

**Computerunterstützte, nichtinvasive Methoden zur
Analyse von Lungenfunktionen beatmeter Patienten :
Untersuchungen zur Optimierung der Beatmung.**

ABHANDLUNG

zur Erlangung des Titels eines

DOKTORS DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN

der

EIDGENOESSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZUERICH

vorgelegt von

Josef Xaver Brunner-Leuppi

Dipl. El. Ing. ETHZ

geboren am 2. Februar 1956

von Hilfikon/AG

Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. M. Anliker, Institut für Biomedizinische Technik ETH-Z, Referent
PD Dr. G. Wolff, Klinische Physiologie, Kantonspital Basel, Korreferent

Zürich 1985

Zusammenfassung

Die Änderungen des Gasaustausches bei Veränderung der Respirator-Einstellung sind im Detail unbekannt und zum Teil sehr kontrovers. Die Schwierigkeiten liegen hauptsächlich bei den Methoden. Es wurde deshalb ein Mess- und Analysesystem entwickelt, mit dessen Hilfe die Dehnbarkeit der Lunge (C_L) und des ganzen respiratorischen Systems (C_{tot}), der Atemwegs-Widerstand (R_{AW}), das Lungenvolumen (FRC) und die Effizienz der darin stattfindenden Gasmischung, das Totraumvolumen der Atemwege (PIE) sowie die Effizienz der alveolären CO_2 Elimination (alv.eff.- CO_2) simultan bestimmt werden können. Diese "Lungenfunktions-Indices" werden aus den am Tracheal-Tubus nichtinvasiv gemessenen, zeitlichen Verläufen von 7 Signalen bestimmt. Diese sind der Fluss des Gasvolumens, der Atemwegsdruck, der Gehalt von N_2 , O_2 , CO_2 und Argon sowie der im Oesophagus (Speiseröhre) gemessene Druckverlauf. Dazu werden ein Fleisch Pneumotachograph, ein Massenspektrometer und drei Druckmesswandler verwendet. Die Druckmessschläuche sind zusammen mit dem Pneumotachographen in einem "Messkopf" integriert. Anstelle des kurzen Verbindungsschlauches zwischen Patient und Respirator wird dieser Messkopf eingefügt. Die Messdaten sind druck-, temperatur- und viskositätsabhängig und liefern zeitlich versetzte Signale. Die entsprechenden Verzögerungszeiten sind wiederum abhängig von Druck, Temperatur und Viskosität. Mit einem Mikrocomputer werden die nötigen Korrekturen durchgeführt und die Signale aufeinander synchronisiert. Auch musste ein Respirator so umgebaut werden, dass ein Stickstoff-Auswasch (zur Bestimmung von FRC und Mischungs-Effizienz) am Beatmeten problemlos möglich ist.

Die absolute Genauigkeit der PIE und FRC Messung wurde an einem eigens dafür konstruierten Lungenmodell geprüft und war besser als 3%. Die Reproduzierbarkeit der Atemhub für Atemhub messbaren Indices PIE, alv.eff.- CO_2 , C_L , C_{tot} und R_{AW} wurde an 6 mechanisch beatmeten Patienten nach Herzoperation getestet und ergab einen mittleren Varianzkoeffizienten von 4.5%. Die Reproduzierbarkeit der FRC Bestimmung war ± 66 ml bzw. ± 3.1 % (Standardabweichung der Differenzen von 20 Doppelbestimmungen in 7 Patienten). Die Empfindlichkeit der Indices ist weit besser als die Empfindlichkeit der konventionell gemessenen Parameter, nämlich derjenigen des physiologischen Totraumes

(V_D/V_T), der effektiven Dehnbarkeit (C_{eff}) und der arteriellen CO_2 - und O_2 - Partialdrucke. Dies wird gezeigt am Beispiel von 3 Patienten mit akuten, schwer pathologischen Lungenveränderungen.

Mit Hilfe des Systems wurde an einer Gruppe von Patienten mit komplikationsfreiem, postoperativem Verlauf der Einfluss der Respiro-Einstellung auf den Gasaustausch untersucht. Gemessen wurden die oben genannten Indices sowie die Shunt Fraktion (Q'_S/Q'_T) und das Herzminutenvolumen (CO) an 18 Patienten nach offener Herzoperation. Nach Messung der Ausgangswerte wurde jeweils nur eine von vier Variablen geändert, nämlich das Atemhubvolumen (V_T) von 941 ml auf 586 ml erniedrigt bzw. auf 1298 ml vergrössert, die Inspirationsfluss-Rate (V'_I) von 386 ml/sec auf 740 ml/sec gesteigert, die endinspiratorische Pause (EIP) von exakt Null auf 1 sec verlängert und der positiv endexpiratorische Druck (PEEP) von 0 cmH₂O auf 6 cmH₂O und anschliessend auf 11 cmH₂O erhöht. Der arterielle CO_2 Partialdruck wurde konstant gehalten, indem die Expirationszeit entsprechend angepasst wurde. Insgesamt wurden 40 gepaarte Messungen durchgeführt.

Resultate: PEEP reduzierte Q'_S/Q'_T und CO nur geringfügig, beeinflusste weder C_L noch C_{tot} in systematischer Weise, führte aber zu einer starken Vergrösserung der FRC. Das Verhältnis von ΔFRC zu $\Delta PEEP$ war zweimal grösser als auf der Basis von C_{tot} zu erwarten war. Dieser Befund und Beobachtungen am Patienten zeigen, dass eine schrittweise Erhöhung von PEEP eine viskoelastische Dehnung der Lunge bewirkt, deren Zeitkonstante rund eine Minuten beträgt. Die intrapulmonale Gasmischung blieb unbeeinflusst von der Respiro-Einstellung. PEEP und grosses V_T liessen PIE ansteigen. Dies kann sowohl durch Erhöhung des endinspiratorischen Lungenvolumens als auch durch erhöhte Dehnung der konvektiven Luftwege erklärt werden. Andererseits lässt die Vergrösserung von PIE bei erhöhtem V'_I bzw. seine Verkleinerung bei einer EIP auf die Verschiebung der stationären Front (stationary interface) schliessen. Die Verminderung der alv.eff.- CO_2 bei Erhöhung von V_T bedeutet zusätzliche alveoläre Totraumbelüftung was durch eine zeitliche Verschiebung von Ventilation und Perfusion in den unabhängigen Lungengebieten erklärbar ist.

Die untersuchten Patienten hatten nur eine geringfügige respiratorische Insuffizienz. Unterschiedliche Respiro-Einstellungen hatten sowohl positive als auch negative Effekte auf den Gasaustausch. Es war aber nicht

möglich alle positiven Effekte in einer einzigen Respi­rator-Einstellung zu vereinigen, d.h. es konnte keine "optimale" Einstellung des Respi­rators gefunden werden. Obwohl Aenderungen des Gasaustausches gemessen werden konnten, hatten sie im untersuchten Zeitraum keinen klinisch relevanten Einfluss auf den Verlauf. Es muss daher angenommen werden, dass noch genügend Kompensations-Mechanismen vorhanden waren, die selbst bei grossen Aenderungen der Respi­rator-Einstellung einen "normalen" pulmonalen Gasaustausch ermöglichten. Es ist anzunehmen, dass bei Patienten mit schwerer respiratorischer Insuffizienz die Kompensationsmechanismen geschwächt sind. In solchen Fällen hat die Respi­rator-Einstellung vermutlich eine grössere Bedeutung.

Summary

Many attempts have been made to investigate the effect of the ventilator settings on pulmonary gas exchange during mechanical ventilation. The results provide some insight but are in part controversial or not sufficiently detailed for a full understanding of the effects. The difficulties encountered are primarily connected with the methods of measuring the pertinent parameters with sufficient accuracy and with the analysis of the associated data. A system was therefore developed to simultaneously determine the following lung function indices: compliance of the lung (C_L) and of the total respiratory system (C_{tot}), the airway resistance (R_{AW}), lung volume parameters (FRC), the efficiency of alveolar gas mixing (mix.eff.), the airway dead space (PIE) as well as the alveolar efficiency of CO_2 elimination (alv.eff.- CO_2). These indices are derived from the time course of 7 signals measured noninvasively at the outer end of the endotracheal tube, namely the in- and expiratory volume flow of the gas, the airway pressure and the partial pressures of N_2 , O_2 , CO_2 and argon. In addition the pressure in the oesophagus was recorded as a function of time. For these purposes a Fleisch pneumotachograph, a mass spectrometer and three pressure transducers were utilized. All tubes leading to the individual transducers as well as the capillary leading to the mass spectrometer are integrated together with the pneumotachograph to form a compact assembly which interconnects the patient and the ventilator. The various signals recorded are sensitive to changes in temperature, pressure and viscosity and exhibit time lags of different degrees. The time lags are also sensitive to changes in temperature, pressure and viscosity. With the aid of a microcomputer the effects of such changes are compensated and the signals synchronized. Furthermore a ventilator was modified to allow for the N_2 washout manoeuvre in order to determine FRC and the mixing efficiency.

The accuracy of PIE and FRC measurements has been evaluated with the aid of a specially designed lung model and revealed deviations of less than 3%. The reproducibility of the breath by breath indices C_L , C_{tot} , R_{AW} , PIE and alv.eff.- CO_2 was tested on six mechanically ventilated patients after heart surgery and the corresponding coefficient of variation was 4.5%. The reproducibility of the N_2 washout was assessed in terms of duplicate measurements on 7 patients. The FRC values were stable within ± 66 ml or

$\pm 3.1\%$. The sensitivity of the indices is far better than that of conventionally measured parameters such as physiological dead space (V_D/V_T), effective compliance (C_{eff}) and arterial P_{CO_2} and P_{O_2} . This has been shown on three patients with acute and severe lung pathology.

The measuring system was applied on a group of patients with uneventful postoperative recovery in order to examine the influence of the ventilator settings on gas exchange. In addition to the above mentioned indices the fraction of venous admixture (Q'_S/Q'_T) and the cardiac output (CO) were measured on 18 patients after heart surgery. After each patient had been measured under reference conditions, one of the following 4 variables was changed: tidal volume V_T was reduced from 941 ml to 586 ml and also increased to 1298 ml, the inspiratory volume flow rate V'_I was increased from 386 ml/sec to 740 ml/sec, the end inspiratory pause EIP was prolonged from 0 to 1 second and the end expiratory airway pressure PEEP was increased from 0 to 6 and then to 11 cmH₂O. The arterial P_{CO_2} was kept constant by adjusting the expiration time accordingly.

A total of 40 paired measurements was carried out. The results can be summarized as follows: Increases in PEEP caused merely minor changes in Q'_S/Q'_T and CO, $\Delta PEEP$ neither influenced C_L nor C_{tot} in a systematic manner but caused a substantial enlargement of FRC. The ratio of ΔFRC to $\Delta PEEP$ was twice as large as would be expected on the basis of C_{tot} . This finding together with observations show that stepwise increases in PEEP cause viscoelastic distensions of the lung with time constants of about one minute. Gas mixing was not affected by the ventilator settings. Increases in PEEP and in V_T caused augmentation in PIE. This can be explained either by the increase of the endinspiratory lung volume or by the increased distension of the convective airways. On the other hand the enlargement of PIE at increased V'_I and its reduction when an EIP is introduced lead to the conclusion that the stationary interface has been shifted. The diminution of $alv. eff.-CO_2$ when V_T is increased implies an additional alveolar dead space ventilation which could be explained by a temporal mismatch of ventilation and perfusion in the nondependent lung regions.

The patients examined exhibited only minor respiratory insufficiency. Different ventilator settings influenced gas exchange in a positive and in a negative sense. It was, however, not possible to achieve all positive effects with a single respirator setting which means that no optimal

XIII

setting could be identified. Although alterations of the gas exchange could be measured, they had no clinically relevant influence on the patients recovery during the time of observation. It must therefore be assumed that all patients were able to recruit compensatory mechanisms which enabled an adequate gas exchange even after large changes of the ventilator settings. Presumably, these compensatory mechanisms are weakened in patients with severe respiratory insufficiency. In such cases the setting of the ventilator may be of greater importance.