

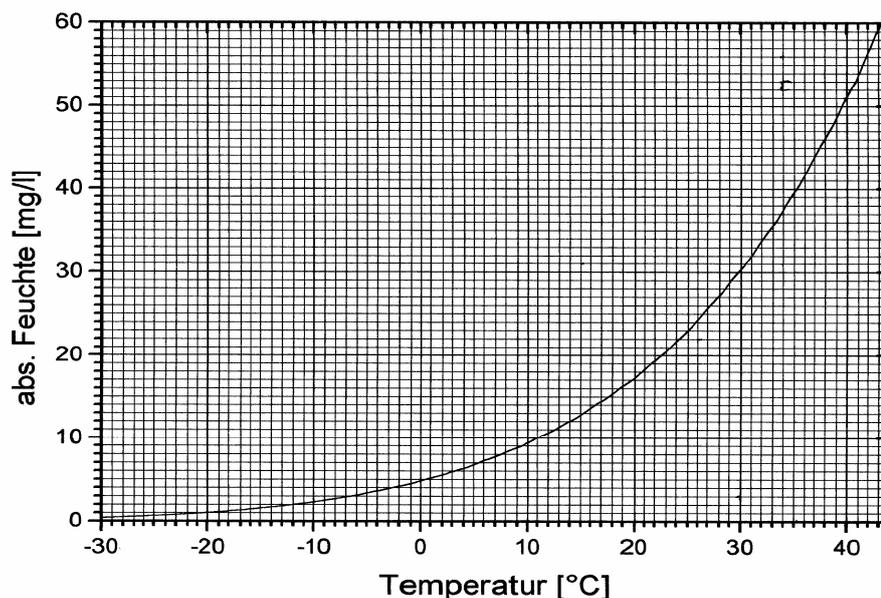
1. Einleitung

1a. Grundlagen der Atemgaskonditionierung

Atemluft wird physiologischerweise während der Einatmung vollständig auf Körpertemperatur erwärmt, von Schmutzpartikeln gereinigt und mit Wasserdampf gesättigt (1). Unter Nasenatmungsbedingungen sorgen die oberen Atemwege, bestehend aus Nasen-Rachenraum sowie Larynx und oberem Teil der Trachea, für den Hauptteil der Erwärmung, Reinigung und Befeuchtung der Atemluft (1).

Dabei bezeichnet Feuchtigkeit die in einem Gas enthaltene Menge an Wasserdampf. Unterschieden wird zwischen der absoluten Feuchtigkeit und der relativen Feuchtigkeit. Die absolute Feuchtigkeit ist die tatsächlich in einem Gas enthaltene Menge an Wasserdampf, sie wird in mg/l gemessen. Die relative Luftfeuchtigkeit bezeichnet das Verhältnis von absoluter Luftfeuchtigkeit zu maximaler Luftfeuchtigkeit (der Menge, die das Gas bei einer gegebenen Temperatur maximal aufnehmen kann) in Prozent. Die relative Feuchtigkeit ist nur aussagekräftig, wenn gleichzeitig die Temperatur des Gases bekannt ist (2). Das Verhältnis von maximaler absoluter Feuchtigkeit (abgekürzt: Feuchte) und Temperatur ist durch folgenden Graphen illustriert (3):

Abb.1: Zusammenhang zwischen absoluter Feuchte und Temperatur



Die maximale absolute Feuchtigkeit ist bei bekannter Temperatur durch folgendes Polynom zu errechnen:

$$Y = 4,84755 + 0,33465 X + 0,01013 X^2 + 1,73335 \times 10^{-4} X^3 + 1,7824 \times 10^{-6} X^4 + 1,01316 \times 10^{-8} X^5 + 1,30095 \times 10^{-11} X^6,$$

wobei X = Temperatur in Grad Celsius und

Y = absolute Feuchte in mg/l bei 100 % relativer Feuchte bezeichnet (3).

Durch Dreisatzrechnung erhält man dann die zur gemessenen relativen Feuchte zugehörige absolute Feuchte. Alternativ kann der Wert der absoluten Feuchte aus Tabellen entnommen werden.

Folgende Beispielrechnung beschreibt quantitativ den physiologischen Ablauf der Atemgaskonditionierung (4): Raumluft mit 22°C und 50% relativer Feuchte (entsprechend 10 mg/l absoluter Feuchte) nimmt bei ruhiger Nasenatmung bis zur Tracheamitte ungefähr 25 mg/l (73% der Befeuchtungsleistung) und im weiteren Verlauf im Tracheobronchialbaum bis zu den Hauptbronchien noch weitere 9 mg/l Wasser (27% der Befeuchtungsleistung) auf, um in der Lunge eine Sättigung von 100% relativer Feuchte bei 37°C Körpertemperatur (entsprechend 44 mg/l absoluter Feuchte) zu erreichen (4). Dem steht bei der Ausatmung eine nur geringe Temperaturdifferenz bis zur Nase von 5°C gegenüber, so dass die Ausatemluft bei 32°C mit 100% relativer Feuchtigkeit noch etwa 34 mg/l Wasser enthält.

Daraus ergibt sich in der Bilanz eine Perspiratio pulmonalis insensibilis (unsichtbarer Feuchtigkeitsverlust über die Atmung) von 24 mg/l, die sich mit 17 mg/l aus den oberen Atemwegen und mit 7 mg/l aus der Lunge zusammensetzt (4).

Die Erwärmung und Anfeuchtung in den oberen Atemwegen geschieht so effektiv, dass trotz höchst unterschiedlicher Temperatur und Feuchte der Außenluft in der Lungenperipherie praktisch immer konstante Bedingungen, nämlich Körpertemperatur und 100% relative Feuchte, herrschen (1). Die Grenze, an der die einströmende Luft 100% relative Feuchte bei Körpertemperatur erreicht, wird isotherme Sättigungsgrenze

genannt (5). Ihre Lage im Tracheobronchialbaum ist abhängig von Temperatur und Feuchte der Umgebungsluft, Nasen- oder Mundatmung, bestimmten Erkrankungen wie beispielsweise Mucoviszidose oder chronisch obstruktiver Bronchitis und der Höhe des Atemzugvolumens bzw. Atemminutenvolumens (1,5-7).

Bei den oben beschriebenen Verhältnissen (ruhige Nasenatmung mit Raumlufttemperatur von 22°C und 50% relativer Feuchte) liegt die isotherme Sättigungsgrenze beim Erwachsenen wenige Zentimeter unterhalb der Trachealbifurkation, kann aber bei Atmung kalter, trockener Luft mit gesteigertem Atemminutenvolumen erheblich in Richtung der Peripherie des Tracheobronchialbaumes verschoben werden (1,7). Erlebnisberichte alpiner Bergsteiger beispielsweise, schildern eindrücklich die Schwierigkeiten, die unter den extremen Umweltbedingungen (kalte, trockene Luft) mit gleichzeitig erheblich gesteigertem Ventilationsbedarf auftreten können (8). Der Verlust an Wärmeenergie durch Atmung ist dabei weniger auf die direkte Temperaturwirkung der Atemluft, als auf den Wärmeentzug durch Verdunstung zurückzuführen. Um 1g körperwarmes Wasser zu verdampfen, ist eine Energie von 2,4 kJ erforderlich (2,9). Legt man der Kalkulation 24 mg/l respiratorischen Wasserverlust bei ruhiger Nasenatmung mit einem mittleren Atemminutenvolumen von 7 l/min für einen durchschnittlichen Erwachsenen zugrunde, beträgt der tägliche Wasserverlust etwa 240 ml und der entsprechende Energieverlust ca. 600 kJ oder 25 kJ/h. Die Erwärmung wasserfreier Luft ist dagegen weit weniger energieaufwendig. Beispielsweise benötigt die Erwärmung des entsprechenden „trockenen“ Atemvolumens um 15°C von 22°C auf 37°C lediglich etwa 5 kJ/h. Bringt man die Gesamtwärmeproduktion eines durchschnittlichen Erwachsenen in Ruhe mit ca. 250 kJ/h (240-400 kJ/h) in Ansatz, beträgt der Anteil des respiratorischen Wärmeverlustes an der Gesamtwärmeproduktion etwa 10% (3,9).

Während sich die isotherme Sättigungsgrenze bei ruhiger Nasenatmung durch die physiologische Erwärmung und Anfeuchtung in den oberen Atemwegen nicht wesentlich in Richtung Lungenperipherie verschiebt (1), stellt sich die Situation nach Schaffung eines künstlichen Atemweges grundlegend anders dar (5,10,11). Werden die oberen Atemwege durch einen Endotrachealtubus überbrückt, können sie ihre wichtige

Klimatisierungsfunktion nicht mehr wahrnehmen. Würde auf eine spezielle Atemgaskonditionierung bei beatmeten Patienten verzichtet, wäre die Situation folgende: Die maschinelle Beatmung auf unserer Intensivstation erfolgt bei ca. 25-26°C Raumtemperatur. Die zentrale Gasversorgung liefert trockenes Frischgas (absolute Feuchte <1 mg/l). Obwohl das patientennahe Beatmungsschlauchsystem bei fehlender aktiver oder passiver Anfeuchtung einen gewissen Teil der Befeuchtung und Erwärmung im Sinne eines Heat and Moisture Exchangers (HME) übernehmen würde, müsste der Hauptteil durch die Lunge erfolgen. Unterstellt man nach Rathgeber et al. etwa 5 mg/l Befeuchtungs- und Kondensationsleistung durch das Schlauchsystem bei 1 mg/l Frischgasfeuchte und addiert noch 2 mg/l durch die HME - Wirkung des Endotrachealtubus bis zur Tubusspitze in der Tracheamitte hinzu, leisten die tieferen Atemwege den Grossteil der Befeuchtung von weiteren 36 mg/l auf den Vollsättigungswert von 44 mg/l bei 37°C Körpertemperatur (9). Ohne Befeuchtungssystem würden bei Expiration etwa 11 mg/l durch Kondensation zurückgewonnen, wobei davon nur etwa 4 mg/l in der Lunge verblieben (9). Der Nettowasserverlust aus den tieferen Atemwegen würde nach dieser Modellrechnung 32 mg/l betragen (9). Diese Befeuchtungsleistung entspricht mehr als dem vierfachen dessen, was die Lunge physiologischerweise bei ruhiger Nasenatmung zu erbringen hat (4).

Die Folge wäre eine Verschiebung der isothermen Sättigungsgrenze weit in die Lungenperipherie hinein und eine Trocknung und Kühlung der Mukosa auch der kleineren Äste des Bronchialbaumes. Beatmung mit kalten und trockenen Atemgasen bewirkt zeitabhängig eine Schädigung des respiratorischen Epithels. Nach spätestens einer Stunde sind Schäden im Zellabstrich nachweisbar (11,12). Als sensitivster Marker für inadäquate Befeuchtung gilt die Abnahme der ziliären Schlagfrequenz des respiratorischen Epithels und damit die mukoziliäre Transportgeschwindigkeit (5). Sie nimmt ab noch bevor es zu strukturellen Epithelschäden kommt und lässt sich durch Wiederanfeuchtung der Atemgase erneut steigern, solange es noch nicht zu einem vollständigen Stopp der Zilienmotilität und damit zu irreversiblen Schäden an der Bronchialschleimhaut gekommen ist (13). Die Regeneration kann, je nach dem ob nur oberflächliche oder auch tiefere Epithelschichten betroffen sind, einige Tage bis Wochen in Anspruch nehmen (11). Darüber hinaus drohen die Verlegung kleinerer

Luftwege durch visköse, eingetrocknete Sekrete, Beeinträchtigung der Surfactantaktivität, Dys- und Atelektasen mit intrapulmonaler Shuntbildung und Verschlechterung des Gasaustausches (Hypoxie, Hyperkapnie), Schleimhautulzerationen, Bronchospasmus, Hypothermie und Infektionen (5,11,12,14,15). Daraus ergibt sich die Notwendigkeit der Atemgaskonditionierung.

Hierfür stehen prinzipiell zwei Wege offen: Aktive Befeuchtungssysteme (Verdampfer) oder passive Befeuchtungssysteme („künstliche Nasen“ – Heat and Moisture Exchanger). Aktive Befeuchtung bedeutet, dass Wasserdampf in den Inspirations-schenkel des Beatmungssystems eingebracht wird, indem zum Beispiel das Inspirationsgas über ein beheiztes Wasserbad geleitet wird (16). Um Kondensation im Beatmungsschlauch auf dem Weg zum Patienten zu minimieren, sind je nach Fabrikat auch die Beatmungsschläuche beheizt (Heizdrahtbetrieb) (16). Durch diese Systeme kann so ein hoher inspiratorischer Feuchtigkeitsgehalt erzielt werden. Aktive Befeuchter sind allerdings nicht ohne potentielle Gefahren. Es kann zu mangelhafter Befeuchtung kommen, wenn die Atemwegtemperatureinstellung inkorrekt ist oder mit hohen Atemminutenvolumina (>10-15 l/min) beatmet wird (17). Umgekehrt kann auch Überbefeuchtung zu Schäden führen. Störung der mukoziliären Clearance, erhöhtes Sekretvolumen, Auflösung der Gelphase des mukoziliären Transportbandes, abnehmende Surfactantaktivität und die Verlegung kleiner Atemwege mit der Folge von Atelektasen und Hypoxie sind beschrieben (5). Auch Fehlfunktionen sind möglich. So sind Verbrühungen der Atemwegsschleimhaut („hot pot“ tracheitis) in Einzelfällen berichtet worden (18). Dazu können hygienische Probleme treten. Es kommt fast regelhaft zur Kontamination des Beatmungsschlauchkondensats durch Patientensekrete und es mehren sich die Hinweise, dass aktive Befeuchter eine Rolle bei der Ventilator-assoziierten Pneumonie spielen können (19-22). Darüber hinaus sind aktive Befeuchtungssysteme kostenintensiv (23).

Passive Befeuchtungssysteme (Heat and Moisture Exchanger – HME), ursprünglich in den 1930er Jahren entwickelt und in den 1970er Jahren zunehmend auf ihre klinischen Eigenschaften hin untersucht, sind inzwischen besonders in Europa weit verbreitet (24,25). Einige Modelle stellen aufgrund ihrer guten Befeuchtungsleistung eine

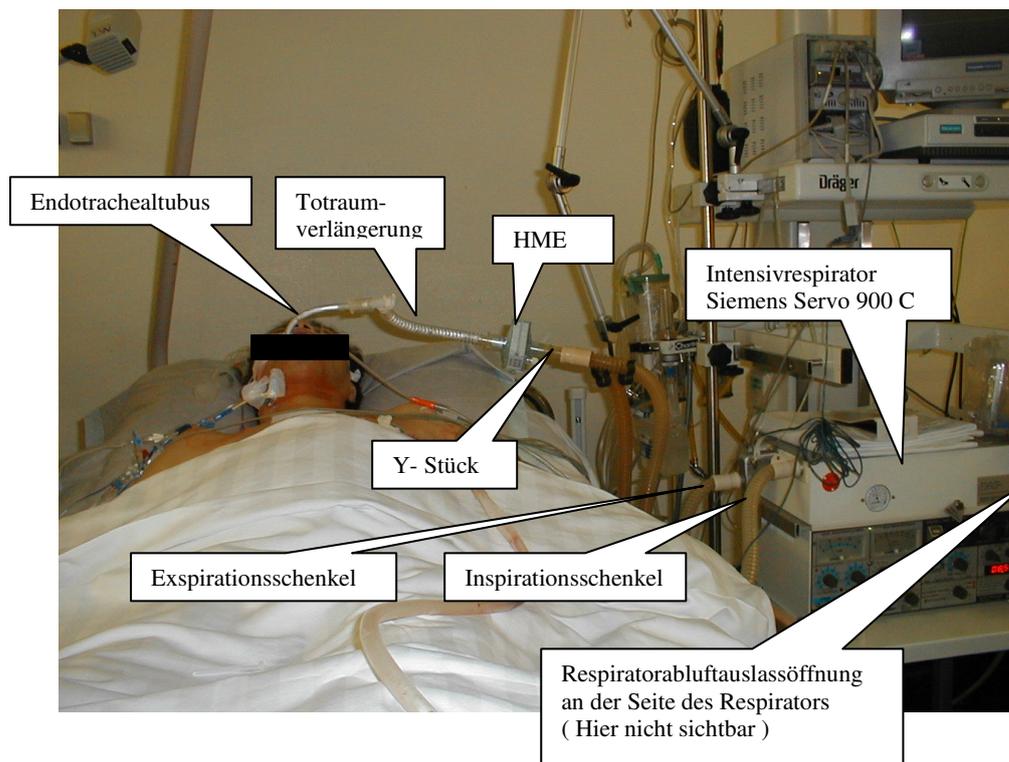
kostengünstige Alternative zu aktiven Befeuchtern dar (23,26-28). Erwärmung und Befeuchtung der Inspirationsluft erfolgt passiv über die Konservierung der Wärme und der Feuchtigkeit der Expirationsluft (29). Da die Feuchtigkeit im System vom Patienten selbst stammt, ist Überbefeuchtung nicht zu befürchten. Dagegen sind je nach Fabrikat Bedenken hinsichtlich unzureichender Befeuchtung und ungünstiger mechanischer Eigenschaften, insbesondere im längerfristigen Einsatz in Nicht-Rückatmungssystemen (z.B. Intensivventilatoren), nicht unbegründet: Verschiedentlich ist über erhöhte Tubusokklusionsraten durch zähe, eingetrocknete Sekrete, besonders bei Verwendung hydrophober HME, berichtet worden (30-33). Der Atemwegswiderstand kann sich erhöhen (34-36) und der Totraum wird durch Einsatz von HME im Beatmungssystem vergrößert (37-39), was in Einzelfällen (Weaning bei COPD-Patienten, CO₂-Elimination bei ARDS-Patienten im Rahmen lungenprotektiver Beatmungsstrategien) klinische Bedeutung erlangen kann (39).

Einen Vorteil scheinen die hydrophoben HME hinsichtlich der Ventilator-assoziierten Pneumonien (VAP) zu bieten: Kirton et al. konnten eine signifikante Abnahme der VAP von 16% auf 6% feststellen (26). Andere Studien fanden dagegen keinen signifikanten Unterschied in der Inzidenz der VAP beim Vergleich aktiver und passiver Befeuchtungssysteme (27,40-43). Eine neuere Meta-Analyse von 8 randomisierten, kontrollierten Studien zwischen 1990 und 2003 zeigt jedoch ebenfalls eine signifikante Reduktion in der Inzidenz der VAP für die HME-Behandlungsgruppe (89). Hydrophobe HME haben überlegene Filtereigenschaften und können virale, bakterielle und allergene (z.B. Latexpartikel) Kontamination verhindern (44). Das macht ihren Einsatz besonders im Operationssaal oder bei Patiententransporten sinnvoll, wo Kreuzkontaminationen durch Patientenwechsel verhindert werden sollen (44). Ihr längerfristiger Einsatz in Nicht-Rückatmungssystemen auf Intensivstationen wird dagegen aufgrund ihrer vergleichsweise schwachen Befeuchtungsleistung kontrovers diskutiert (4,43,45).

1b. Funktionsprinzip eines HME

Aus den oben angeführten möglichen Folgen des unphysiologisch hohen pulmonalen Wasserverlustes von 32 mg/l bei maschineller Beatmung ohne Befeuchtung und Rückatmung, ergibt sich die Anforderung an einen HME, den Wasserverlust aus den tiefen Atemwegen möglichst auf eine physiologische Größenordnung (etwa 7 mg/l) zu reduzieren (4). Dazu wird der Heat and Moisture Exchanger zwischen das den Expirations- und Inspirationsschlauch verbindende Y-Stück und den Beatmungstubus gesetzt, so dass sowohl Inspirations- als auch Expirationsgas durch ihn hindurchgeführt werden.

Abb.2: Aufbau des Beatmungssystems



Im Gleichgewichtszustand wird das trockene Frischgas in der Inspiration durch Verdunstung an der Filteroberfläche befeuchtet, erhält in der Lunge den zur Vollsättigung bei Körpertemperatur fehlenden Feuchtigkeitsanteil, und wird anschließend in der Expiration durch Kondensation am HME entfeuchtet. Treibende Kraft der Verdunstung bei Inspiration ist der niedrige Wasserdampfdruck des Frischgases und das Temperaturgefälle zwischen Filterwasser und Frischgas, das die Konvektion bewirkt. Die Verdunstungskälte und Konvektion kühlt das Filterwasser ab. Die Kondensation bei Expiration ergibt sich dann aus der niedrigen Temperatur des Filterwassers gegenüber dem Taupunkt des gesättigten Gases. Die Konvektion und Kondensation bewirken eine Wiederaufheizung des Filters. Im Gleichgewichtszustand ist die Befeuchtungsleistung der Lunge in der Inspiration in mg/l direkt aus dem Feuchtigkeitsverlust in mg/l im Expirationsschenkel (z.B. am Respiratorauslass) ablesbar (siehe Teil Messprinzip), vorausgesetzt, es kommt nicht zu fortlaufender Wasserakkumulation im HME („Abtropfen“). Eine Überbefeuchtung ist durch HME's prinzipiell nicht möglich, da es außer dem Patienten selbst keine Feuchtigkeits- und Wärmequelle im System gibt.

Der in der vorliegenden Arbeit benutzte HME, Pall Ultipor 100 ist ein reiner Kondensbefeuchter.

Abb.3: HME Pall Ultipor 100



In seinem Inneren befindet sich eine gefältete, hydrophobe Filtermembran aus Mineralfasermaterial, der respiratorseitig ein hydrophiles Cellulosegewebe angelagert ist. Das Volumen des transparenten Filtergehäuses beträgt 85 ml. Seine Filtrationseffizienz bei flüssigkeitsgebundenen Bakterien/Viren wird in der Produktinformation des Herstellers mit 100%, die Filtrationseffizienz für luftgebundene Bakterien/Viren mit mindestens 99,999%, angegeben. Laut Produktinformation des Herstellers beträgt der Wasserverlust 8 mg/l bis zu einem Tidalvolumen (Atemhubvolumen) von 800 ml und 9,5 mg/l für Tidalvolumina zwischen 800 und 1000 ml. Ein Filterwechsel wird laut Hersteller nach 24 Stunden empfohlen, das Wechselintervall könne aber ohne Medikamentenvernebelung auf 48 Stunden verlängert werden.

Andere Fabrikate nutzen Spezialpapiere, Zellstoffschwämme, Polyurethan- oder Polyethylenschaumstoffe als wasserspeichernde Medien. Zusätzlich zu diesen rein physikalischen Vorgängen von Verdunstung und Kondensation wird in einigen Filtermodellen die Wasserspeicherkapazität chemisch durch Beschichtung mit hygroskopischen Substanzen wie beispielsweise Magnesium- oder Kalziumsalzen erhöht.

Sollte sich eine präventive Wirkung der hydrophoben HME hinsichtlich der Ventilator-assoziierten Pneumonien in weiteren Studien bestätigen, so ist angesichts der erheblichen medizinischen wie auch finanziellen Probleme, die die Ventilator-assoziierten Pneumonien in der Intensivmedizin darstellen, der Einsatz hydrophober HME's auf Intensivstationen naheliegend (46). Die tatsächliche Befeuchtungsleistung hydrophober HME's unter klinischen Bedingungen in Nicht-Rückatmungssystemen ist in diesem Zusammenhang von Interesse.