

Beatmungsformen

Der Respiратор	2
CMV (Controlled Mechanical Ventilation - Kontrollierte maschinelle Beatmung)	3
High Frequency-Ventilation (HFV)	3
PCV (Pressure Controlled Ventilation)	4
Inversed Ratio Ventilation (IRV)	4
Seitengetrennte Beatmung	5
Synchrone Ventilation:	5
Asynchrone Ventilation:	5
Alternierende Ventilation:	5
Extrakorporale CO₂-Elimination (ECCO₂-R)	5
CPAP (Continuous Positive Airway Pressure)	6
High-Flow-CPAP:	6
Demand-Ventil-CPAP (z.B. Servo 900 C):	6
SIMV (Synchronous Intermittend Mandatory Ventilation)	7
APRV Airway Pressure Release Ventilation	7
BIPAP Biphaseic Positive Airway Pressure	8
PSV (Pressure Support Ventilation)	9
Proportional Assist Ventilation (PAV)	9
M M V (Mandatory Minute Ventilation)	10
Die Eiserne Lunge	10
Weaning	11
Literaturhinweise	12

Der Respirator

Eine Definition zu Anfang:

- Spontanatmung ist die aktive Einatmung (= Inspiration) und passive Ausatmung (= Expiration) durch den Patienten selbst,
- Beatmung ist die Übernahme der inspiratorischen Atemarbeit durch ein Beatmungsgerät (Respirator),
- unterstützte Spontanatmung ist die aktive Ein- und passive Ausatmung durch den Patienten selbst, wobei die Einatmung durch mechanische Hilfsmittel mehr oder weniger stark unterstützt wird (inspiratorische Assistenz).

Bei Ausfall der Atemmuskulatur durch Ateminsuffizienz auf der Intensivstation wird die Lunge des Patienten mit Hilfe eines Respirators (Ventilators) künstlich beatmet. Dabei wird über einen in der Trachea liegenden Tubus die Respiratorluft periodisch unter Überdruck - Ausnahme die Eiserne Lunge, siehe dort - in die Lunge gepreßt. Am Ende einer jeden Inspirationsphase wird der Luftstrom unterbrochen. Jetzt drücken die elastischen Rückstellkräfte der Lunge die Luft wieder aus der Lunge heraus.

Die respiratorischen Parameter wie (Be-) Atemfrequenz, Atemzug-, bzw. Atemminutenvolumen und das Verhältnis von Inspirations- zu Expirationszeit sowie den Sauerstoffanteil am inspiratorischen Gasgemisch wird am Respirator fest eingestellt.

Überwachungssysteme verhindern, bzw. melden durch akustische und/oder optische Warnsignale für den Patienten gefährliche Situationen wie z.B. Dekonnektion vom Respirator oder zu hoher Beatmungsdruck.

Teilweise können die Respiratoren auf diese Gefahren reagieren. So unterbricht der Respirator bei überschreiten der oberen Beatmungsdruckgrenze die Inspiration und leitet die Expiration ein.

Entspricht der end-expiratorische Druck dem Atmosphärendruck können bei länger andauernder Beatmung Atelektasen durch eine Umverteilung von lokalen Perfusions/Ventilations-Verhältnissen entstehen. Daher besitzen die Respiratoren die Möglichkeit einen externen positiv-end-expiratorischen Druck (PEEP) zu wählen, der dies verhindert und zugleich die Gefahr eines Lungenödems vermindert.

Moderne Respiratoren erlauben die teilweise oder vollständige Übernahme der Ventilation, d.h. sie können die Spontanatmung des Patienten unterstützen, sie aber auch ersetzen.

Diese teilweise oder vollständige Übernahme der Ventilation durch den Respirator ist indiziert, wenn

- ⇒ eine alveoläre Hypoventilation durch Störungen der Atemmechanik oder auch des Atemantriebes vorliegen,
- ⇒ welche nicht in hinreichender Zeit beseitigt werden können oder
- ⇒ durch Erkrankungen des Lungenparenchyms anders nicht zu beherrschende Gasaustauschstörungen auftreten.

Eine Respiratorbehandlung zielt immer auf die Wiederherstellung der Spontanatmung mit einer intakten alveolären Gasaustauschfläche hin. Hierzu ist die Vermeidung iatrogenen Schäden der Respiratortherapie Grundbedingung, d.h. die Respirator-Therapie muß dem Patienten angepaßt sein und nicht der Patient dem Respirator.

Je effektiver die Spontanatmung des Patienten ist, um so angepaßter soll der Respirator den Patienten mit seiner Beatmungs-Mechanik unterstützen; die vollständige Übernahme der Ventilation unter bewußter Ausschaltung der Spontanatmung sollte bei modernen Respiratoren nur noch selten erforderlich sein.

Eine Relaxierung, bzw. eine die Spontanatmung des Patienten ausschaltende hinreichend tiefe Sedierung führt immer zu einer Hypoventilation und Atelektasenbildung in den zwerchfellnahen Abschnitten der Lunge.

Dieser Atelektasenbildung kann selbst eine minimale Spontanatmung des Patienten entgegenwirken.

Es können verschiedene Beatmungsformen unterschieden werden:

Spontanatmung unterstützend	Spontanatmung ersetzend	Mischform der beiden
PSV Pressure Support Ventilation	CMV Controlled Mechanical Ventilation	BIPAP Biphasic Positive Airway Pressure
CPAP Continuous Positive Airway Pressure	PCV Pressure Controlled Ventilation	Eiserne Lunge
MMV Mandatory Minute Ventilation	IRV Inversed Ratio Ventilation	
APRV Airway Pressure Release Ventilation	HFV High Frequency Ventilation	
SIMV Synchronous Intermittend Mandatory Ventilation	Seitengetrennte Beatmung	
	ECCO ₂ -R Extrakorporale CO ₂ -Elimination	

Auf die einzelnen Beatmungsformen soll nun im einzelnen näher eingegangen werden.

CMV

(Controlled Mechanical Ventilation - Kontrollierte maschinelle Beatmung)

Bei dieser Beatmungsform wird der zeitliche Ablauf (I:E-Verhältnis) ebenso wie das Atemzugvolumen (AZV) durch die Respiratoreinstellung bestimmt.

Eine Spontanatmung ist nicht möglich. Die intrapulmonalen Druckverhältnisse richten sich nach der Beschaffenheit der Lunge (Compliance, Resistance).

Daher verfügen Respiratoren über die Option „Einstellung des oberen Atemwegspitzendruckes“, der bei einer Überschreitung des maximal gewünschten Spitzendruckes durch den Respirator warnt und in der Regel bei Erreichen des Spitzendruckes den Beatmungshub abbricht.

Auf Grund des vom Respirator gemessenen Spitzendruck im Bereich der oberen Atemwege kann man sich den Spitzendruck im Bereich der Alveolen gemäß des Gesetzes von Laplace

$$P = 2 * T / r; \quad \text{mit } P = \text{Beatmungsdruck,}$$
$$T = \text{Oberflächenspannung;}$$
$$r = \text{Radius des respiratorischen Gefäßes}$$

berechnen:

Spitzendruck in den Hauptbronchien [mm Hg]	Spitzendruck in den Alveolen [mm Hg]
30	417
25	347
20	278
15	208
10	139
5	69

wobei $T_{\text{Alveole}} \approx T_{\text{Hauptbronchien}} / 4$; $r_{\text{Alveole}} = 0,12 \text{ bis } 0,15 \text{ [mm]}$; $r_{\text{Hauptbronchus}} = 5,5 \text{ bis } 9,5 \text{ mm}$

Der Vorteil dieser Beatmungsform ist die Volumenkonstanz des AZV trotz Veränderung der Lungenverhältnisse (z.B. keine Hyperventilation neurochirurgischer Intensivpatienten durch Verbesserung der Lungencompliance und Anstieg des AZV, bzw. Hyperkapnie durch Verschlechterung der Compliance). Diese Beatmungsform verlangt einen tief sedierten (und/oder relaxierten) Patienten, der nicht in der Lage ist, eine Spontanatmung zu entwickeln.

Heutzutage, wo immer mehr klar wird, wie notwendig eine möglichst frühe Spontanatmung des Patienten zur Verhinderung bzw. Verbesserung des ARDS ist, ersetzt die SIMV-Beatmung mit entsprechend hoher SIMV-Frequenz weitestgehend die CMV-Beatmung.

Daher ermöglichen neue Beatmungsgeräte wie der Servo 300 dem Patienten mittels einer Steuerung einen höheren Flow zu erhalten.

Erzeugt der Patient bei seinem Inspirations-Versuch einen Sog, welcher unter einem voreingestellten end-expiratorischen Druckniveau liegt, so schaltet der Servo kurzfristig auf druckkontrollierte Beatmung um. Bei Triggerung liefert der Respirator nun einen Flow entsprechend dem Bedarf des Patienten. Sinkt der Flow auf den voreingestellten Wert zurück, schaltet der Respirator wieder auf volumenkontrollierte Beatmung um.

Man sollte jedoch auch hierbei immer bedenken: der Patient muß erst einen Sog gegen die Maschine aufbauen bis eine Spontanatmung ermöglicht wird. So kurz dieser Moment auch ist, er erhöht die Wahrscheinlichkeit der Ausbildung von Atelektasen.

CMV ist eine kontrollierte Beatmungsform, bei welcher der Patient passiv bleiben sollte, d.h. keine Spontanatmung vorhanden sein sollte.

High Frequency-Ventilation (HFV)

Der von Intensivmedizinern umgangssprachlich geführte Begriff 'Jet-Ventilation' meint in der Regel keine Jet-Ventilation, sondern die Hochfrequenz-Oszillations-Ventilation (HFO).

Die Unterschiede bestehen in der Atemfrequenz (AF) und dem Atemzugvolumen (AZV) (siehe Tabelle weiter unten).

Heute wird die HFV in der Intensivmedizin meistens als Kombination mit der CMV in den Spätstadien des ARDS eingesetzt. Die HFV überlagert hier also nicht die Spontanatmung des Patienten, sondern die maschinellen Hübe des Respirators.

Die HFV vermag hier oftmals für eine zusätzliche Eliminierung von CO_2 zu sorgen, so daß die AZV der CMV gesenkt werden können, woraus geringere Spitzendrücke der Beatmung resultieren.

Probleme ergeben hier das Monitoring der Beatmung: der in der Lunge herrschende Druck ist immer höher, als die Respiratoranzeige und die Volumenmessung überschätzt das AZV ebenfalls.

Die HFV bietet bei gleichem Beatmungsmitteldruck konventionellen Beatmungsstrategien gegenüber höhere endexpiratorische Lungenvolumina bei gleichzeitigem vermindertem endinspiratorischen Lungenvolumen.

Die Ruhigstellung der Lunge ist daher eine andere Anwendungsmöglichkeit der HFV:

- Bronchopleurale Fisteln
- Membransyndrom des Neugeborenen

Form	Flow	AF [1/min]	Gasabewegung insp.	Gasabewegung exp.	AZV [ml]	AMV [l]	Gaseintrittsgeschwindigkeit [m/sec]	Spitzenflow V_{max} [l/min]
HFPPV	dezelerierend	60 - 110	aktiv	passiv	200 - 300 $V_T > V_D$	20 - 30	30	1,5
HFJV	rehtangulär	100 - 400	aktiv	passiv	50 - 250 $V_T > V_D$	25 - 30	30	2,5
FDV		350 - 1500	aktiv	passiv	10 - 250	10 - 50	300	0,7
HFO	sinusoidaler	300 - 2400	aktiv	aktiv	90 - 120	90 - 120	80	4,0
CHFV		CMV:1-60 HFV: 100-3000	aktiv	aktiv oder passiv				

mit: HFPPV = High Frequency Positive Pressure Ventilation
HFJV = High Frequency Jet Ventilation
FDV = Forcierte Diffusions-Ventilation
HFO = High Frequency Oscillation
CHFV = CMV kombiniert mit High-Frequency Ventilation

PCV (Pressure Controlled Ventilation)

Bei der druckkontrollierten Beatmung wird bei der Respiratoreinstellung der maximale Spitzendruck und die Atemfrequenz festgelegt. Dadurch kann der optimale Beatmungsdruck für den Patienten festgelegt werden. Das Atemzugvolumen paßt sich der Beschaffenheit der Lunge an. Der Respirator beatmet den Patienten mit einem dezelerierenden Flow bis zum Erreichen des eingestellten Spitzendrucks, d.h. der inspiratorische Flow ist primär hoch und dezeleriert dann rasch. Daher muß die Überwachung des Atemminutenvolumens am Respirator entsprechend eng eingestellt werden.

Bei druckkontrollierter Beatmung können Patienten in der Regel mit niedrigeren Atemwegspitzendrücken und niedrigeren Ventilationsvolumina beatmet werden als mit konventioneller Beatmungstherapie (CMV) unter gleich guten (gleich schlechten) Ergebnissen der Blutgasanalysen. Die höheren Atemwegmitteldrücke der druckkontrollierten Beatmung können jedoch die Hämodynamik und damit den Sauerstofftransport beeinträchtigen.

Eine gute Alternative bietet hier das BIPAP:

- 1) die Erhaltung der Spontanatmung bei dieser druckkontrollierten Beatmungsform reduziert die Beeinträchtigung der Hämodynamik erheblich
- 2) Die Erhaltung der Spontanatmung bewirkt durch Phrenikus-Aktivierung einen weiteren Abbau von Atelektasen.

Inversed Ratio Ventilation (IRV)

Unter der „inversed ratio ventilation“ versteht man ein Beatmungsmuster, bei dem die Dauer der Inspiration größer ist als die der Expiration ($I:E \geq 1$).

Hieraus ergeben sich viele Vorteile, jedoch auch einige Nachteile, bei der Beatmung kritisch Kranker:

- Reduktion des arteriovenösen Shunts in der Lunge durch
 - Ansteigen des end-expiratorischen alveolären Druckes durch PEEP_i
 - Umverteilung des extravaskulären Lungenwassers aus dem Alveolarraum in den extravasculären interstitiellen Raum
- Reduktion des funktionellen Totraums durch
 - Verlängerung der Inspirationszeit
⇒ größere Verteilung des inspiratorischen Gasgemisches
⇒ Reduktion der Überblähung von einzelnen Lungenanteilen
 - Erhöhung der seitengleichen Belüftung
 - größere Vermischung der alveolären und bronchialen Gasgemische
- Auswirkungen auf dem mittleren alveolären Druck (MAP)
 - Anstieg des MAP durch IRV mit geringerem Anstieg des end-expiratorischen alveolären Druckes als unter Beatmung mit entsprechend hohem PEEP
- pulmonale Nebenwirkungen
 - höhere alveoläre Drücke ⇒ höhere Flüssigkeiten-Flußrate vom systemischen in den pulmonalen Kreislauf ⇒ höhere Inzidenz zum Lungenödem
- hämodynamische Nebenwirkungen
 - Reduzierung des HZV/CI durch Anstieg des intrathorakalen Druckes ⇒ höhere Katecholamin-Gaben erforderlich

- Sedierung/Relaxierung
 - I:E-Verhältnis $\geq 1:1$ erfordern in der Regel eine sehr tiefe Sedierung, bzw. Relaxierung des Patienten; hier vermag BIPAP vielleicht eine Verbesserung darstellen, da hier auch unter IRV die Spontanatmung des Patienten gefördert wird

Seitengetrennte Beatmung

Unter konventioneller Beatmung werden beide Lungenflügel über einen Endotrachealtubus zugleich ventiliert. Bei der seitengetrenten Beatmung (= Independent Lung Ventilation, ILV) können die einzelnen Beatmungsparameter für jeden Lungenflügel unabhängig voneinander eingestellt werden.

Mit dieser Methode können also seitengetrent verschiedene Niveaus von PEEP angewendet werden; die Bedeutung dieser Option ist so groß, daß der Ausdruck „selektiver PEEP“ (SPEEP) oft als Synonym für diese Beatmungsform verwendet wird. SPEEP-Anwendung ist nur mit dem Carlens-Tubus (Ch. 39 und 41) möglich; der White-Tubus erwies sich hierfür als unbrauchbar.

In Seitenlage werden durch SPEEP der unteren Lunge ihre lagebedingten mechanischen Beeinträchtigungen (verminderte Compliance und erhöhte Resistance, West-Modell) ausgeglichen. Der Atelektasenbildung und Shunterhöhung wird so effektiver entgegengewirkt als durch PEEP über die gesamte Lunge.

Der Abfall des Herzminutenvolumens durch SPEEP ist weniger ausgeprägt als der Abfall des Herzminutenvolumens bei Applikation von PEEP über die gesamte Lunge; unter SPEEP steigen die Pleuradrücke beider Lungenseiten sowie der Perikarddruck weniger an als unter generalisiertem PEEP.

Voraussetzung für diese Beatmungsform ist natürlich die vollständige Trennung der Luftwege beider Seiten durch einen entsprechenden Doppellumentubus (z.B. Carlens-Tubus, White-Tubus, Robertshaw-Tubus).

Synchrone Ventilation:

Hier werden zwei Ventilatoren nach dem sogenannten 'Master and Slave' Prinzip elektronisch synchronisiert. Zwei typengleiche Respiratoren vorausgesetzt steuert hier der Inspirationsimpuls des einen Respirators den anderen. Bei der Synchronisation wird die Atemfrequenz der maschinellen Beatmungshübe von beiden Respiratoren nur von der Einstellung des 'Master' Respirators bestimmt, d.h. bei dieser Einstellung kann der 'Slave' Respiator keine Plateauphase erzeugen. Die Inspirationszeit des 'Slave' Respirators wird von dem voreingestellten Atemzugvolumen und der voreingestellten Flowgeschwindigkeit bestimmt; die I:E-Einstellung ist hierbei völlig bedeutungslos.

Asynchrone Ventilation:

Bei der asynchronen Beatmungsform können zusätzlich noch die Atemfrequenzen und I:E-Verhältnisse separat eingestellt werden.

Alternierende Ventilation:

Unter 'alternierende Ventilation' versteht man eine fixierte asynchrone Ventilation, bei der beide Respiratoren genau zeitlich abwechselnd arbeiten. Hierdurch verringert sich der intrathorakale Druck und die Compliance wird verbessert. Meistens resultiert hieraus eine Verbesserung des Gasaustausches, da bei dieser Beatmungsform eine geringere Beeinträchtigung der Hämodynamik bei erhöhten Beatmungsdrücken beobachtet wurde.

Wenn die Unterschiede von C, V/Q, Q_s/Q_T und PEEP-Niveau weniger als 20 % (kranke vs. gesunde Lunge) betragen, kann der Doppellumentubus gegen einen konventionellen Endotrachealtubus ausgetauscht werden.

Extrakorporale CO₂-Elimination (ECCO₂-R)

Bei einem fortgeschrittenen ARDS kann die konventionelle Überdruckbeatmung auf Grund immer höher steigender Beatmungsdrücke und inspiratorischer Sauerstoffkonzentrationen - welche benötigt werden um die Sauerstoffaufnahme und die CO₂-Abgabe aufrechtzuerhalten - selbst zu Lungenschäden führen.

Um die Lunge zu entlasten, wurde das Konzept der ECCO₂-R entwickelt, welches über externe Membranen CO₂ entfernt.

Hierzu wird das Blut über einen großlumigen venösen Zugang in ein Reservoir geleitet und mit einer Rollerpumpe (ähnlich der CVVH) durch zwei Membranlungen transportiert. Hier wird auf der Luftseite der gasdurchlässigen Membranen ein O₂-Luft-Gemisch zugeführt, wodurch durch ein CO₂-Konzentrationsgefälle das CO₂ eliminiert wird.

Im Wasserkreislauf regelt eine thermostatgesteuerte Wasserpumpe über einen Wärmeaustauscher die Bluttemperatur, wodurch die Beeinträchtigung der Körperkerntemperatur weitestgehend verhindert wird. Gleichzeitig erfolgt eine Oxygenierung des Patienten durch Apnoische Ventilation, d.h. über ein CPAP-System bleibt die Lunge des Patienten konstant gebläht auf einem Niveau von etwa 20 bis 30 cm H₂O, welches zur Oxygenierung erforderlich ist. Auf Carinaniveau befindet sich ein dünnlumiger Katheter, durch welchen ein steter O₂-Strom von 1 Liter pro Minute dem Patienten zugeführt wird. Eine Durchmischung der Atemgase in der Patientenlunge erfolgt durch etwa drei bis fünf druckbegrenzten Atemhüben mit einem

endexpiratorischen Druckniveau von ca. 5 cm H₂O über CPAP-Niveau.

Da dieses extrem hohe PEEP-Niveau häufig zu Pneumothoraces und Pneumatocele bei dem nahezu immer vorbestehenden interstitiellen Lungenemphysem führt, wird heute nahezu immer diese niederfrequente Beatmung mit apnoeischer Ventilation durch eine stärkere präpulmonale Oxygenierung (Bypassfluß von 3 bis 5 Liter O₂) und eine normofrequente druckbegrenzte Beatmung mit Atemwegsdrücken von 20 bis 30 cm H₂O bei deutlich niedrigeren PEEP-Niveau.

Die Ventilation erfolgt bei der ECCO₂-R also über die Membranlungen, die Oxygenierung jedoch über die Patientenlungen.

Dieses Management führt nicht nur zu einer Ausheilung des ARDS - vorausgesetzt die zugrundeliegende Krankheit wird überwunden -, sondern verhindert auch Folgeschäden durch die Beatmungstherapie.

Zum Monitoring gehören hier Kontrolle der Hämodynamik (Pulmonalkatheter), Lungenfunktionsparameter (AaDO₂, AaDO₂-Quotient, intra-pulmonale Rechts-Links-Shunt, O₂-Verbrauch, AP-Thoraxbild in tiefer inspiratorischer Atempause) sowie eine gezielte Kontrolle der plasmatischen Gerinnung (Thrombozytenanzahl und -funktion, Quick, PTT, PTZ, Fibrinogen, AT III Faktorenkontrolle).

CPAP **(Continuous Positive Airway Pressure)**

Beim spontan atmenden Patienten erfolgt eine positive Druckausübung in der Expirationsphase.

Ursprünglich stammt die CPAP-Therapie aus dem Bereich des pädiatrischen Beatmungregimes. Aufgabe des CPAP ist die Aufrechterhaltung der FRC der Lunge.

Neben der Verbesserung der Lungenmechanik durch eine Verschiebung der Atemmittellage in den steilen Teil des Druckvolumendiagramms wird die Oxygenierung durch eine günstigere Gasverteilung und ein verbessertes V/Q-Verhältnis positiv beeinflusst.

Durch die Erhöhung der Compliance und die häufig zu beobachtende Reduzierung der (Spontan-) Atemfrequenz kann die Atemarbeit reduziert werden, so daß eine frühere Entwöhnung vom Respirator möglich ist.

High-Flow-CPAP:

Das System besteht aus einem Gasmischer (Druckluft und Sauerstoff), welcher mindestens einen Flow ≥ 30 [l/min] aufbauen muß, einem Atemgasanfeuchter, der das Gasgemisch zugleich erwärmt (Patienten mit Endotrachealtubus brauchen aufbereitete Luft: angewärmt auf etwa 34°C und angefeuchtet bis zu etwa 80 % relativer Feuchtigkeit) und einem Reservoir-Beutel, der patientennah platziert sein sollte.

Richtungsventile sind eigentlich keine nötig, da bei einem entsprechendem Flow (> 25 [l/min]) Rückatmung nicht stattfinden kann.

Am Ende des Expirationsschenkels befindet sich ein PEEP-Ventil (bei nicht-intubierten Patienten nur PEEP von 0 bis 10 mm Hg, keine PEEP-Ventile bis 20 mm Hg; \Rightarrow Magenüberblähung, \Rightarrow Aspiration).

Zu beachten:

- \Rightarrow Atemgas-Flow mindestens des 2- bis 3fache des AMV, sonst Rückatmung möglich
- \Rightarrow Reservoir-Beutel mit ausreichender Compliance wählen, um den inspiratorischen Spitzendruck des Patienten ausgleichen zu können;
keine 4-Liter-Beutel der Anästhesie verwenden !
- \Rightarrow keine englumigen Elemente nach dem Reservoir-Beutel einbauen; mindestens 22 mm - Schlauchdurchmesser beachten

Demand-Ventil-CPAP (z.B. Servo 900 C):

Das DV-CPAP besteht aus einem Hochdruckgasmischer für Sauerstoff und Luft, dem das Demand-Ventil nachgeschaltet ist.

Über einen Druckwandler wird der vom Patienten bei einem Inspirationsversuch erzeugten Unterdruck zum Demand-Ventil weitergeleitet. Sinkt dieser Druck unter das eingestellte CPAP-Niveau, öffnet sich das Ventil und Atemgas strömt zum Patienten.

Indikationen zu CPAP:

- Zunahme der AF > 30 /min
- AZV < 5 ml/kg Körpergewicht
- Vitalkapazität < 15 ml/kg Körpergewicht
- Abnahme der FRC
- Entwicklung von Atelektasen
- PaO₂ < 60 mm Hg

SIMV **(Synchronous Intermittent Mandatory Ventilation)**

Hier vermag der Patient zwischen einer einstellbaren Anzahl von maschinellen Beatmungshüben frei spontan zu atmen.

Die Spontanatemdauer setzt sich aus einer vorgegebenen Zeit und der bis zur darauffolgenden Inspiration verstreichenden Zeit zusammen.

Beispiel:

- eingestellte SIMV-Frequenz von 5 [1/min]
- die Dauer des SIMV-Atemzyklus ist dann
 $60 / 5 = 12$ [sec]
- Anzahl Spontanatemzüge = 12 [1/min], daher
 $60 / 12 = 5$ [sec]
- Spontanatemperiodenzeit ist daher:
 $12 - 5 = 7$ [sec].

Kurz vor dem Beginn einer SIMV-Periode baut sich das 'Erwartungsfenster' auf:

- erfolgt kurz vor Beginn einer SIMV-Periode eine Inspiration, so kommt jetzt schon der Maschinenhub synchron zur Eigenatmung des Patienten;
- ist zum Beginn einer SIMV-Periode noch kein Inspirations-Versuch des Patienten erfolgt, wartet jetzt der Respiратор noch kurze Zeit („Er - wartet - Fenster“), bevor der maschinelle Hub ausgelöst wird.

Bei diesem Beatmungsverfahren ist die Dauer der maschinellen Phasen starr, d.h. eine Expiration des Patienten während des Maschinenhubs ist nicht möglich. Dies kann bei Expirationsversuchen des Patienten zu überhöhten Spitzendrücken führen.

Im allgemeinen wird SIMV auf das niedrigste Niveau mit einer akzeptablen PaCO₂-Eliminierung eingestellt. Die Untersuchungen von Marini et al. zeigten bei dieser Methode jedoch die Möglichkeit der Übermüdung der Atemmuskulatur des Patienten auf, wenn die Atemmuskulatur des Patienten eine größere Ruhephase benötigt als die SIMV-Einstellung es ihr ermöglicht.

Dies führt zu Dyspnoe, zu einer Erhöhung des Atemantriebs durch PaCO₂-Anstieg und zu einer Zunahme der Atemarbeit des Patienten.

Besser scheint es für die Atemmuskulatur des Patienten zu sein, wenn die Länge (I : E - Verhältnis) und Form (maschinelle Atemfrequenz, Zeitkonstante, Flow-Anstiegszeit) eines Atemzyklus der Einheit Patient-Respiратор den Erfordernissen angepaßt und so der Atemmuskulatur des Patienten die Möglichkeit zur Erholung geboten wird.

So kann in einer 'breath-by-breath'-Angleichung der Patient schrittweise zu einer CPAP-Atmung herangeführt werden.

APRV **Airway Pressure Release Ventilation**

APRV wurde 1986 von Stock et al. zum Weaning von COPD-Patienten entwickelt. Im Prinzip ist APRV ein CPAP, bei welchem für kurze Zeit (< 1 [sec]) der end-expiratorische Druck abgesenkt wird. Durch dieses kurzfristige Absenken erhält man zunächst ein größeres Ausatemvolumen; der PaCO₂ fällt. Auf Grund der kurzen Zeitspanne der Absenkung können sich nur 'gesunde', d.h. Surfactant-reiche Alveolen entleeren. Alveolen mit Surfactant-Mangel haben durch ihre geringe Oberflächenelastizität und durch die kurze Zeitspanne der Senkung des PEEP-Niveaus nicht die Möglichkeit erneut zu kollabieren.

Dadurch besteht die Möglichkeit, bei wachen, hyperkapnischen Patienten eine schonende Senkung des PaCO₂ ohne BGA-Entgleisungen durchzuführen, wodurch vielleicht eine kürzere Respiраторzeit möglich wird. Aber auch die Möglichkeit einer druckkontrollierten Beatmung mit extremen Atemzeit-Verhältnissen ist durch den Einsatz von APRV möglich (z.B. im Respiратор EVITA II).

Es erfordert jedoch eine sorgfältige Einstellung von Inspirations- bzw. Expirationszeit, damit diese extremen I:E-Einstellungen nicht Lungenschäden verursachen. Minimale Anforderungen hierbei sind:

- Inspirationszeit minimale Zeitdauer dreifache Zeitkonstante (3τ)
- Expirationszeit minimale Zeitdauer vierfache Zeitkonstante (4τ).

Räsänen et al. zeigten die Überlegenheit von APRV gegenüber konventioneller volumenkontrollierter Beatmung:

Beatmungsmodus ⇒ Variable ↓	volumenkontrollierte Beatmung, bzw. CPAP	APRV	p
PaO ₂ [mm Hg]	92 ± 23	111 ± 39	0,115
PaCO ₂ [mm Hg]	50 ± 6	42 ± 6	< 0,001
pH _{arteriell}	7,32 ± 0,02	7,39 ± 0,04	< 0,001
mittlerer P _{aw} [cm H ₂ O]	16 ± 3	20 ± 9	0,087
Peak P _{aw} [cm H ₂ O]	51 ± 15	24 ± 12	< 0,001
spontane Atemfrequenz	26 ± 14	21 ± 11	< 0,001
mittlerer arterieller Blutdruck [mm Hg]	90 ± 8	89 ± 10	0,752
Herzfrequenz [1/min]	114 ± 14	109 ± 13	0,016

BIPAP

Biphasic Positive Airway Pressure

1989 erstmalig von Baum et al. in Deutschland vorgestellte Form der (Be-) Atmungshilfe. Entwickelt wurde BIPAP aus dem CPAP. Der Respirator wechselt zwischen zwei einstellbaren PEEP-Niveaus (oberes und unteres Druckniveau) in einem einstellbaren Zeitrahmen, in welchen die Zeitspanne des unteren Druckniveaus (T_{tief}) und des oberen Druckniveaus (T_{hoch}) festgelegt wird.

Prinzipiell stellt BIPAP eine druckkonstante Beatmungsform dar, welche Spontanatmung zu jedem Zeitpunkt zulässt.

Daher gibt es eigentlich drei BIPAP-Formen:

- 1) die druckkonstante kontrollierte Beatmung; der Patient hat keine Spontanatmung
- 2) Spontanatmung nur auf dem niedrigen Druckniveau; hier stellt BIPAP im Prinzip eine druckkonstante SIMV dar
- 3) die Spontanatmung erfolgt auf dem oberen und unteren Druckniveau.

Beim umschalten vom unteren zum oberen Druckniveau erhält der Patient einen maschinellen Atemzug, dessen Volumen abhängig ist von der Differenz der beiden Druckniveaus.

Durch stufenweises Angleichen vom oberen Druckniveau an das untere Druckniveau wird der spontan atmende Patient schonend auf die Extubation vorbereitet:

Die Vorteile von Bipap liegen in der Möglichkeit des Patienten zu jedem Zeitpunkt der Beatmung eine Inspiration wie auch eine Expiration durchführen zu können.

Die Ergebnisse dieser Möglichkeit zeigte Baum 1994 recht deutlich auf:

Beatmungsmodus	BIPAP mit Spontanatmung	BIPAP ohne Spontanatmung	BIPAP mit Spontanatmung
PaO ₂ [mm Hg]	107 ± 4,0	90 ± 3,0	107 ± 4,0
PaCO ₂ [mm Hg]	40 ± 1,0	48 ± 2,0	40 ± 1,0
Q _S /Q _T [%]	14 ± 2,0	25 ± 3,0	14 ± 2,0
V _D /V _T [%]	43 ± 1,0	50 ± 1,0	43 ± 1,0
V _E total [L/min]	9,9 ± 0,9	8,9 ± 0,6	10,2 ± 0,6
V _T Spontanatmung [ml]	139 ± 6,0		150 ± 6,0
V _T masch. Beatmung [ml]	472 ± 30	491 ± 34	436 ± 31

mit: Q_S/Q_T = Shuntvolumen; V_D = Totraum, V_T = Atemzugvolumen, V_E = Atemminutenvolumen

Putensen et al. zeigten den Vorteil von BIPAP mit Spontanatmung gegenüber herkömmlicher Druckkontrollierter Beatmung (PCV) :

	vor Beginn der Beatmung	PCV [BIPAP ohne Spontanatmung]	BIPAP mit Spontanatmung	Normalwerte
arterieller Mitteldruck [mm Hg]	112 ± 6	103 ± 6	110 ± 6	100 ± 6
Cardiac output [L/min]	5,3 ± 0,6	4,2 ± 0,3	4,6 ± 0,3	5 - 6
peripherer Gefäßwiderstand [dyn * s * cm ⁻⁵]	1 625 ± 134	1 971 ± 192	1 910 ± 188	700 - 1 600
Gesamtwiderstand im Lungenkreislauf [dyn * s * cm ⁻⁵]	309 ± 66	359 ± 51	315 ± 34	100 - 250

PSV **(Pressure Support Ventilation)**

andere Bezeichnungen sind: ASB Assisted Spontaneous Breathing
IHS Inspiratory Help System

PSV dient zur Druckunterstützung einer insuffizienten Spontanatmung. Die AF wird vom Patienten bestimmt, der Respirator übernimmt jedoch einen einstellbaren Anteil am 'work of breathing'

Hier wird jeder einzelne spontane Inspirationsversuch apparativ durch einen einstellbaren positiven Druck unterstützt.

Während die Inspiration vom Patienten bestimmt wird, entscheidet der Respirator über die Expiration.

Die Expiration erfolgt:

1. der Atemwegsdruck überschreitet einen vorher eingestellten Spitzendruck p_{max}
2. die Inspirationsströmung ist auf 25% des zuvor erreichten Maximalwertes abgesunken („die Lungen sind gefüllt“)

Das Druckniveau sollte so eingestellt werden, das das Atemzugvolumen etwa 7 bis 8 ml je kg Körpergewicht beträgt und die Atemfrequenz $\leq 257/min$ liegt. Schrittweise wird während des Weanings jetzt die Druckunterstützung um 2 bis 4 mm Hg reduziert.

Damit PSV vom Patienten genutzt werden kann, muß vorher am Respirator die Triggerschwelle entsprechend eingestellt werden. Für einen alveolären Flow von 1 [l/sec] sollte der Patient keinen größeren Unterdruck als 1 bis 1,5 mbar - gemessen am end-expiratorischen Niveau - erzeugen müssen.

Wichtig ist in diesem Zusammenhang auch die Triggerlatenz: die Zeit, welche der Respirator benötigt, bis der Gasflow dem Patienten zur Verfügung steht, sie sollte bei modernen Geräten < 100 msec sein.

Hier einige Angaben zu Geräten:

Gerät	Servo V 900 C	Bennett 7200 aE	Evita	Evita II
Hersteller	Siemens	Bennett	Dräger	Dräger
Triggerlatenz	≈ 350 msec	≤ 20 msec	≤ 100 msec	$T_{0...90} \leq 5$ msec
Trigger-Empfindlichkeit	-20 bis 0 mbar	5 bis 20 l/min (Flow By)	-5 bis -0,5 mbar - 0,7 mbar bei SIMV	- 0,7 mbar
Demand-Flow-Ansprechzeit	3,75 mbar	3,75 mbar	1,5 mbar	1,5 mbar

Interessant für das Weaning beim Patienten sind auch folgende Daten:

	CPAP 0 cm H ₂ O	CPAP 5 cm H ₂ O	PSV 5 cm H ₂ O	T-Stück
Resistance [cm H ₂ O/L/sec]	$6,5 \pm 1,1$	$4,7 \pm 0,9$	$6,7 \pm 0,7$	$8,3 \pm 1,6$
Compliance [ml/cm H ₂ O]	60 ± 9	74 ± 13	68 ± 14	69 ± 13

Proportional Assist Ventilation **(PAV)**

Proportional assist ventilation ist eine relativ junge Form der assistierten Beatmung, bei welcher die applizierte Druckunterstützung proportional zum vom Patienten geforderten Volumen (volume assist, VA) und Gasflow (flow assist, FA) gesetzt wird. Konstant ist hier nicht die Höhe der Druckunterstützung, sondern die Relation zwischen Druckunterstützung und Atemanstrengung. Dies hält die inspiratorische Atemarbeit, welche notwendig ist um die Elastizität und Resistance des respiratorischen Systems zu überwinden, des Patienten auf einem Niveau.

Ein weiterer Vorteil von PAV ist die Verhinderung von Desynchronisation zwischen Beatmungsgerät und Patient wie auch die Vermeidung von Fehltriggerungen, da sich die Unterstützung seitens des Beatmungsgerätes den Bedürfnissen des Patienten anpaßt.

PAV kann in Form von volume assist appliziert werden oder als Kombination von volume assist mit flow assist.

Der Einsatz dieser Form der Atem-Assistenz kann dazu führen, daß:

- a) Das Atemzugvolumen ansteigt
- b) die Atemfrequenz sich senkt.

Beide klinisch sichtbaren Zeichen sind lediglich ein Ausdruck für die verminderte Atemarbeit des Patienten, wobei bedacht werden sollte, das volume assist zwar zu einer Senkung der elastischen Atemarbeit führt, jedoch die Atemarbeit zur Überwindung der Resistance des respiratorischen Systems ansteigt. Daraus resultiert eine Limitierung der Unterstützung durch PAV.

Flow assist kann die Atemarbeit zur Überwindung der Resistance des respiratorischen Systems senken und hilft so die Gesamtatmarbeit zu reduzieren.

PAV sollte daher nach Möglichkeit immer in Kombination von volume assist und flow assist eingesetzt werden.

MMV (Mandatory Minute Ventilation)

Die „mandatory minute ventilation“ stellt im Gegensatz zur (S)IMV eine volumenorientierte maschinelle Beatmungshilfe dar.

MMV zieht als Regelgröße das eingestellte Atemminutenvolumen heran, d.h. in der MMV erfolgt die maschinelle Unterstützung - im Gegensatz zur SIMV - nicht mit vorgegebener Frequenz, sondern nur dann, wenn dies zur Aufrechterhaltung der eingestellten Mindestventilation erforderlich ist.

Die Spontanatmung wird laufend summiert und ständig mit dem aus dem eingestellten AMV errechneten Sollwert verglichen.

Erreicht dieser Vergleich eine Differenz in Höhe des eingestellten Atemzugvolumens, wird ein maschineller Hub ausgelöst.

Bei geringem Spontanatemminutenvolumen tritt dieser Zustand häufiger auf (hohe maschinelle Beatmungsfrequenz); erhöht sich das Spontan-Atemminutenvolumen wieder, sinkt die MMV-Frequenz entsprechend herunter.

Bei ausreichender Spontanatmung werden also keine maschinellen Beatmungshübe appliziert. Der Respirator arbeitet wie unter CPAP-Einstellung.

Bei gänzlich ausbleibender Spontanatmung wird der Patient jedoch mit der vorgegebenen Mindestventilation beatmet.

Da sich der Respirator nur an das vorgegebene Atemminutenvolumen orientiert und Atemfrequenz und inspiratorisches Atemzugvolumen nicht berücksichtigt, können Probleme beim Weaning mit tachypnoeischen Patienten auftreten. Hier sollte immer eine „Hechelüberwachung“ aktiviert sein, d.h. die Spontan-Atemfrequenz des Patienten überwacht werden.

Andere Möglichkeiten der Überwachung der Atemfunktion sind:

- ⇒ Überwachung des Mindest-Atemzugvolumens
- ⇒ Kapnographie zur Erkennung von Perioden alveolärer Hypo- und Hyperventilation
- ⇒ CO₂-kontrollierte Beatmung.

Hier richtet sich das Monitoring nach den Gegebenheiten des Respirators/der Intensivstation.

Als vorteilhaft kann sich hier auch die Kombination von MMV mit inspiratorischer Assistenz (PSV, ASB) erweisen, um so einer Minderventilation sowie einer Erschöpfung der Atemmuskulatur des Patienten vorzubeugen.

Ältere Respiratoren hatten zudem den Nachteil, bei Erreichen des eingestellten Atemminutenvolumens keine weitere Spontanatmung bei der Einstellung MMV mehr zuzulassen, um eine Hyperventilation zu verhindern. Dies hatte zur Folge, dass Patienten sich bei Inspirationsversuchen häufig erschöpften.

MMV kann als intelligente Weiterentwicklung der (S)IMV angesehen werden, da MMV sich variabel an den Bedarf des Patienten anpaßt.

Auf Grund des ständigen Vergleichs zwischen AMV_{SOLL} und AMV_{IST} wird kein Respirator dem Patienten während oder nach einem Spontanatemzug einen mandatorischen Beatmungshub applizieren. Eine Synchronisationseinrichtung in Form eines Erwartungszeitfensters mit einer Triggerschwelle ist nicht erforderlich.

Die Eiserne Lunge

Eine geeignete Methode zur endotrachealen Intubation für die Beatmung war lange nicht bekannt; Versuche der Verwendung von nasopharyngealen Tuben führten häufig zur Überblähung und Ruptur des Magens.

Diese Probleme bei der Beatmung von Patienten ließen die Forscher nach Alternativlösungen suchen.

Der Franzose Woillez baute 1876 die erste „Eiserne Lunge“, welche er Spirophore nannte.

Heute bietet die Methode der Eisernen Lunge eine Zusatzmethode zu den konventionellen Beatmungsformen. Durch den negativen intrathorakalen Druck erwies sich die Eiserne Lunge häufig als hämodynamisch stabiler als herkömmliche Beatmungsformen.

Weitere Vorteile der Eisernen Lunge:

- die Atemunterstützung von außen schont das unter den heute gebräuchlichen Beatnungsmaßnahmen geschädigte Flimmerepithel der Luftwege und den Surfactantbelag der Alveolen
- bei der Atemhilfe mit der Eisernen Lunge ist der Patient vollkommen wach, d.h. eine Sedierung des Patienten ist nicht notwendig
- mit der verzichtbaren Intubation fällt eine ernstzunehmende Infektionsquelle weg
- die Methode kann täglich für mehrere Stunden zum Training der Atemmuskulatur eingesetzt werden.

Aus diesen Gründen erscheint der Einsatz einer modernen Anforderungen angepaßten Eisernen Lunge in einigen Fällen gerechtfertigt:

- bei Patienten mit eingeschränkter Infektabwehr und erhaltenem Bewußtsein (Transplantationspatienten, Patienten mit reduziertem Allgemein- und Ernährungszustand)
- bei Patienten mit reduzierter Kreislauffunktion

- bei Patienten mit chronischen Lungenerkrankungen als intermittierende Behandlung zur Sekretolyse und Verbesserung der funktionstüchtigen Lungenoberfläche.

Um dies zu untersuchen wurde eine Eisenerne Lunge Modell „Dräger E 52“ von Pohl in mehreren Entwicklungsschritten den heutigen Anforderungen (Möglichkeiten zur Einstellung von Atemfrequenz pro Minute und Inspirationsdauer in Prozent \Rightarrow Atemfrequenzen von 8 bis 60/min, I:E-Einstellungen von 1:9 bis 9:1) angepaßt und in der Medizinischen Hochschule Hannover getestet.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigten gegenüber der CMV gleich gute Ventilationsergebnisse, statistisch signifikant stabilere hämodynamische Kreislaufbedingungen und kürzere Weaning-Phasen (ebenfalls statistisch signifikant).

Im praktischen Gebrauch zeigte sich diese „Plastik Lunge“ in der Benutzung zwar aufwendiger als Beatmungen mit herkömmlichen Ventilatoren, jedoch benutzten Ärzte und Pflegepersonal gleichermaßen die Plastiklunge trotz größeren Aufwands über begrenzte Zeiträume gerne, wenn sie sich durch diese Behandlungsmethode klinische Vorteile versprachen.

Zur Pflege allerdings muß die Haube abgenommen werden und der Patient bei Bedarf über eine Maske beatmet werden.

Weaning

In der operativen Intensivmedizin gibt es zwei Patientenkollektive, welche beatmet werden müssen:

1. Patienten, die aufgrund perioperativer Besonderheiten (Hypothermie, Anästhetikaüberhang etc.) kurzfristig, d.h. ≤ 24 Stunden, nachbeatmet werden müssen,
2. langzeitbeatmete Patienten.

Während die erste Gruppe praktisch immer problemlos vom Respirator zu entwöhnen ist, treten in der zweiten Gruppe häufiger „Probleme“ bei der Entwöhnung vom Respirator auf.

Um diesem Problemen entgegenzuarbeiten, sind einige Besonderheiten zu beachten:

- möglichst großer Kontakt zwischen Arzt/Pflegekraft und Patient, um eine seelische Ausgeglichenheit des Patienten zu erzielen
- möglichst frühzeitige Unterstützung der Spontanatmung
- dünnlumige Trachealkanülen sind durch großlumige Kanülen zu ersetzen, eventuell Tracheotomie zur Erniedrigung der inspiratorischen Atemarbeit überdenken
- eine konsequente Negativbilanzierung (Cave: Immer die Nierenfunktion beachten)
- parenterale Reduktion der Glukosezufuhr zugunsten fettreicher Ernährung
- Theophyllin-Gabe (Spiegel im unteren Normbereich halten)
- Hypophosphatämie ausgleichen
- häufige, aber nicht exzessive Spontanatemphasen des Patienten mit PS im Verlaufe des Tages, zur Nacht hingegen eine Ruhephase, zur Not auch mit Sedativa, mit einer Beatmung des Patienten, wobei die Atemfrequenz während der Nacht minimal höher sein soll als die Spontanatemfrequenz, welche im Verlauf des Tages beobachtet wurde (Cave: es soll nicht zur Erschöpfung des Patienten kommen, Gefahr der Erhöhung des pulmonalkapillären Druckes mit Verschlechterung der Lungenfunktion; auch kein Training der Atemmuskulatur bei COPD-Patienten versuchen, da die chronisch belastete Atempumpe dieser Patienten hiervon nicht profitieren kann und eher das Gegenteil erreicht wird).

Neuere Beatmungsgeräte erlauben den Atemwegswiderstand des Endotrachealtubus zu kompensieren.

Diese Methode wird „Automatic Tube Compensation“ genannt und soll den Tubuswiderstand sowohl in der Inspirations- wie auch in der Exspirationsphase vollständig neutralisieren.

Ein großer Vorteil dieser Methode ist die recht genaue Einschätzung des Patienten über sein Atemverhalten nach Extubation.

Literaturhinweise

- Abraham, E., Yoshihara, G.;
Cardiorespiratory effects of pressure controlled inverse ratio ventilation in severe respiratory failure;
Chest; 96, 1356 - 1359, 1989
- Abraham, E., Yoshihara, G.;
Cardiorespiratory effects of pressure controlled ventilation in severe respiratory failure;
Chest; 98, 1445 - 1449, 1990
- Alberti et al.;
Differential lung ventilation with a double-lumen tracheostomy tube in unilateral refractory atelectasis;
Int. Care Med.; 18, 479 - 484, 1992
- Aloy et al.;
Superponierte Jet-Ventilation über ein spezielles Jet-Laryngoskop;
Anästhesist; 43, 262 - 269, 1994
- Al-Saady, N., Bennett, E.D.;
Decelerating inspiratory flow waveform improves lung mechanics and gas exchange in patients on
intermittent positive-pressure ventilation; Int. Care Med.; 11, 68 - 75, 1985
- Arnold et al.; High-frequency oscillatory ventilation in pediatric respiratory failure;
Crit. Care Med.; 21, 272 - 278, 1993
- Banner et al.;
Airway pressure release ventilation in a patient with acute pulmonary injury;
Chest; 96, 679 - 682, 1989
- Banner et al.;
Flow Resistance of expiratory positive-pressure valve systems; Chest; 90, 212 - 217, 1986
- Baum et al.;
Inversed Ratio Ventilation (IRV); Anästhesist; 29, 592 - 596, 1980
- Baum et al.;
Biphasic Positive Airway Pressure (BIPAP) - eine neue Form der augmentierenden Beatmung;
Anästhesist; 35, 452 - 458, 1989
- Baum et al.;
Entwöhnung eines Asthmikers mit Biphasic Positive Airway Pressure (BIPAP) unter kontinuierlicher
Sufentanil Gabe; Anästhesist; 39, 557 - 560, 1990
- Baum, M.; Mutz, N. J.; Hörmann, C.;
BIPAP, APRV, IMPRV: Methodological Concept and Clinical Impact; in: Vincent, J.L. ed.: Yearbook of
intensive care and emergency medicine; No 5; New York; Springer Verlag; 1993
- Baum et al.;
Biphasic positive airway pressure (BIPAP) - a new mode of ventilatory support;
European Journal of Anaesthesiology; 11, 37 - 42, 1994
- Baum et al.;
Effect of spontaneous breathing with biphasic positive airway pressure (BIPAP) on pulmonary gas
exchange; Crit. Care Med.; A87; 1994
- Baum, M.; Benzer, H.;
Einsatz von Atemhilfen; in: Benzer, H.; Burchardi, H.; Larsen, R.; Suter, P. M. (Hrsg.)
Intensivmedizin; Springer-Verlag, 1993
- Becker et al.,
Indikation und Applikation der BIPAP-Therapie; Pneumologie; 47, 184 - 188, 1993
- Bein et al.; Die druckgesteuerte Beatmung mit inversem Atem-Zeit-Verhältnis bei schwerer respiratorischer
Insuffizienz; Intensivmed.; 30, 73 - 78, 1993
- Benzer, H., Koller, W.;
Die Strategie der Beatmung; Intensivmed.; 24, 214 - 219, 1987
- Brandl et al.;
Vergleichende Untersuchungen von CPAP-Systemen an einem Atmungssimulator;
Anästhesist; 35, 73 - 79, 1986
- Brochard et al.;
Inspiratory Pressure Support Prevents Diaphragmatic Fatigue during Weaning from Mechanical
Ventilation; Am. Rev. Respir. Dis.; 139, 513 - 521, 1989

- Brochard et al.;
Inspiratory Pressure Support Compensates for the Additional Work of Breathing Caused by the Endotracheal Tube; *Anesthesiology*; 75, 739 - 745, 1991
- Burchardi, H., Sydow, M.;
Volumenkontrollierte vs. druckkontrollierte Beatmung; 'Beatmung' Springer-Verlag,
Hrsg.: Lenz, K., Laggner, A. N.; 25 - 32, 1993
- Burchardi, H.;
New strategies in mechanical ventilation for acute lung injury; *Eur. Respir. J.*; 9, 1063 - 1072, 1996
- Burke et al.;
Comparison of mathematical and mechanical models of pressure-controlled ventilation;
J. Appl. physiol.; 74, 922 - 933, 1993
- Carlson et al.;
Criteria for selective positive end-expiratory pressure and independent synchronized ventilation of each lung; *Chest*; 74, 501 - 507, 1978
- Chiang et al.;
Demand-flow airway pressure release ventilation as a partial ventilatory support mode: Comparison with synchronized intermittent mandatory ventilation and pressure support ventilation;
Crit. Care Med.; 22, 1431 - 1437, 1994
- Crew et al.;
Continuous positive airway pressure breathing (CPAP); *Anaesthesia*; 30, 67 - 72, 1975
- Crimi et al.;
Clinical applications of independent lung ventilation with unilateral high-frequency jet ventilation (ILV-UHFJV); *Int. Care Med.*; 12, 90 - 94, 1986
- Crimi et al.;
Clinical use of differential continuous positive airway pressure in the treatment of unilateral acute lung injury; *Int. Care Med.*; 13, 416 - 418, 1987
- Davis et al.;
Airway Pressure Release Ventilation; *Arch. Surg.*; 128, 1348 - 1352, 1993
- Derderian et al.;
High frequency positive pressure jet ventilation in bilateral bronchopleural fistulae;
Crit. Care Med.; 10, 119 - 121, 1982
- East et al.;
Synchronous versus asynchronous differential lung ventilation with PEEP after unilateral acid aspiration in the dog; *Crit. Care Med.*; 11, 441 - 444, 1983
- Fabry et al.;
An Analysis of Desynchronnization Between the Spontaneously Breathing Patient and Ventilator During Inspiratory Pressure Support; *Chest*, 107, 1387 - 1394, 1995
- Fabry et al.;
Additional Work of Breathing (WOB_{add}) During Inspiratory Pressure Support (IPS) and Automatic Tube Compensation (ATC); *Int. Care Med.*; 21, Suppl. 1, S132, 1995
- Fabry et al.;
The flow pattern of spontaneously breathing patients with acute respiratory insufficiency;
Int. Care Med.; 21, Suppl. 1, S54, 1995
- Falke, K.;
Ein zeitgerechtes Konzept der Beatmung;
Anästh. Intensivmed.; 25, 386 - 392, 419 - 425, 1984
- Falke et al.;
Facilitation of renal function by intermittent mandatory ventilation;
Int. Care Med.; 10, 59 - 65, 1984
- Falke, K.J., Samodelov, L.F.;
Total inspiratory work with modern demand valve devices compared to continuous flow CPAP; *Int. Care Med.*; 14, 632 - 639, 1988
- Fassoulaki, A.; Eforakopoulou, M.;
Cardiovascular, respiratory, and metabolic changes produced by pressure-supported ventilation in intensive care unit patients; *Crit. Care Med.*, 17, 527 - 529, 1989
- Fechner, R., Fuchs, W.;
High Frequency Jet Ventilation beim ARDS; *Anästh. Intensivmed.*; 24, 351 - 352, 1983

- Fechner, R., Fuchs, W.;;
Die High Frequency Jet Ventilation bei der Behandlung von Risikopatienten;
Anästh. Intensivmed.; 26, 78 - 83, 1985
- Fiastro et al.;;
Pressure Support Compensation for Inspiratory Work due to Endotracheal Tubes and Demand
Continuous Positive Airway Pressure; Chest; 93, 499 - 505, 1988
- Froese, A.B., Bryan, Ch.;;
State of Art: High Frequency Ventilation; Am. Rev. Resp. Dis.; 135, 13636 - 1374, 1987
- Fusciardi et al.;;
Hemodynamic effects of high-frequency jet ventilation in patients with and without circulatory shock;
Anesthesiology; 65, 485 - 491, 1986
- Gärtner, Armin;;
Beatmungs- und Narkosetechnik; Verlag TÜV Rheinland; S. 153 - 156, 1993
- Gregory et al.;;
Treatment of the ideopathic respiratory-distress syndrome with continuous positive airway pressure;
New Eng. J. Med.; 284, 1332 - 1340, 1971
- Haberthür et al.;; Automatic Tube Compensation (ATC) und Proportionbal Assist Ventilation (PAV): Klinische
Erfahrungen mit einem neuen Modus zur Unterstützung von intubierten, spontanatmenden Patienten;
Intensivmed.; 33, 282 - 292, 1996
- Hachenberg, Th.;;
eigene Mitteilungen; Jan. 1994
- Hameroff et al.;;
High-frequency alternating lung ventilation; Anesthesiology; 54, 237 - 239, 1981
- Hickling, K.G.;;
Ventilatory management of ARDS: can it affect the outcome?;
Int. Care Med.; 16, 219 - 226, 1990
- Hickling et al.;;
Low mortality associated with low volume pressure limited ventilation with permissive hypercapnia in
severe adult respiratory distress syndrome;
Int. Care Med.; 16, 372 - 377, 1990
- Hörmann et al.;;
Effect of spontaneous breathing with biphasic positive airway pressure (BIPAP) on pulmonary gas
exchange; Crit. Care Med.; 22/ A 87, 1994
- Hörmann et al.;;
Tital volume, breathing frequency, and oxygen consumption at different pressure support levels in the
early stage of weaning in patients without chronic obstructive disease;
Int. Care Med.; 18, 226 - 230, 1992
- Kellermann et al.;;
Atemarbeit bei Spontanatmung mit kontinuierlich positiven Atemwegdruck (CPAP);
Schweiz. med. Wschr.; 116, 561 - 565, 1986
- Klain, M.;;
High Frequency Ventilation; Anästh. Intensivmed.; 24, 176 - 181, 1983
- Klingstedt et al.;;
Lung and chest wall mechanics during differential ventilation with selective PEEP;
Acta Anaesth. Scand.; 29, 716 - 721, 1985
- Knoch, M.;;
Behandlung des Patienten mit schwerem ARDS mittels extrakorporaler CO₂-Elimination;
Wiener intensivmedizinische Tage; 1988
- Kvetan et al.;;
Acute pulmonary failure in asymmetric lung disease: approach to management;
Crit. Care Med.; 10, 114 - 118, 1982
- Lachman et al.;;
Improved arterial oxygenation, CO₂ Elimination, Compliance and decreased Barotrauma following
changes of volume-generated PEEP ventilation with inspiratory/expiratory (I/E) Ratio of 1:2 to
pressure-generated ventilation with I:E ratio of 4:1 in patients with severe adult respiratory distress
syndrome (ARDS); Crit. Care Med.; 6, A155, 1980

- Lain et al.;
Pressure control inverse ratio ventilation as a method to reduce peak inspiratory pressure and provide adequate ventilation and oxygenation; *Chest*; 95, 1081 - 1088, 1989
- Lessard, M. R., Brochard, L. J.;
Weaning from Ventilatory Support; *Clin. Chest Med.*; 17, Suppl. 3, 475 - 489, 1996
- Levine, S.; Levy, Sh.; Henson, D.;
Negative-pressure Ventilation; *Crit. Care Clin.*; 6, 505 - 531, 1990
- Lewandowski, K.;
eigene Mitteilungen; Nov. 1993
- Light et al.;
The effect of unilateral PEEP on gas exchange and pulmonary perfusion in canine lobar pneumonia; *Anesthesiology*; 55, 251 - 255, 1981
- MacIntyre, N.R.;
Respiratory Function during Pressure Support Ventilation; *Chest*; 89, 677 - 683
- MacIntyre et al.;
Effects of initial flow rate and breath termination criteria on pressure support ventilation; *Chest*; 99, 134 - 138, 1991
- MacIntyre, N. R.;
New Modes of Mechanical Ventilation; *Clin. Chest Med.*; 17, 411 - 421, 1996
- Marini, J. J.; Smith, Th. C.; Lamb, V. J.;
External Work Output and Force Generation during Synchronized Intermittent Mechanical Ventilation; *Am. Rev. Resp. Dis.*; 138, 1169 - 1179, 1988
- Martin et al.;
Airway pressure release ventilation in a neonatal lamb model of acute lung injury; *Crit. Care Med.*; 19, 373 - 378, 1991
- Martin, L. D., Wetzel, R. C.;
Optimal release time during airway pressure release ventilation in neonatal sheep; *Crit. Care Med.*; 22, 486 - 493, 1994
- Meyer, J.;
Neue Beatmungsformen;
Anästhesiol. Intensivmed. Notfallmed. Schmerzther.; 26, 337 - 342, 1991
- Morris et al.;
Randomized clinical trial of pressure-controlled inverse ratio ventilation and extracorporeal CO₂ removal for adult respiratory distress syndrome; *Am. J. Respir. Crit. Care Med.*; 149, 295 - 305, 1994
- Mutz et al.;
Clinical experience with several types of high frequency ventilation; *Acta Anaesth. Scand.*; 90, 140 - 144, 1989
- Nahum et al.;
Lung mechanics and gas exchange during pressure-control ventilation in dogs; *Am. Rev. Resp. Dis.*; 146, 965 - 973, 1992
- Navalesi et al.; Proportional Assist Ventilation in Acute Respiratory Failure: Effects on Breathing Pattern and Inspiratory Effort; *Am. J. Respir. Crit. Care Med.*; 154, 1330 - 1338, 1996
- Nishiwaki et al.;
Limitation of pressure support ventilation in the lung with high resistance; *Crit. Care Med.*; S187, 1990
- Nunoz et al.;
Pressure-controlled ventilation versus controlled mechanical ventilation with decelerating inspiratory flow; *Crit. Care Med.*, 21, 1143 - 1148, 1993
- Osswald et al.;
Die Wirkung von positiv end-expiratorischen Druck (PEEP) resp. verlängerter Inspirationszeit auf Lungenmechanik, Gasaustausch und Hämodynamik bei differenter Lungenventilation; *Anästhesist*; 32, 99 - 104, 1983
- Paloski et al.;
Effects of changing inspiratory to expiratory time ratio on carbon dioxide elimination during high-frequency jet ventilation; *Am. Rev. Resp. Dis.*; 131, 109 - 114, 1985

- Pichlmayr et al.;
Kann die Beatmung nach dem Prinzip der „Eisernen Lunge“ heute eine Zusatz- bzw. Alternativmethode zu konventionellen Beatmungsformen darstellen;
Anaesthesist; 40, 39 - 46, 1991
- Pohl, S.;
Atemunterstützung mit der Eisernen Lunge bei Ermüdung der Atemmuskulatur;
Fortschr. Anästh.; 5, 79 - 82, 1991
- Pontoppidan et al.;
Respiratory Intensive Care; Anesthesiology; 47, 96 - 116, 1977
- Putensen et al.;
Effect of Interfacing between Spontaneous Breathing and Mechanical Cycles on the Ventilation-Perfusion Distribution in Canine Lung Injury; Anesthesiology; 81, 921 - 930, 1994
- Putensen, Ch., León, M. A., m Putenmsen-Himmer, G.;
Timing of pressure release affects power of breathing and minute ventilation during airway pressure release ventilation; Crit. Care Med.; 22, 872 - 878, 1994
- Räsänen et al.;
Cardiovascular effects of conventional positive pressure ventilation and airway pressure release ventilation; Chest, 93, 911 - 915, 1988
- Räsänen et al.;
Airway Pressure Release Ventilation: A Multicenter Trial; Anesthesiology; 71, A 1078, 1989
- Räsänen, J.;
IMPRV - synchronized APRV, or more?; Int. Care Med.; 18, 65 - 66, 1992
- Renston et al.;
Respiratory Muscle Rest Using Nasal BIPAP Ventilation in Patients with stable severe COPD; Chest; 105, 1053 - 1060
- Rivara et al.;
Differential ventilation in unilateral lung disease: effects on respiratory mechanics and gas exchange; Int. Care Med.; 5, 189 - 191, 1979
- Rommelsheim, K.;
Progression des ARDS gefördert statt verhindert; Therapiewoche; 43, 1306 - 1309, 1993
- Rouby et al.;
High-frequency jet ventilation in postoperative respiratory failure: determinants of oxygenation; Anesthesiology; 59, 281 - 287, 1983
- Sakic, P.;
Der Einfluß von normaler Spontanatmung (ZPB) und CPAP-Atmung auf das Verhalten der arteriellen Blutgase und des intrapulmonalen Rechts-Links-Shunts bei geriatrischen Patienten nach Oberbaucheingriffen; Anaesthesiol. Reanimat.; 10, 261 - 270, 1985
- Santak et al.;
Influence of SIMV plus inspiratory pressure support on V/Q distribution during postoperative weaning; Int. Care Med.; 17, 136 - 140, 1991
- Sassoon et al.;
Ventilator Modes: Old and New; Crit. Care Clin.; 6, 605 - 633, 1990
- Sassoon, C. S. H.;
Positive Pressure Ventilation: Alternate Modes; Chest; 100, 1421 - 1429, 1991
- Sassoon et al.;
Inspiratory work of breathing on flow-by and demand-flow continuous positive airway pressure; Crit. Care Med.; 17, 1108 - 1114, 1989
- Sassoon et al.;
Pressure-Time Product during Continuous Positive Airway Pressure, Pressure Support Ventilation, and T-Piece during Weaning from Mechanical Ventilation; Am. Rev. Resp. Dis.; 143, 469 - 475, 1991
- Sassoon et al.;
Inspiratory muscle work of breathing during Flow-By, Demand-Flow, and Continuous-Flow systems in Patients with chronic obstructive pulmonary disease; Am Rev. Resp. Dis.; 145, 1219 - 1222, 1992
- Schönhofer, B., Mang, H., Köhler, D.;
Entwöhnung vom Respirator nach Langzeitbeatmung - Das Konzept eines regionalen Entwöhnungszentrums; Anästh. Intensivmed. Notfallmed. Schmerzther.; 30, 403 - 411, 1995

- Schuster et al.;
Gas transport during different modes of high-frequency ventilation;
Crit. Care Med.; 14, 5 - 11, 1986
- Simon, H.B.;
Der ventilatorische Effekt der druckunterstützten Beatmung bei verschiedenen Respiratoren;
Intensivmed.; 27, 486 - 490, 1990
- Shapiro et al.;
Airway pressure release ventilation in severe acute respiratory failure;
Chest; 100, 460 - 463, 1991
- Slutsky, A. S.;
Mechanical Ventilation; Chest; 104, 1833 - 1859, 1993
- Smith, R. A., Smith, D. B.;
Does Airway Pressure Release Ventilation Alter Lung Function After Acute Lung Injury?
Chest; 107, 805 - 808, 1995
- Stock et al.;
Airway Pressure Release Ventilation (APRV): a new ventilatory support mode during acute lung injury; Crit. Care Med; April 1986, 366
- Stock, M.C., Downs, J.B.;
Airway pressure release ventilation: a new concept in ventilatory support;
Crit Care Med.; 15, 459 - 461, 1987
- Stock et al.;
Airway pressure release ventilation; Crit. Care Med.; 15, 462 - 466, 1987
- Stock et al.;
Airway pressure release ventilation (APRV) a human trial; Chest; 94, 779 - 781, 1988
- Stock et al.;
Cardiovascular effects of conventional positive pressure ventilation and airway pressure release ventilation; Chest; 93, 911 - 915, 1988
- Stock et al.;
Airway pressure release ventilation: a multicenter trial; Anesthesiology; A 1078, 1989
- Stock et al.;
Airway pressure release ventilation during acute lung injury: a prospective multicenter trial;
Crit. Care Med.; 19, 1234 - 1241, 1991
- Sydow et al.;
Long-term Effects of Two Different Ventilatory Modes on Oxygenation in Acute Lung Injury;
Am. J. Respir. Crit. Care Med.; 149, 1550 - 1556, 1994
- Tharratt et al.;
Pressure controlled inverse ratio ventilation in severe adult respiratory failure;
Chest; 94, 755 - 762, 1988
- Theissen et al.;
Hochfrequenzbeatmung: Nebenwirkungen und Gefahren;
Anästh. Intensivther. Notfallmed.; 25, 14 - 19, 1990
- Tokioka et al.;
Comparison of pressure support ventilation and assist ventilation in patients with acute respiratory failure; Int. Care Med.; 15, 364 - 367, 1989
- Väisänen, I.T., Räsänen, J.;
Continuous positive airway pressure and supplemental oxygen in the treatment of cardiogenic pulmonary edema; Chest; 92, 481 - 485, 1987
- Valta, P., Takala, J.;
Volume-controlled inverse ratio ventilation: effect on dynamic hyperinflation and auto-PEEP;
Acta Anaesth. Scand.; 37, 323, 328, 1993
- Venus et al.;
Treatment of unilateral pulmonary insufficiency by selective administration of continuous positive airway pressure through a double-lumen tube; Anesthesiology; 52, 74 - 77, 1980
- van de Graaf et al.;
Pressure support - Changes in ventilatory pattern and components of the work of breathing; Chest; 100, 1082 - 1089, 1991

- Younes, M.;
Proportional Assist Ventilation, a new approach to Ventilatory Support;
Am. Rev. Resp. Dis.; 145, 114 - 120, 1992
- Younes et al.;
Proportional Assist Ventilation - Results of a clinical trial;
Am. Rev. Resp. Dis.; 145, 121 - 129, 1992
- Weiler, N., Heinrichs, W., Keßler, W.;
The AVL-mode: a safe closed loop algorithm for ventilation during total intravenous anesthesia;
Int. J. Clin. Monitor. Comput; 11, 85 - 88, 1994
- Weiler et al.;
Adaptive Lung Ventilation (ALV); Anästhesist; 45, 950 - 956, 1996
- Wendt et al.;
Differential ventilation with low-flow CPAP and CPPV in the treatment of unilateral chest trauma; Int.
Care Med.; 15, 209 - 211, 1989
- Wolf, Ch.;
Hochfrequenzbeatmung- eine Übersicht; Intensivmed.; 24, 257 - 264, 1987
- Zandstra, D. F.; Stoutenbeek, Ch. P.; Bams, J. L.;
Monitoring lung mechanics and airway pressures during differential lung ventilation (DLV) with
emphasis on weaning from DLV; Int. Care Med.; 15, 458 - 462, 1989

