeden Versuch so reguliert, dass sie immer ein mehrfaches des Atemminutenvolumens des Patienten fördert, und dieser somit in seiner Maske immer frische Luft hat und nicht aus dem Expirationsschlauch zurückatmen kann. Letzteres wird zudem mit einer kleinen Daunenfeder in einem zwischengeschalteten Glasrohr auf die einfachste Weise kontrolliert. Wenn mit atmosphärischer Luft mit einem Sauerstoffgehalt von 21 Volumenprozent gearbeitet werden soll, eine Grundbedingung für einen physiologischen Arbeitsversuch, ist eine Sauerstoff-Nachfülleinrichtung unbedingt notwendig, da bei dem grossen Sauerstoffverbrauch die Spirometerluft sehr schnell an Sauerstoff verarmen würde. Da in unserer Höhenlage eine leichte Senkung des Sauerstoffpartialdruckes schon zu einer arteriellen Sauerstoffuntersättigung führen würde, wären wir ohne eine zuverlässig funktionierende Sauerstoff-Nachfülleinrichtung nicht in der Lage, eine wirkliche Lungeninsuffizienz von einer durch den Apparat hervorgerufenen Insuffizienz zu unterscheiden, und der Versuch wäre in dieser Hinsicht wertlos. Wir verwenden den von P. H. ROSSIER und K. WIESINGER beschriebenen Sauerstoffstabilisator von W. SIGRIST. Das Prinzip besteht darin, dass das Anfangsvolumen des ganzen Spirometersystems durch Nachfüllung von reinem Sauerstoff aus einer Bombe konstant gehalten wird. Mit dem Anfangsvolumen bleibt auch die prozentuale Luftzusammensetzung gleich, vorausgesetzt dass die vom Patient produzierte Kohlensäure praktisch voll absorbiert und das Spirometervolumen nur durch den Sauerstoffverbrauch und nicht durch Verschiebungen der Atemmittellage verändert wird. Veränderungen der Atemmittellage spielen beim Arbeitsversuch eine grosse Rolle und zwar in beiden Richtungen, wie jüngst wieder A. FLEISCH und früher schon F. VERZAR gezeigt haben. Zu Beginn der Arbeit wird die Mittellage meist erniedrigt, d. h. expiratorisch verschoben, manchmal auch

erhöht, selten bleibt sie gleich. Eine Erhöhung der Atemmittellage vermindert den Spirometerinhalt je nachdem um 100 bis 700 cm<sup>3</sup>, die bei unserem Nachfüllsystem durch Sauerstoff ersetzt würden. Damit würde die Sauerstoffkonzentration ansteigen, im umgekehrten Falle absinken. Bei Arbeitsende wird die Mittellage wieder in der umgekehrten Richtung als bei Arbeitsbeginn verändert. Die Variationen während der Arbeit selber sind minim und heben sich dauernd gegenseitig auf. Wir vermeiden den im System begründeten Nachteil unserer Nachfülleinrichtung, indem wir den Apparat bei Beginn der Arbeit während der ersten Atemzüge ca. 10—20 Sekunden ausschalten, bis die neue Mittellage erreicht ist. Doch müssen wir deswegen, um ein Sauerstoffdefizit zu vermeiden, ca. 100 bis 200 cm<sup>3</sup> Sauerstoff vorgeben. Unter Berücksichtigung aller Vorsichtsmassregeln gelang es uns in dieser Weise, den Sauerstoffgehalt zwischen 19 und 22 Volumenprozent konstant zu halten. Um jedoch sicher zu gehen, dass der Patient unmittelbar vor und während der Arterienpunktion ein der atmosphärischen Luft entsprechendes Gasmisch atmet, sind wir dazu übergegangen, die Spirometerluft nicht nur durch eine während der Punktion entnommene Luftprobe auf Sauerstoff- und Kohlendioxidgehalt zu analysieren, sondern zusätzlich den Sauerstoffgehalt während des ganzen Versuches dauernd polarographisch zu kontrollieren und je nachdem zu korrigieren. Zu diesem Zweck wird mit einer gewöhnlichen ca. 40 cm<sup>3</sup> fassenden Rekordspritze aus dem zur Maske führenden Schlauch Luft entnommen. Diese Spritze enthält 2—4 cm<sup>3</sup> mit Koffein gesättigte 1 % Calomellösung. Diese wird durch Schütteln der Spritze mit der aspirierten Luft zum Spannungsausgleich der Gase gebracht, was nach ca. 10 Sekunden der Fall ist. Die Lösung wird dann in eine Polarographiekammer injiziert. Die Stromstärke des bei konstant angelegter Spannung durch den periodisch erneuten Quecksilbertropfen geschlossenen Stromkreises wird mit einem Galvanometer gemessen und ist direkt proportional dem Sauerstoffgehalt der Lösung. Die gesamte Analyse von der Luftentnahme bis zur Galvanometerablesung dauert nur 30—40 Sekunden, und erlaubt so dauernde Kontrollen. Die Messgenauigkeit ist 0,2 Volumenprozent bei normalen Sauerstoffgemischen.

Grössere Schwierigkeiten bereitet eine befriedigende Kohlendioxidabsorption. Die grossen, 300—500 cm<sup>3</sup> Natronlauge fassenden Absorptions-Waschflaschen von Ed. JÉQUIER genügen nur für leichte Arbeit mit kleiner Kohlendioxidproduktion. Bei Kohlendioxidausscheidungen von 1000 cm<sup>3</sup> pro Minute und mehr kommt es sehr schnell zu einer Kohlendioxidanhäufung im System mit entsprechender Beeinflussung der Atmung des Patienten. Wir sind daher prinzipiell zu einer doppelten Absorption durch zwei in Serie mit Wasser gekühlten Waschflaschen übergegangen. Die erste Flasche enthält 400 cm<sup>3</sup> Lauge und erniedrigt den Kohlendioxidgehalt soweit, dass dieser in einer zweiten nachfolgenden Waschflasche mit 100 cm<sup>3</sup> Lauge auf eine die Atmung nicht mehr beeinflussende Konzentration vermindert wird. Bei dieser Anordnung lässt sich der Gehalt auch bei grosser und länger dauernder Arbeit unter 0,6 Volumenprozent halten. Die Bedeutung einer genügenden Kohlendioxidabsorption soll folgender Versuch demonstrieren:

Tabelle 1 M. Max. Lungengesund. Journal 21

Belastung mit 170 Watt

	Einfache CO <sub>2</sub> Absorption mit 400 cm <sup>3</sup> Lauge	Doppelte Absorption mit 400 cm <sup>3</sup> Lauge
O <sub>2</sub> -Verbrauch	1560	1780 cm <sup>3</sup>
Atemfrequenz	36,3	28,0 pro min
Minutenvolumen	108 000	42 000 cm <sup>3</sup>
Spez. Ventilation	70,0	23,6 cm <sup>3</sup>
Erholungszeit	3 min	1 min 30 sec
CO <sub>2</sub> -Konzentration nach 10 min Arbeit im Spirometer	1,2	0,56 Vol.-%

Bei einfacher Absorption wird für die gleiche Arbeit mehr als das doppelte Atemminutenvolumen benötigt als bei doppelter Kohlensäureabsorption mit der gleichen Laugenmenge. Es ist einleuchtend, dass alle Arbeitsversuche, die diese Verhältnisse nicht berücksichtigen, nur relativen Wert haben.

Am Ende des Arbeitsversuches, ca. 8—10 Minuten nach Arbeitsbeginn, wird die Arteria brachialis oder radialis punktiert. In etwa 25 % der Fälle misslingt unter diesen Umständen die Punktion. Im arteriellen Blut werden gemessen die Sauerstoffkapazität und die Sauerstoffsättigung mit dem Apparat von HALDANE nach der Technik von COURTICE und DOUGLAS, die Sauerstoffspannung im Plasma mit der polarographischen Methode nach WIESINGER, das pH mit der Glaselektrode von MICHAELIS und der Kohlensäuregehalt des Plasmas nach VAN SLYKE. Gesamtkohlensäuregehalt und pH ergeben nach der Formel von HASSELBALCH-HENDERSON die Kohlensäurespannung im arteriellen Blut und damit auch in den Alveolen. Über die Methodik dieser verschiedenen Analysen verweisen wir auf unsere früheren Arbeiten.

Grundsätzlich müssen wir bei unserer Versuchsanordnung zwei Serien von Analysen unterscheiden. Erstens die Kontrolluntersuchung des Systems, um in jedem Fall einwandfreie Versuchsbedingungen zu garantieren. Zweitens die Untersuchung des Patienten mit seinem arteriellen Blut und den spirometrisch messbaren Atem- und Stoffwechselgrößen, wie Minutenvolumen, Frequenz, Sauerstoffverbrauch und Kohlensäureausscheidung. Dazu kommt die Kontrolle des Pulses. Diese Werte erlauben uns, wie wir in früheren Arbeiten gezeigt haben, die Berechnung der alveolären Funktion und der Totraumverhältnisse (siehe u. a. die Arbeiten von G. NAGER und E. BLICKENSTORFER).

Abb. 1 zeigt das Fahrradergometer mit dem Patienten, den zu- und abführenden Spirometerschlauch und das Anzeigegerät.

Abb. 2. zeigt die typische Spirometerkurve eines Arbeitsversuches mit Registrierung von Leistung, Sauerstoffverbrauch, Atmung und Zeit.

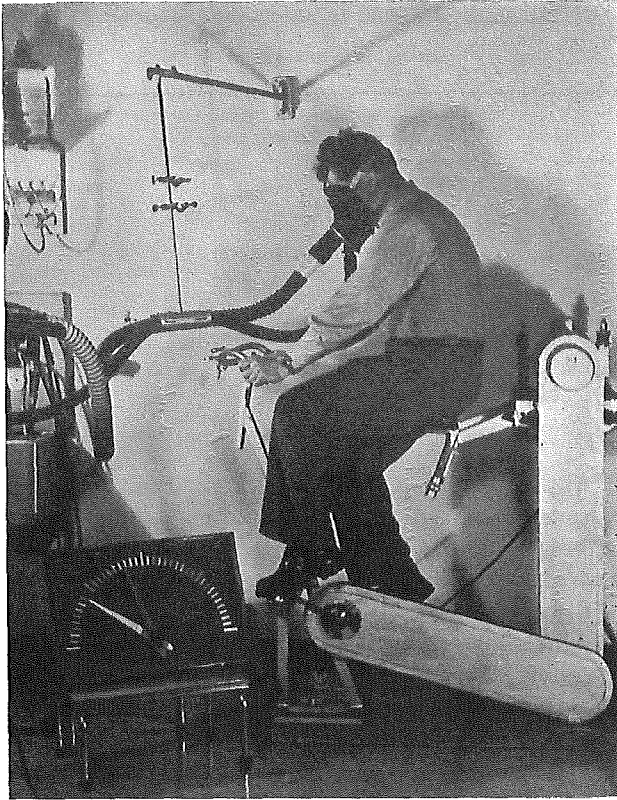


Abb. 1 Fahrradergometer mit Patient.

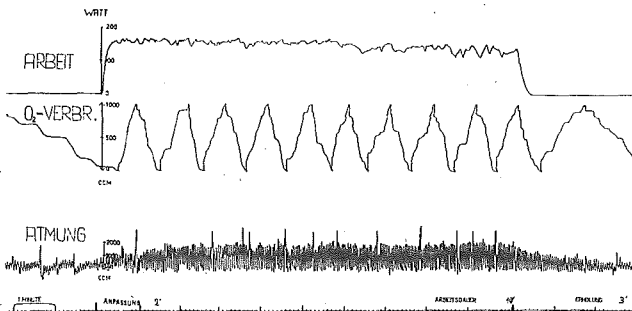


Abb. 2 Typische Spirometerkurve.

### Ergebnisse:

Eine Reihe von Arbeitsversuchen mit lungengesunden Versuchspersonen mit kleinen bis maximalen Belastungen erlauben uns, vorläufige Werte für gesunde Personen anzugeben.



Im arteriellen Blut finden wir eine leichte Erhöhung der Sauerstoffkapazität. Die Sauerstoffsättigung bleibt konstant innerhalb der natürlichen Variation, sinkt jedoch nicht unter 95 %. Der Kohlensäuregehalt zeigt bei Arbeit fast regelmässig eine leichte Verminderung um einige Volumenprozent. Das pH schwankt ebenfalls sehr gering, im Mittel kommt es zu einer minimalen Verminderung um 0,01—0,03 Einheiten. Nur in Einzelfällen haben wir ein Absinken des pH auf pathologische Werte gefunden. Die Kohlensäurespannung verändert sich bei Belastungen über 100 Watt nur unwesentlich, bei kleineren Belastungen kommt es zu einer leichten Verminderung. Für die Beurteilung der Sauerstoffspannung im arteriellen Blut während körperlicher Arbeit sind unsere Erfahrungen noch zu gering, doch scheint es auch hier zu keiner wesentlichen Änderung zu kommen.

Die folgenden Abbildungen zeigen die statistischen Mittelwerte bei lungengesunden Versuchspersonen. Die ausgezogene Linie bedeutet immer den Mittelwert, die gestrichelte Linie die Streuung (Abb. 3—9).

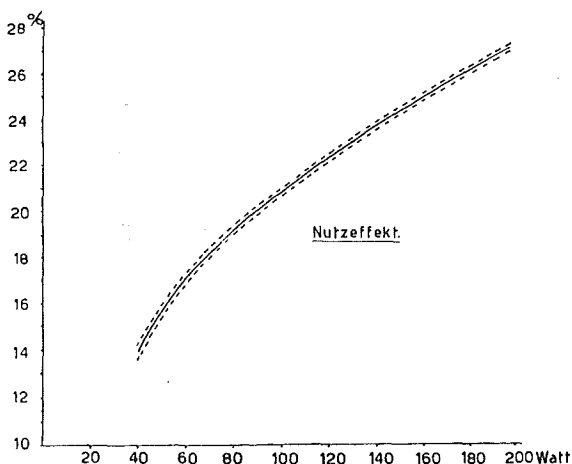


Abb. 3 Der Nutzefekt.

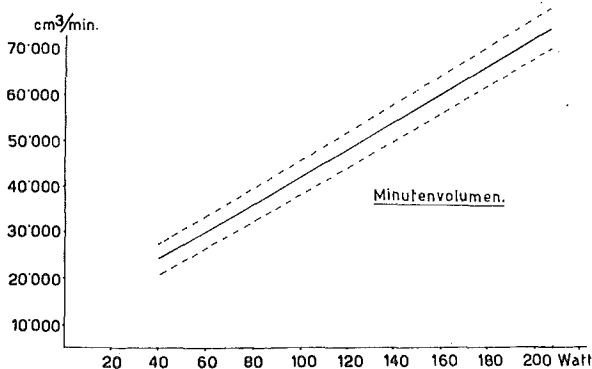


Abb. 4 Minutenvolumen.

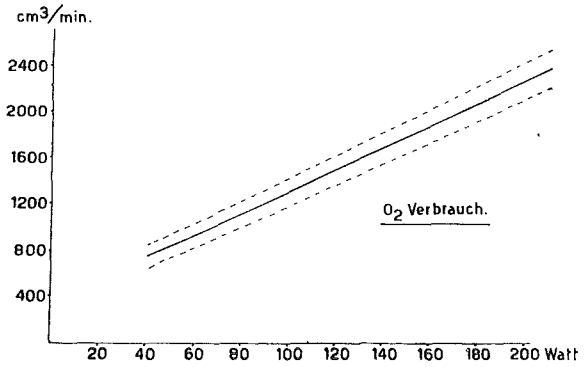


Abb. 5 Sauerstoffverbrauch.

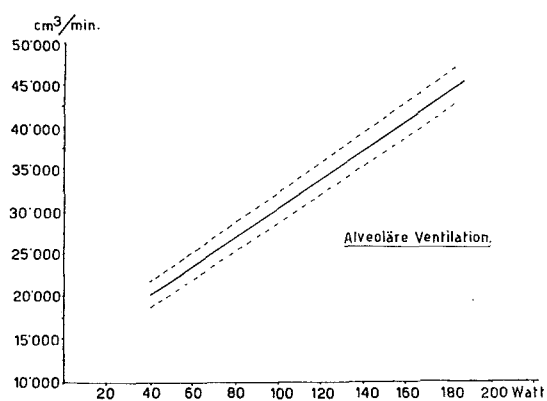


Abb. 6 Alveoläre Ventilation.

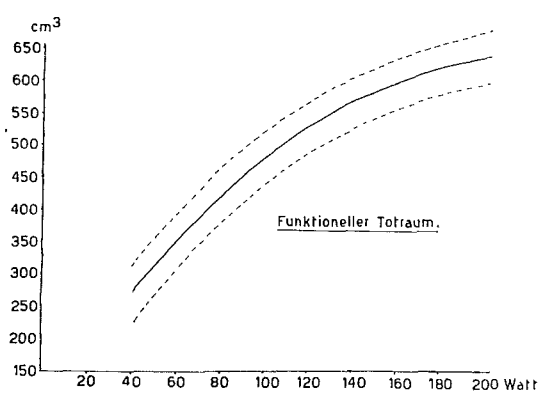


Abb. 7 Funktioneller Totraum.

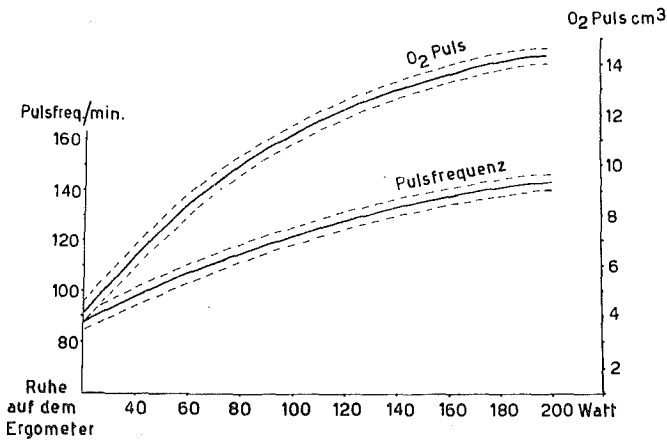


Abb. 8 Pulsfrequenz und Sauerstoffpuls.

Der Sauerstoffpuls deutet auf eine Verdreifachung des Herzschlagvolumens von Ruhe bis maximaler Belastung von 200 Watt.

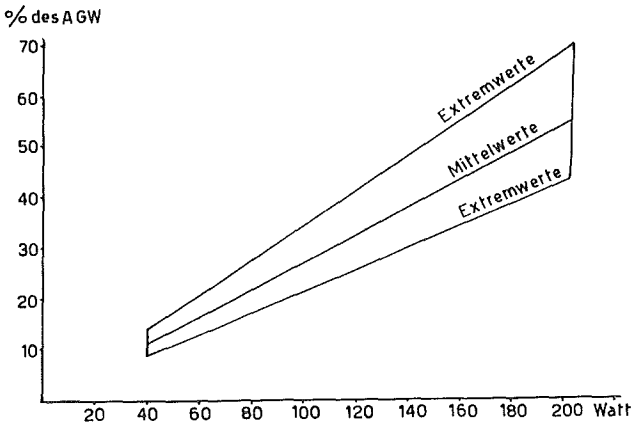


Abb. 9 Beanspruchung der Atemreserven.

Bei all diesen Werten nimmt die Streuung bei höheren Belastungen absolut etwas zu, prozentual ab.

Die alveoläre Sauerstoffausnützung ist bei der Arbeit etwas kleiner als in Ruhe und schwankt zwischen 40 und 50 cm<sup>3</sup>. Die alveoläre Sauerstoffspannung wird während der Arbeit um einige Millimeter Quecksilber erhöht und beträgt immer über 100 mm Hg, d. h. dass das Spannungsgefälle des Sauerstoffs zwischen Alveolen und Blut gegenüber der Ruheatmung etwas vergrößert wird. Der Totraumquotient, das Verhältnis der Totraumventilation zur alveolären Ventilation, ein Mass für die Atemökonomie, ist auch bei Arbeit sehr

konstant und schwankt bei leichten wie auch bei schweren Belastungen zwischen 0,4 und 0,5. Diese Erscheinung beleuchtet die Bedeutung des funktionellen Totraumes. Er nimmt bei Arbeit, wie es u. a. schon HALDANE beschrieben hat, progressiv zu. Die funktionelle Bedeutung dieses Totraumes besteht darin, das durch die Atembewegungen geschaffene Diskontinuum der Gaszusammensetzungen in den Luftwegen während Inspiration und Expiration in ein Gaskontinuum in den Alveolen umzuwandeln. Die Luft des Totraumes spielt die Rolle eines Puffers. So aufgefasst, ist der Totraum eine rein funktionelle Erscheinung und darf nicht mit dem anatomischen verwechselt werden. Zu ähnlichen Gedankengängen über die Wirksamkeit einer Pufferluft kamen früher schon J. J. R. MACLEOD, P. H. ROSSIER und K. WIESINGER.

### Die Ergebnisse bei den Silikotikern

Die Untersuchung unter Grundumsatzbedingungen, also der Ruheversuch, zeigt uns das bestmögliche Anpassungsverhältnis des Patienten an seine pathologischen Veränderungen. Die Atmung ist in diesen Fällen trotzdem oft unökonomisch. Die Bedingungen des Arbeitsversuchs dagegen sind für den Patienten «akut». Er wird sein Möglichstes tun, um die der Belastung entsprechende notwendige Sauerstoffmenge aufzunehmen und um in einen steady state zu gelangen. Die Notwendigkeit der Sauerstoffaufnahme dominiert und wird oft unter unökonomischen Bedingungen erfüllt. Eine derartige Atmung erlaubt zwar einen Arbeitsversuch von 20—30 Minuten Dauer, jedoch nicht eine entsprechende Belastung während Stunden. Insofern stellt unser Arbeitsversuch einen Sonderfall dar und ist nicht mit dem Ruheversuch vergleichbar, der für den Ruhezustand im allgemeinen für den betreffenden Patienten gilt. Darum geht es nicht an, die Resultate eines Arbeitsversuches ohne Kritik auf die Belastungen eines Patienten durch seinen Beruf anzuwenden, weil die Forderung nach Ökonomie im «akuten» Arbeitsversuch erst an zweiter Stelle steht. So betrachtet, stellt der Arbeitsversuch sicher eine berechnete Untersuchungsmethode dar, doch darf man seine Wichtigkeit nicht überschätzen.

Wir müssen bei unsern Silikotikern zwei grundlegende Typen von funktionellen Veränderungen unterscheiden.

- a) Die pathophysiologischen Störungen als Folge fixierter anatomischer Läsionen.
- b) Die sekundären Störungen als Folgen derartiger Läsionen, die durch zusätzliche Veränderungen funktioneller Natur, wie z. B. Bronchialspasmen, erschwert werden.

Betrachten wir zuerst die Ergebnisse bei einigen Beispielen des ersten Typus. Ein Silikotiker kann im Anfangsstadium seines Leidens eine annähernd normale Lungenfunktion in Ruhe und bei Belastung aufweisen, und seine berufliche Arbeitsfähigkeit wird auch entsprechend seiner hohen Belastungsfähigkeit in unserm Arbeitsversuch ungestört sein. Dies soll der folgende Fall eines Patienten mit einer Silikose I zeigen.

Tabelle 2 Sch. René. Silikose I. Journal 16

Arteriellcs Blut: Normale Werte, keine Veränderung im Arbeitsversuch

	Ruheversuch	Arbeitsversuch 145 Watt
Minutenvolumen	8700	51 500 cm <sup>3</sup>
Atemgrenzwert	180 l/min	
Beanspruchung der dynamischen Atemreserven		29 %

Dieser Patient war in der Lage, während längerer Zeit 145 Watt zu bewältigen. Bei dieser Belastung kam es im arteriellen Blut zu keinen wesentlichen Veränderungen. Auch die Ventilation entspricht dem Sauerstoffverbrauch, mit andern Worten, die Atmung bleibt ökonomisch. Die Atemreserven werden nur zu 29 % beansprucht. Die Arbeitsfähigkeit dieses Patienten ist praktisch normal, wie auch die durch unsern Versuch gewonnenen Werte normal sind. In diesem Fall gibt es also eine befriedigende Anpassung an die Anstrengung. Bei vielen Silikotikern mit zwar etwas fortgeschrittenen röntgenologischen Veränderungen stellen wir hingegen eine bemerkenswerte Verminderung der Belastungsfähigkeit in Watt fest, bei der noch ein steady state erreicht wird, obwohl die einzelnen Werte wie im vorangegangenen Beispiel eine normale und ökonomische Atmung zeigen.

Tabelle 3 Sch. Raphael. Silikose II. Journal 7

Arteriellcs Blut: Normale Werte, keine Veränderung im Arbeitsversuch

	Ruheversuch	Arbeitsversuch 60 Watt
Minutenvolumen	6780	27 620 cm <sup>3</sup>
Atemgrenzwert	66 l/min, Sollwert 131 l	
Atemgrenzwert nach Adrenalin	65 l	
Beanspruchung der dynamischen Atemreserven		42 %

Dieser Patient hat in Ruhe eine normale Lungenfunktion, doch sind die dynamischen Atemreserven stark reduziert. Der negative Ausfall des Adrenalinversuches spricht gegen das Vorhandensein von Bronchialspasmen und zeigt uns, dass die Verminderung der Atemreserven fixiert ist. Entsprechend dieser Atemreserven ist der Patient im Arbeitsversuch nur in der Lage, 60 Watt zu bewältigen, und er braucht dafür 42 % seines Atemgrenzwertes. Diese erhöhte Beanspruchung zeigt uns, dass wir mit 60 Watt die Grenze seiner Fähigkeiten erreicht, vielleicht schon leicht überschritten haben. 60 Watt stellen aber eine stark verminderte Arbeitsfähigkeit dar. Diese Fälle mit rein quantitativen Veränderungen im Ruhe- und Arbeitsversuch sind bei den Silikotikern relativ selten, denn viele dieser Kranken zeigen auch qualitative Veränderungen. Die Anpassung an die Arbeit weist ganz pathologische Verhältnisse auf und der steady state mit einer normalen Arterialisierung des Blutes ist mit ganz unökonomischen Vorgängen begleitet. Im folgenden ein Beispiel für derartige qualitativ pathologische Verhältnisse.

Tabelle 4 C. Nerino. Silikose I. Journal 14  
Arteriellcs Blut: Normale Werte, keine Veränderung im Arbeitsversuch

	Ruheversuch	Arbeitsversuch 100 Watt
Minutenvolumen	10 470	41 100 cm <sup>3</sup>
Totraum	250, Sollwert 150 cm <sup>3</sup>	460 cm <sup>3</sup>
Totraumquotient, d. h. alveoläre Ventilation : Totraumventilation	0,91 statt 0,5—0,7	0,73 statt 0,4—0,5
Atemgrenzwert	92 l/min, Sollwert 135 l	
Atemgrenzwert nach Adrenalin	90 l	
Beanspruchung der dynamischen Atemreserven		45 %

Dieser Patient mit einer Silikose I zeigt bereits in Ruhe eine Vergrößerung des Totraumes und eine sehr unökonomische Totraumhyperventilation. Die Atemreserven sind ebenfalls vermindert. Dieser Patient bewältigt im steady state eine Arbeit von 100 Watt. Wie im Ruheversuch bleibt das arterielle Blut normal. Um jedoch dem Organismus die ausreichende Sauerstoffmenge zuzuführen, muss er seine Atmung in einer ganz abnormen Weise intensivieren. Die Beanspruchung der Atemreserven ist mit 45 % ziemlich gross. Die Erholungszeit ist mit 4 Minuten deutlich verlängert. Dieser Patient ist trotz seiner radiologisch geringen Veränderungen durch schwere funktionelle Störungen in seiner Arbeitsfähigkeit eingeschränkt.

Die Vergrößerung des Totraumes kann bei Arbeit das Doppelte des Wertes bei gesunden Versuchspersonen bei der gleichen Belastung erreichen, wie folgendes Beispiel zeigt.

Tabelle 5 H. Jakob. Silikose 0—I. Journal 13

	Ruheversuch	Arbeitsversuch 160 Watt
O <sub>2</sub> -Sättigung im arteriellen Blut	98,0 %	91,4 %
Minutenvolumen	8940	73 600 cm <sup>3</sup>
O <sub>2</sub> -Verbrauch	290	1880 cm <sup>3</sup>
Spezifische Ventilation	30,9	39,2 cm <sup>3</sup>
Totraum	200, Sollwert 200 cm <sup>3</sup>	1000 statt 500—600 cm <sup>3</sup>
Totraumquotient	0,42	0,59
Atemgrenzwert	130 l/min, Sollwert 138 l	
Beanspruchung der dynamischen Atemreserven		56 %

Während bei den vorangegangenen Beispielen das arterielle Blut normal blieb, kommt es hier zu einem pathophysiologischen Bild, wie wir es als Partialinsuffizienz infolge einer ungleichmässigen Lungenventilation beschrieben haben. Die Sauerstoffsättigung vermindert sich im Arbeitsversuch auf 91,4 %, während die Kohlensäurespannung stabil bleibt. Der Arbeitsversuch kann

also eine Partialinsuffizienz auslösen, die die gleiche Ursache hat wie die im Ruheversuch feststellbare, nämlich die Vergrößerung des Totraumes. Wir sind uns durchaus bewusst, dass wir mit der Beschreibung der Partialinsuffizienz und der Vergrößerung des Totraumes die komplexen Verhältnisse der Ventilation in Ruhe und noch mehr bei der Arbeit sehr vereinfachen. Doch ist dies nicht der Ort, auf diese Probleme, die zu umfangreichen theoretischen Überlegungen führen, näher einzugehen. Der Patient H. Jakob kann dank seiner guten Atemreserven, die er jedoch sehr hoch beanspruchen muss, 160 Watt bewältigen. 160 Watt bedeuten eine normale Belastungsfähigkeit, doch müssen wir die Arbeitsfähigkeit des Patienten für beeinträchtigt halten, weil er diese Belastung nur in einer ganz unrationellen und pathologischen Weise bewältigt.

Andererseits kann eine Partialinsuffizienz im Arbeitsversuch auch verbessert oder aufgehoben werden, das aber nur bei einem ungewöhnlich grossen Aufwand an Ventilation, so dass wir mit Recht sagen können, eine derartige Verbesserung kann nur während kürzerer Zeit aufrecht erhalten werden.

Tabelle 6 G. Ernst. Silikose 0—I. Journal 22

	Ruheversuch	Arbeitsversuch 130 Watt
O <sub>2</sub> -Sättigung im arteriellen Blut	90,5 %	92,8 %
Minutenvolumen	8580	63 000 cm <sup>3</sup>
O <sub>2</sub> -Verbrauch	280	1400 cm <sup>3</sup>
Spezifische Ventilation	30,2	45,3 statt 28—32 cm <sup>3</sup>
Totraum	210, Sollwert 180 cm <sup>3</sup>	1010 statt 450—550 cm <sup>3</sup>
Totraumquotient	0,65	0,68 statt 0,4—0,5
Atemgrenzwert	115 l/min, Sollwert 144 l	
Beanspruchung der dynamischen Atemreserven		68 %

Die leichte Verminderung der Atemreserven und eine gewisse Vergrößerung des Totraumes im Ruheversuch weisen auf eine Insuffizienz hin. Die Sauerstoffsättigung ist deutlich vermindert. Der Patient ist imstande, 130 Watt im steady state zu bewältigen, und dabei wird der Blutbefund sogar verbessert. Diese Besserung hat jedoch nur eine fragliche Bedeutung, denn sie wird mit einem Minutenvolumen von 63 Litern, statt ca. 50 Litern, erreicht. Diese beträchtliche Ventilation, sie beträgt 68 % der Atemreserven, wird für eine Totraumhyperventilation benötigt, da der Totraum während der Arbeit fast doppelt so gross ist, als es dem Normalwert bei dieser Belastung entspricht. Dieses Beispiel zeigt, dass in bestimmten Fällen nur die Kombination von Spirometrie und Untersuchung des arteriellen Blutes genügt, um bindende Schlüsse über den Arbeitsversuch zu machen. Eine wesentliche, erschwerende Erscheinung bei Silikotikern ist die Tachypnoe, was folgendes Beispiel zeigen soll.

Tabelle 7 V. Carlo. Silikose I—II. Journal 29

	Ruheversuch	Arbeitsversuch 110 Watt
O <sub>2</sub> -Sättigung im arteriellen Blut	95,8 %	92,4 %
Minutenvolumen	14 100	78 200 cm <sup>3</sup>
Spezifische Ventilation	48,7	51,8 statt 28—32 cm <sup>3</sup>
Atemfrequenz	35,1 statt ca. 16 pro min	47,0 statt 28—30 pro min
Totraum	230, Sollwert 200 cm <sup>3</sup>	1130 statt 450—550 cm <sup>3</sup>
Totraumquotient	1,3 statt 0,5—0,7	2,1 statt 0,4—0,5
O <sub>2</sub> -Puls	3,0	10,7 cm <sup>3</sup>
Alveoläre O <sub>2</sub> -Ausnützung	47,8	59,5 statt 40—50 cm <sup>3</sup>
Alveoläre O <sub>2</sub> -Spannung	100	91 statt 104 mm Hg
Atemgrenzwert	97 l/min, Sollwert 142 l	
Atemgrenzwert nach Adrenalin	93 l	
Beanspruchung der dynamischen Atemreserven		80 %

Dieser Patient mit einer Silikose I—II zeigt im Ruheversuch normale Verhältnisse im arteriellen Blut, doch sind die Atemreserven mit 97 statt 142 Litern deutlich vermindert. Der Adrenalinversuch ist auch in diesem Fall negativ. Auffallend ist hier die Tachypnoe von 35,1 pro Minute. Im Zusammenhang mit dieser frequenten und flachen Atmung steht der ausserordentlich ungünstige Totraumquotient von 1,3. V. Carlo ist in der Lage, 110 Watt im steady state zu bewältigen. Die Tachypnoe nimmt jedoch noch zu, und das Verhältnis des Minutenvolumens zur Sauerstoffaufnahme, die spezifische Ventilation, wird noch ungünstiger. Die ausserordentliche Unökonomie dieser Atmung zeigt sich auch in dem sehr grossen Totraumquotienten von 2,1. Unter diesen Umständen entwickelt sich trotz dem grossen Aufwand an Atembemühungen eine leichte Globalinsuffizienz. Der Organismus kann sein Sauerstoffbedürfnis nicht mehr in physiologischer Weise befriedigen, er findet ein neues, aber pathologisches Gleichgewicht. Die Sauerstoffausnützung steigt an, und die alveoläre Sauerstoffspannung sinkt unter die Norm und führt zu einer arteriellen Untersättigung. Es ist kein Wunder, dass in diesem Fall die Erholungszeit mit fünf Minuten deutlich verlängert ist. Diese pathophysiologische Veränderung, die viel schwerer wiegt als eine Partialinsuffizienz, ist im Arbeitsversuch selten. Ein Patient mit einer voll entwickelten Globalinsuffizienz ist gar nicht in der Lage, eine Belastung im steady state zu bewältigen.

Je mehr wir die Pathophysiologie der Silikotiker studieren, um so überraschter sind wir von den zahlreichen Variationsmöglichkeiten dieser Kranken. Jeder einzelne bietet seinen eigenen Arbeitsversuch. Wenn wir überhaupt eine allgemeine Regel aufstellen wollen, so kann es nur die sein, jeder Patient muss für sich betrachtet werden.

Ist die Lungenfunktion durch Bronchialspasmen kompliziert, so ist es auch unser Arbeitsversuch. Es ist sicher, dass diese Spasmen bei Belastung auf dem Fahrradergometer z. T. oder auch ganz aufgehoben werden können, wie es schon Ed. JÉQUIER beschrieben hat. In bestimmten Fällen beträgt z. B. die Beanspruchung der dynamischen Atemreserven mehr als 100 % (siehe Ta-



belle 10). Wenn man hingegen das Minutenvolumen während der Arbeit, in diesem Fall mit dem Atemgrenzwert nach einer Injektion von Adrenalin, vergleicht, beträgt die Ausnützung nur noch 78 %. Doch scheint es keineswegs sicher, dass der Arbeitsversuch in allen Fällen die Bronchialspasmen löst. Bei gewissen Asthmatikern scheint eher das Gegenteil der Fall zu sein. Der Adrenalinversuch kann daher in seiner diagnostischen Bedeutung für die Bronchialspasmen nicht durch den Arbeitsversuch ersetzt werden.

Tabelle 8 K. Cäsar. Silikose I. Journal 19

Arteriellcs Blut: Normale Werte, keine Veränderung im Arbeitsversuch

	Ruheversuch	Arbeitsversuch 155 Watt
Minutenvolumen	7440	48 400 cm <sup>3</sup>
Atemgrenzwert	95 l/min, Sollwert 136 l	
Atemgrenzwert nach Aleudrin- inhalation	130 l	
Beanspruchung der dynamischen Atemreserven		50 % 37 % in bezug auf den Atemgrenzwert nach Aleudrininhalation

Dieser Patient zeigt im Ruheversuch lediglich eine Verminderung des Atemgrenzwertes auf 95 Liter, der sich jedoch nach Inhalation von Aleudrin normalisiert. Das arterielle Blut und die Ventilationsverhältnisse sind ganz normal. Trotz dieser bedeutenden Einschränkung der Atemreserven ist er imstande, 155 Watt zu bewältigen. Auch im Arbeitsversuch kommt es zu keinerlei Zeichen einer Insuffizienz. In diesem Fall müssen wir eine weitgehende Lösung der Bronchialspasmen und dadurch eine Vergrößerung der dynamischen Atemreserven während der Arbeit annehmen. So ist auch die Ausnützung des Atemgrenzwertes mit dem nach Aleudrin gemessenen Wert mit 37 % sehr günstig. Dieser Patient ist in seiner Arbeitsfähigkeit nicht beeinträchtigt. Eine Beurteilung seiner Arbeitsfähigkeit lediglich nach den messbaren Atemreserven wäre sicher falsch gewesen.

Tabelle 9 G. Walter. Silikose I. Journal 53

Arteriellcs Blut: Normale Werte, keine Veränderung im Arbeitsversuch

	Ruheversuch	Arbeitsversuch 130 Watt
Minutenvolumen	8060	33 900 cm <sup>3</sup>
Atemgrenzwert	77 l/min, Sollwert 131 l	
Atemgrenzwert nach Adrenalin	102 l	
Beanspruchung der dynamischen Atemreserven		44 % 33 % in bezug auf den Atemgrenzwert nach Adrenalin

Bei diesem Patienten liegen ähnliche Verhältnisse vor. Doch werden die Atemreserven nach Injektion von Adrenalin nicht voll normalisiert. Der Atemgrenzwert erreicht nicht ganz den Sollwert. Der Patient ist nur in der Lage, 130 Watt zu bewältigen, seine Belastungsfähigkeit ist also etwas vermindert. Silikotiker mit Bronchialspasmen können somit im Arbeitsversuch günstigere Verhältnisse aufweisen als Patienten mit einer Verminderung der Atemreserven, ohne Bronchialspasmen, weil in diesen Fällen die Verminderung bereits fixiert ist.

Die Lösung von Bronchialspasmen ist jedoch nicht immer gleichbedeutend mit einer Verbesserung der Ventilationsverhältnisse, wie es folgendes Beispiel zeigen soll.

Tabelle 10 P. Valentin. Silikose 0—I. Journal 42

	Ruheversuch	Arbeitsversuch 120 Watt
O <sub>2</sub> -Sättigung	97,1 %	95,3 %
pH im arteriellen Blut	7,44	7,31
Minutenvolumen	8380 cm <sup>3</sup>	93 800 cm <sup>3</sup>
Spezifische Ventilation	36,4	58,0 statt 28—32 cm <sup>3</sup>
Totraum	150, Sollwert 150 cm <sup>3</sup>	1300 statt 450—550 cm <sup>3</sup>
Totraumquotient	0,41	1,46 statt 0,4—0,5
Atemgrenzwert	72 l/min, Sollwert 140 l	
Atemgrenzwert nach Adrenalin	120 l	
Beanspruchung der dynamischen Atemreserven		130 % 78 % in bezug auf den Atemgrenzwert nach Adrenalin

Der Ruheversuch zeigt bei diesem Patienten bis auf eine starke Verminderung des Atemgrenzwertes auf die Hälfte des Sollwertes sehr günstige Verhältnisse. Der Adrenalinversuch ist stark positiv. Man könnte nun nach den vorausgegangenen Beispielen erwarten, dass der Patient mindestens mit 140 Watt zu belasten wäre. Das ist jedoch nicht der Fall. Es ist lediglich eine Belastung von 120 Watt möglich. Der Arbeitsversuch zeigt nun, dass die Anpassung bereits an diese Belastung sehr ungünstig ist. Die spezifische Ventilation ist mit 58 cm<sup>3</sup> viel zu gross und erklärt sich mit einer Vergrößerung des Totraumes auf mehr als das Doppelte des Normalwertes. Dank diesem grossen Aufwand an Respiration, das Minutenvolumen beträgt 93 statt ungefähr 50 Liter, wird das Blut zwar noch voll gesättigt, doch kommt es hier zu einer flüchtigen Azidose, was wir bei unsern Kranken sonst sehr selten beobachten. Die Beanspruchung der nach Adrenalin gemessenen Atemreserven ist mit 78 % zu hoch.

Der Arbeitsversuch kann bei den Silikotikern dank der Auflösung von Bronchialspasmen auch eine Globalinsuffizienz, sofern diese noch nicht ausgesprochen ist, bessern.

Tabelle 11 C. Giuseppe. Silikose III. Journal 41

	Ruheversuch	Arbeitsversuch 95 Watt
O <sub>2</sub> -Sättigung	92,4 %	94,7 %
CO <sub>2</sub> -Spannung im arteriellen Blut	43,2 mm Hg	35,5 mm Hg
Minutenvolumen	11 900 cm <sup>3</sup>	54 100 cm <sup>3</sup>
Totraum	380, Sollwert 170 cm <sup>3</sup>	640 statt 300 cm <sup>3</sup>
Totraumquotient	1,2	1,0 statt 0,4—0,5
Atemgrenzwert	68 l/min, Sollwert 146 l	
Atemgrenzwert nach Adrenalin	96 l	
Beanspruchung der dynamischen Atemreserven		80 %
		56 % in bezug auf den Atemgrenzwert nach Adrenalin

Dieser Patient mit einer Silikose III zeigt im arteriellen Blut mit einer Sauerstoffuntersättigung und einer Erhöhung der Kohlensäurespannung leichte Veränderungen im Sinne einer Globalinsuffizienz. Der Atemgrenzwert ist um mehr als die Hälfte vermindert. Der Adrenalinversuch ist deutlich positiv, doch kommt es keineswegs zu einer Normalisierung. Der Patient ist in der Lage, 65 Watt zu bewältigen. Dabei ist eine deutliche Besserung der spirometrischen Werte und des arteriellen Blutes festzustellen.

Wir wollen die Zahl der Beispiele nicht unnötig vermehren. Es lag uns in erster Linie daran, in dieser Arbeit unsere Technik des Arbeitsversuches zu zeigen. Die Atmung bleibt bei lungengesunden Versuchspersonen auch bei sehr grossen Belastungen, bei denen überhaupt noch ein steady state erreicht wird, ökonomisch. Das arterielle Blut verändert sich, abgesehen von kleinen regelmässigen Variationen, nicht, es kommt physiologischerweise weder zu einer Untersättigung, noch zu einer Azidose, das milieu intérieur ist in Ruhe und bei Arbeit praktisch das gleiche. Wir sind der Meinung, dass lediglich die Verbesserung der Methodik diese z. T. abweichenden Ergebnisse erklärt, insbesondere was die Grösse des Minutenvolumens und des Sauerstoffverbrauchs im Vergleich zu den bisher von H. W. KNIPPING und Ed. JÉQUIER sowie von andern Autoren mitgeteilten Werten betrifft.

Hinsichtlich der pathologischen Zustände bei unseren Silikotikern waren wir gezwungen, angesichts der Unmöglichkeit, ein allgemeingültiges Schema aufstellen zu können, die typischen Fälle einzeln zu schildern. Auch diese Untersuchungen bestätigen wieder die alte Erfahrung, dass das Ausmass der anatomischen Veränderungen nichts über die funktionellen Schäden aussagt. Doch müssen wir bemerken, dass wir relativ selten Gelegenheit hatten, Patienten mit einer Silikose III zu untersuchen, offensichtlich eine Folge der fortgeschrittenen prophylaktischen Massnahmen in der Schweiz. Der Arbeitsversuch vervollständigt bei unsern Kranken die Ergebnisse des Ruheversuchs. In vielen Fällen besteht zwischen beiden eine Parallelität. Oft hingegen kommt es im Arbeitsversuch zu qualitativen Veränderungen, und zwar im negativen

wie auch im positiven Sinne. Eine Insuffizienz kann auftreten, aber auch gebessert werden. Überraschend ist die oft hohe Belastungsfähigkeit eines Patienten, bei dem man nach dem Ruheversuch mit stark verminderten Atemreserven eine ausgesprochen reduzierte Belastungsfähigkeit erwartet hätte. Die bei den Silikotikern häufigen Bronchialspasmen erklären einige dieser Phänomene und beweisen erneut die Wichtigkeit ihres Nachweises durch den Adrenalinversuch.

Wenn in dieser Arbeit auch nur die Silikotiker Berücksichtigung fanden, so haben wir im Rahmen unserer Studien selbstverständlich auch Untersuchungen bei andern pathologischen Lungen- und Kreislaufveränderungen durchgeführt. Wir haben heute ein, wenn auch nicht vollständiges Bild über die verschiedenartigsten Reaktionen im Arbeitsversuch. Wir müssen durch weitere derartige Untersuchungen unsere Kenntnisse vor allem über die arterielle Sauerstoffspannung und die Milchsäurekonzentration erweitern, doch glauben wir jetzt die physiologisch gut fundierten Grundlagen für die Entwicklung eines einfachen und überall durchführbaren Arbeitsversuches geschaffen zu haben.

Die Sauerstoffaufnahme, das Minutenvolumen und der Puls sind die wichtigsten und variablen Grössen des Arbeitsversuches. Die unblutige photometrische Kontrolle der Sauerstoffsättigung wird als empfindlichstes Mass für die Arterialisierung des Blutes in der Lunge genügen. Die Messung des Minutenvolumens wird einmal die Ökonomie der respiratorischen Anpassung an eine Belastung und dann die für die Beurteilung sehr wichtige Beanspruchung der Atemreserven zeigen, die vorher mit dem Adrenalinversuch bestimmt werden müssen. Die Pulsfrequenzänderung bzw. der Sauerstoffpuls gibt uns schliesslich einen Anhaltspunkt für die Reaktion von Herz und Kreislauf. Das sind die drei am meisten aussagenden Messungen eines zukünftigen Arbeitsversuches, der den Belangen des Patienten gerecht wird und dem Betrachter seine Arbeit mit gutem Gewissen erleichtert.

### Zusammenfassung

I. Besprechung der Problematik des Arbeitsversuches an Hand der umfangreichen Literatur und eigenen Untersuchungen. Begründung der Aufgabe, einen möglichst physiologischen Arbeitsversuch zu entwickeln, um mit den bei einwandfreier Methode gewonnenen Ergebnissen die Grundlagen für die Einführung eines praktischen und überall durchführbaren Arbeitsversuches zu schaffen.

II. Entsprechend der gestellten Aufgabe wird die Methodik ausführlich beschrieben. Die gesamte Untersuchung setzt sich aus folgenden Teiluntersuchungen zusammen: 1. Ruheversuch unter Grundumsatzbedingungen mit Blutgasanalyse und Spirometrie. 2. Adrenalinversuch. 3. Orientierender Vorversuch auf dem Fahrradergometer zur Bestimmung der oberen Belastungsgrenze. 4. Eigentlicher Arbeitsversuch mit Blutgasanalyse und Spirometrie

sowie Pulskontrolle. Beschreibung der Beurteilungskriterien für die so gewonnenen Daten und der zu berechnenden funktionellen Werte.

III. Darstellung der Ergebnisse. Bei gesunden Versuchspersonen kommt es im arteriellen Blut zu keinen wesentlichen Veränderungen. Die Zunahme der Ventilation, der Sauerstoffaufnahme und des funktionellen Totraumes sowie der Pulsfrequenz entspricht der Grösse der Belastung. Die gute Übereinstimmung aller Versuche erlaubt die Aufstellung von Standardzahlen für Sauerstoffaufnahme, Minutenvolumen, alveoläre Ventilation und funktioneller Totraum, Pulsfrequenz und Sauerstoffpuls sowie prozentuale Beanspruchung der Atemreserven für Belastungen von 40—200 Watt. Die zahlreichen Variationen bei den Silikosekranken machen ein allgemeingültiges Schema unmöglich, deshalb werden mehrere Einzelfälle mit verschiedenen typischen Reaktionen beschrieben. Der Arbeitsversuch kann bei diesen Kranken wie auch bei solchen mit anderen pathologischen Lungen- und Kreislaufverhältnissen im quantitativen und im qualitativen Sinne gestört sein. Das Ausmass der im Röntgenbild sichtbaren Lungenveränderungen sagt nichts über die Schwere des funktionellen Schadens aus. Diese Erfahrungen werden auch durch diese Untersuchungen wieder bestätigt.

### Literatur zur Arbeitsphysiologie und zum Arbeitsversuch

- AITKEN, R. S. und A. E. CLARK-KENNEDY: *J. of Physiol.* 65 (1928), 389.  
ALLRÖDER, H. und H. LANDEN: *Z. ges. ex. Med.* 108 (1940), 406.  
ANTHONY, R. J.: Funktionsprüfung d. Atmung. Barth, Leipzig 1937.  
APERIA, A.: *Scand. Arch. Physiol. Sppl.* 16 (1940), 83.  
ATZLER, E.: *Handbuch d. Arbeitsphysiol.* v. E. Atzler. Leipzig 1927.  
BAINBRIDGE, F. A.: *The physiology of muscular exercise.* London 1923.  
BARR, D. P., H. E. HIMWICH und R. P. GREEN: *J. Biol. Chem.* LV (1923), 495.  
BIRATH, G.: *Acta Med. Scand.* 120 (1945), 527.  
— *Acta Med. Scand. u. Suppl.* 1944.  
BLICKENSTORFER, E.: Totraum und Totraumhyperventilation. Diss. Zürich 1946.  
BRIEGER, E.: *Klin. Wschr.* 153 (1933).  
— *Erg. d. ges. Tbc-Forschung.* VI (1934), 491.  
CAMPBELL, J. M. H., G. H. HUNT und E. P. POULTON: *J. of Pathol.* 26 (1923), 234.  
CARPENTER, TH. M. und E. L. FOX: *Arb.-physiol.* 4 (1931), 527.  
CHALMERS, L. und X. GEMILL: *J. of aviation med.* Vol. 18 (1947), 5, 483.  
DÉMENY, G.: *Arch. physiol. norm. et pathol.* I (1889), 586.  
EBELING, G. und K. LINXWEILER: *Arb.-physiol.* 11 (1940), 1.  
EFIMOFF, W. M., A. S. RODSEWITSCH und W. M. GAMBURZEW: *Arb.-physiol.* 7 (1934), 17.  
— und J. A. ARSCHAWSKY: *Arb.-physiol.* 2 (1930), 258.  
ENGELHARDT, A.: *Z. Biol.* 101 (1942), 21.  
ESKILDSEN, P., H. AITZSCHE und A. TYBJERG-HANSEN: *Acta cardiol. belg.* II (1949), 199.  
EWIG, W.: *Z. exp. Med.* 61 (1928), 590.  
FLEISCH, A. und F. LEHNER: *Helv. Physiol. Acta* 7 (1949), 410.  
FROST, J. und J. GEORG: Rapport présenté à la Conférence internationale sur les pneumoconioses. Sydney, mars 1950.  
GAVANEZZI, M. und L. COTTI: *Btrg. Klin. Tbc* 84 (1934), 429 u. 433.  
GEORG, J.: *Scand. J. of Clinical and Laboratory Investigations.* Vol. I (1949), 239.  
GEORG, J. und L. MAHLER: *Acta Scand. Med.* 16 (1948), 52.

- GERHARTZ, H.: Hdb. d. biol. Arbeitsmethoden, E. Abderhalden, V (1928), 9.
- GESSLER, H. und R. MARKERT: Z. Biol. 86 (1927), 173.
- GOLLWITZER-MEIER, KL. und E. SIMONSON: Klin. Wschr. 1929, 1445.
- HÄFELI, G.: Z. Biol. 99 (1940), 15.
- HANSEN, E.: Scand. Arch. Physiol. 54 (1928), 50.
- Hdb. d. norm. u. pathol. Physiol. v. Bethe, Bergmann usw. 15/II (1931).
- Arb.-physiol. 8 (1935), 151.
- HARRISON, T. R. und C. PILSHER: J. clin. Invest. 8 (1930), 259.
- und J. A. COLHOUN: Americ. J. Physiol. 100 (1932), 68.
- HEBESTREIT, H.: Pflügers Archiv 222, (1929), 738.
- HERBST, R.: Dtsch. Arch. klin. Med. 162 (1928), 256.
- HERMANSSEN, J. und P. VAN UYTVANCK: Z. exp. Med. 88 (1933), 279.
- HERMS, J. und J. RÜTTGERS: Btrg. Klin. Tbc 78 (1931), 724.
- HERXHEIMER, H. und R. KOST: Z. Klin. Med. 108 (1928), 240.
- Hdb. d. norm. u. path. Physiol. v. Bethe, Bergmann 15/I (1930), 699.
- und K. RYJAREK: Arb.-physiol. 7 (1934), 308.
- HEWLETT, A. W., G. D. BARNETT und J. K. LEWIS: J. clin. Invest. 3 (1926), 317.
- HILL A. V., D. H. LONG und H. LUPTON: Proc. roy. Soc. Med. 97 (1925), 84.
- HIMWICH, H. E. und P. BARR: J. of biol. Chem. 57 (1923), 363.
- HOPBAUER, L.: Z. exp. Med. 89 (1933), 17.
- HÖRNICKE, E.: Münch. med. Wschr. 1569 (1924).
- HUG, O.: Schwz. med. Wschr. 58 (1928), 453, und 59 (1929), 522.
- ISHIDA, J. und E. VOSS: Z. exp. Med. 75 (1931), 1.
- JÉQUIER-DOGE, ED. und M. LOB: Rev. méd. suisse rom. 7 u. 8 (1940).
- Helv. Med. Acta 816 (1941).
- J. méd. Leysin 7 (1943).
- und M. LOB: J. suisse méd. 13 (1945).
- Ärztl. Monatshefte, April 1946.
- Semaines hôpit. Paris, Juli 1946.
- KNIPPING, H. W.: Z. exp. Med. 66 (1929), 517.
- W. LEWIS und A. MONCRIEFF: Btrg. Klin. Tbc 79 (1931), 1.
- Klin. Wschrft. 406 (1935).
- Btrg. Klin. Tbc 87 (1936), 465, und 88 (1936), 503.
- Luftfahrtmed. 1 (1936), 26.
- Klin. Wschrft. 19 (1940), 9.
- KOCH, A. und B. SCHMIDT: Z. exp. Med. 112 (1943), 612.
- KROGH, A.: Scand. Arch. Physiol. 30 (1913), 375.
- J. of Physiol. 47 (1930), 112.
- LEHMANN, G.: Hdb. d. Arbeitsphysiol. von E. Atzler. Leipzig 1927.
- LILIENTHAL, J. L. jr., R. L. RILEY, D. D. PROEMMEL und R. E. FRANKE: Americ. J. Physiol. 147 (1946), 199
- LOEWY, A.: Sportärztl. Ergebn. II. olymp. Winterspiele 1928.
- LORENZ, F. H.: Arch. f. Hygiene 104 (1930), 378.
- LUNDSGAARD, Ch. und E. MÖLLER: J. Biol. Chem. Vol. LV (1923), 315, 477 u. 599.
- MAGNÉ, H.: Physiol. d. trav. Institut Lannelongue, 3. Serie, 65 (1922).
- MANGOLD, E.: Hdb. d. Arbeitsphysiol.
- MARGARIA, R.: Arb.-physiol. 2 (1930), 261.
- und C. TALENTI: Acta Aerophysiol. 1 (1933), 14.
- MARK, R. E.: Arb.-physiol. 2 (1930), 129.
- MARZAHN, H., W. GILBEAN und G. ZAEPFER: Z. klin. Med. 129 (1936), 434.
- MICHAELIS, H. und A. MÜLLER: Arb.-physiol. 12 (1943), 81.
- MICHAUD, L.: Schw. Med. Wschrft. 44 (1941).
- MORIN, G.: Physiol. du travail humain. Massan et Cie, Paris 1946.
- NAGER, G.: Über d. sog. O<sub>2</sub>-Defizit nach Uhl. Knipp. Diss. Zürich 1946.
- PEABODY, F. W. und C. STURGIS: Arch. int. Med. 29 (1922), 277.

- PODKAMINSKY, N. A.: Arb.-physiol. 1 (1929), 577.
- RECHNITZER, E.: Klin. Wschrft. 2361 (1929).
- REICHMANN, W.: Verhdlg. d. Kreislaufforschg. Mai 1940.
- REIN, H.: Ärztl. Fortbildungsk. Nauheim 1935.
- ROSSIER, P. H., H. BUCHER und K. WIESINGER: Vierteljahrsschr. d. Naturf. Gesellschaft Zürich, XCII (1947), Beiheft 3/4, 83.
- und K. WIESINGER: Schwz. Z. Tbk. VI (1949), 17.
- RÜTTGER, J.: Btrg. Klin. Tbc 78 (1931), 197.
- SARRE, H.: Z. Biol. 96 (1935), 355.
- SCHLESINGER, E.: Z. Kinderhkd. 43 (1927), 232.
- Klin. Wschrft. 32 (1927).
- v. SCHROETTER, H.: Hdb. d. biol. Arbeitsmethoden v. E. Abderhalden, Abt. VI, 10, 929.
- SCHUBERT, H. J. P.: Arch. of Physiol. 1 (1932), 1.
- SIMONSON, E.: Hdb. d. norm. u. path. Physiol. 15/I (1930), 1, 519 u. 783.
- Arb.-physiol. 1 (1929), 87.
- und G. SIRKINA: Arb.-physiol. 8 (1935), 560 u. 576.
- STORM VAN LEEUWEN, W. und P. LARSEN: Z. exp. Med. 65 (1929), 320.
- TAYLOR, C.: Americ. J. Physiol. 135 (1941), 27.
- THIEL, K., A. RÜHAU und K. GERLACH: Z. exp. Med. 97 (1935), 65.
- VERZAR, F.: Pflügers Arch. 232 (1933), 322.
- VOSS, E.: Z. exp. Med. 73 (1930), 5.
- WACHOLDER, K.: Hdb. d. norm. u. path. Physiol. 15/I (1930), 587.
- WIESINGER, K.: Die polarograph. Messung d. Sauerstoffspannung d. Blutes, Helv. physiol. Acta, Suppl. VI (1950).
- Schwz. Z. f. Tbk, Suppl. 1948.
- WINKLER, A.: Med. Klin. 1941, 552, 582, 605, 631, 691, 715.
- ZAEPER, G. und W. WOLF: Btrg. Klin. Tbc 94 (1940), 520.
- Btrg. Klin. Tbc 88 (1936), 79.
- Z. klin. Med. 129 (1935/36), 2/3.
- Dtsch. Arch. klin. Med. 186 (1940), 1.