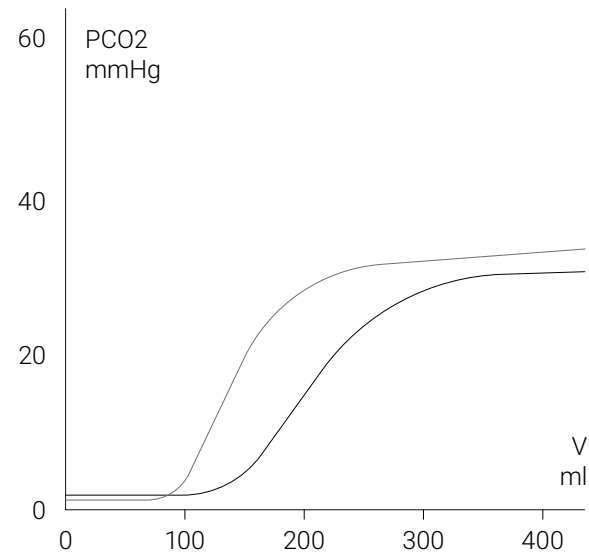
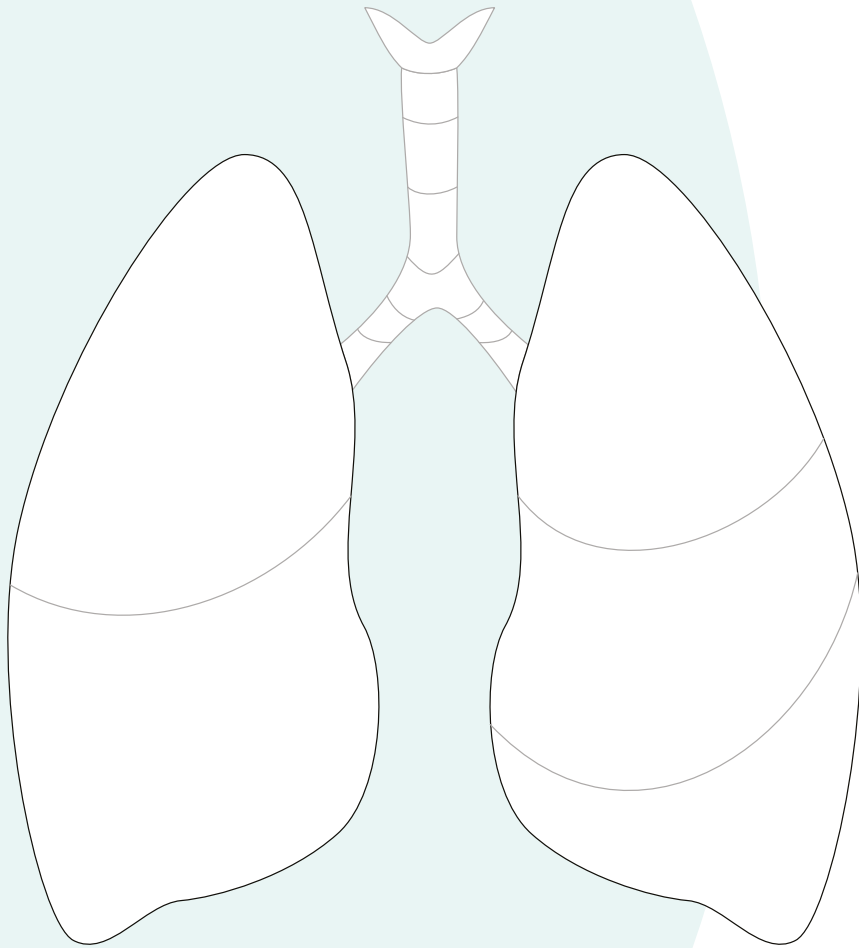


Die Grundlagen der volumetrischen Kapnographie



30
PetCO₂
mmHg

255
V_{Daw}
ml

8.2
V'_{alv}
l/min

Überblick über den Inhalt – 1/2

Die Beatmungsexperten	4	Alveoläres Minutenvolumen – $V_{T\text{alv}}/\text{min}$	21
Einleitung	5	Totraumbeatmung – Verhältnis $V_{\text{ds}}/V_{\text{TTE}}$	22
Vorteile der volumetrischen Kapnographie	6	Wie ist das klinisch relevant?	23
Das volumetrische Kapnogramm	7	Qualität und Effizienz der Beatmung verbessern	24
Die drei Phasen	8	Anzeichen für ARDS	25
Phase I – anatomischer Totraum	10	PEEP-Management	26
Phase II – Übergangsphase	11	Recruitmentmanöver	27
Phase III – Plateauphase	12	Expiratorische Resistance	28
Anstieg in Phase III	13	Obstruktive Lungenerkrankung	29
CO_2 bei einem Atemhub	14	Anzeichen für Lungenembolie	31
Einblick in den Lungenzustand des Patienten	15	Hämorrhagischer Schock	32
Bereich X – CO_2 -Eliminierung ($V'\text{CO}_2$)	17	Entwöhnungsprozess optimieren	33
Bereich Y – alveolärer Totraum	19	Während des Patiententransports überwachen	35
Bereich Z – anatomischer Totraum	20	Rückatmung	36

Überblick über den Inhalt – 2/2

Klinische Anwendung der Trends	37	Anhang	49
PetCO ₂ im Vergleich zu V'CO ₂	38	Volumetrische Kapnographie bei	
PEEP anhand von Trends optimieren	40	Beatmungsgeräten von	
Alveoläres Derecruitment erkennen	41	Hamilton Medical	50
		Loops und Trends auf dem Bildschirm	51
Testen Sie Ihr Wissen	42	Volumetrische Kapnographie	
Multiple-Choice-Test	43	im Monitoring	52
Patient A	44	Formeln für die Berechnung	53
Patient B	45	Beispiele für Normalwerte	54
Patient C	46	Referenzliteratur von A bis Z	55
Patient D	47	Glossar von A bis Z	56
Lösungen	48		
		Impressum	57

Die Beatmungsexperten



Karjaghli Munir

Atemtherapeut
Klinischer Anwendungsspezialist
bei Hamilton Medical



Matthias Himmelstoss

Pfleger auf der Intensivstation, MSc in Physik
Produktmanager bei Hamilton Medical

Einleitung

Kohlendioxid (CO_2) ist das Gas, das vom menschlichen Körper in der größten Menge produziert wird. CO_2 ist der Hauptantrieb für die Atmung und die wichtigste Motivation für die maschinelle Beatmung von Patienten. Die Überwachung der CO_2 -Konzentration während der Atmung (Kapnographie) erfolgt nichtinvasiv. Die Durchführung ist einfach, relativ kostengünstig und wurde umfangreich untersucht.

Dank der Entwicklung von schnelleren Infrarotsensoren, die eine Messung des CO_2 -Gehalts an der Atemwegsöffnung in Echtzeit ermöglichen, konnte die Kapnographie in den letzten Jahrzehnten verbessert werden. Durch das Wissen, wie sich das CO_2 auf seinem Weg aus dem Blutstrom über die Alveolen in die Umgebungsluft verhält, erhalten die Ärzte hilfreiche Informationen zu Ventilation und Perfusion.

Es gibt zwei unterschiedliche Kapnographiearten: Die **konventionelle, zeitbasierte Kapnographie** lässt nur qualitative, semiquantitative und zum Teil irreführende Messungen zu. Deshalb hat sich die **volumetrische Kapnographie** als die bevorzugte Methode für die Bewertung der Qualität und Quantität der Beatmung herausgebildet.



Dieses eBook konzentriert sich auf die Verwendung der **volumetrischen Kapnographie** bei maschinell beatmeten Patienten.

Vorteile der volumetrischen Kapnographie

- ✓ Verbessert, vereinfacht und ergänzt das Patienten-Monitoring im Hinblick auf Stoffwechsel, Durchblutung und Ventilation (V/Q)
- ✓ Liefert Informationen zur homogenen bzw. heterogenen Belüftung der Lunge
- ✓ Trendfunktionen und Referenz-Loops ermöglichen eine umfassendere Analyse des Patientenzustands
- ✓ Verschiedenste klinische Anwendungen, wie die frühzeitige Erkennung von Anzeichen für Lungenembolie, COPD, ARDS usw.
- ✓ Unterstützt die Optimierung der Einstellungen für das Beatmungsgerät
- ✓ Die Durchführung ist einfach und relativ kostengünstig



Kurz gesagt ist die volumetrische Kapnographie ein wertvolles Hilfsmittel, um die Qualität und Effizienz der Beatmung für Ihre beatmeten Patienten zu verbessern.

Das volumetrische Kapnogramm

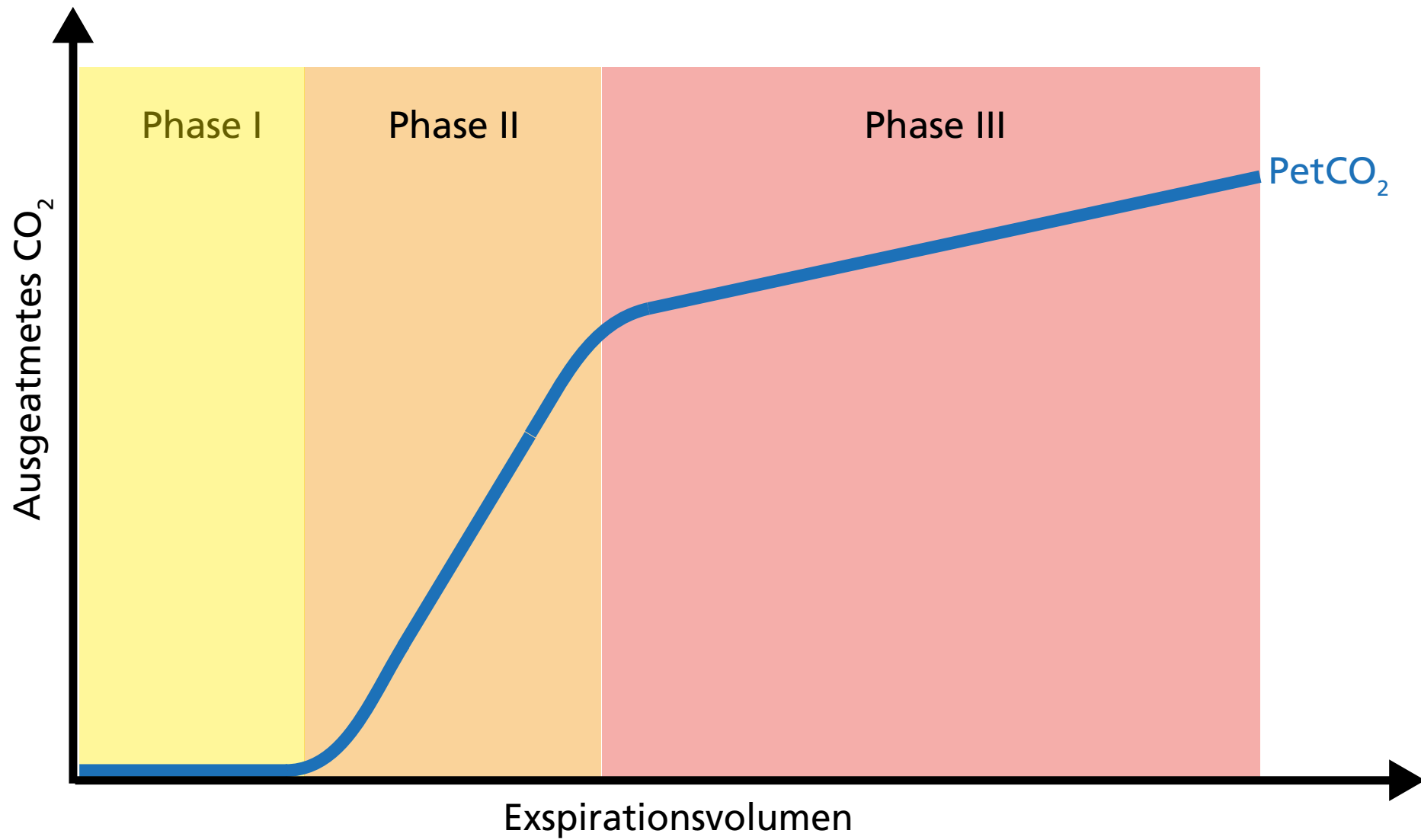
Die drei Phasen

Die Kohlendioxidkonzentration (CO_2) in den Alveolen ergibt sich aus Stoffwechsel, Herzzeitvolumen, Lungenperfusion und Ventilation. Veränderungen der CO_2 -Konzentration weisen auf Störungen in einem oder einer Kombination dieser Faktoren hin. Die volumetrische Kapnographie überwacht kontinuierlich die CO_2 -Produktion, den V/Q-Status (das Ventilations-Perfusions-Verhältnis) und die Durchgängigkeit der Atemwege sowie die Funktion des Beatmungsschlauchsystems am Beatmungsgerät selbst.

Das ausgeatmete Gas wird in drei aufeinander folgenden Kompartimenten der Atemwege mit CO_2 angereichert, die als drei getrennte Phasen im Expirationskapnogramm zu erkennen sind. Die Kurve eines Atemhubs bei der volumetrischen Kapnographie weist diese drei charakteristischen Phasen mit sich ändernden Gasgemischen auf. Sie beziehen sich auf das Atemwegsareal, aus dem das Gasgemisch kommt:

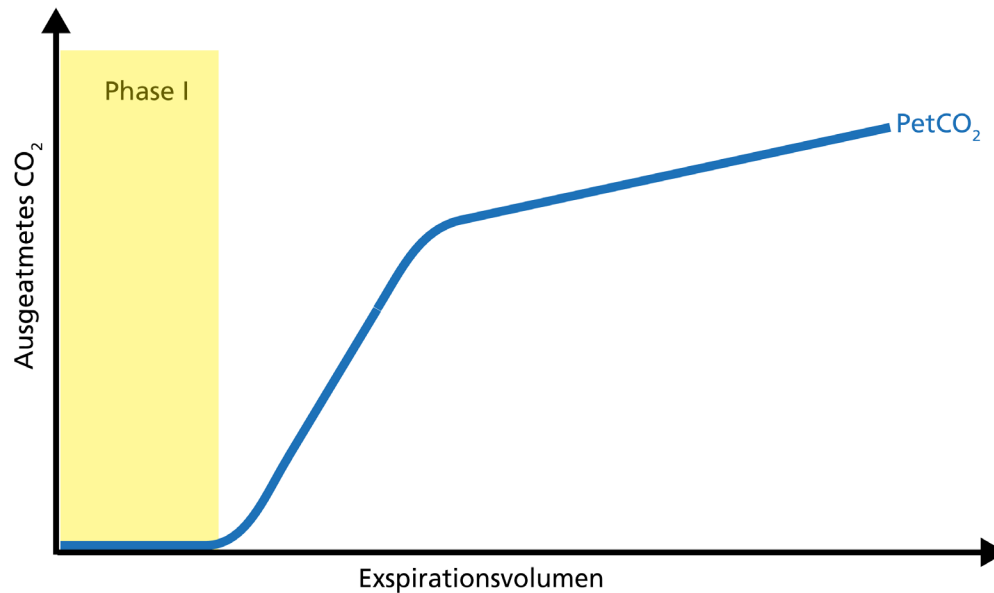
-  Phase I – anatomischer Totraum
-  Phase II – Übergangsphase: Gas aus proximalen und sich schnell entleerenden Lungenarealen
-  Phase III – Plateauphase: Gas aus den Alveolen und sich langsam entleerenden Arealen

Anhand der Merkmale der jeweiligen Phase lassen sich physiologische Messwerte berechnen.



Phase I – anatomischer Totraum

Das erste Gas, das den Sensor zu Beginn der Expiration passiert, kommt aus den Atemwegen und dem Beatmungsschlauchsystem, wo kein Gasaustausch stattgefunden hat = anatomischer + künstlicher Totraum. Dieses Gas enthält in der Regel kein CO_2 . Daher bewegt sich die Kurve entlang der X-Achse (Expirationsvolumen), aber auf der Y-Achse wird keine Zunahme der CO_2 -Konzentration verzeichnet.

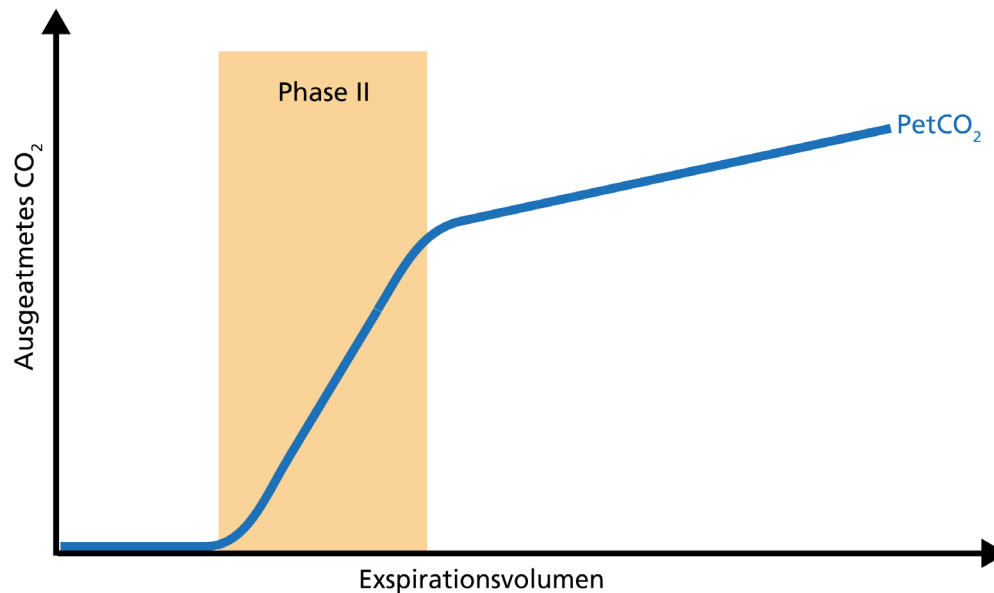


Eine verlängerte Phase I weist auf eine erhöhte anatomische Totraumbeatmung hin (V_{ds}).

Wenn während Phase I CO_2 festgestellt wird, ist das ein Hinweis auf eine Rückatmung oder der Sensor muss erneut kalibriert werden.

Phase II – Übergangsphase

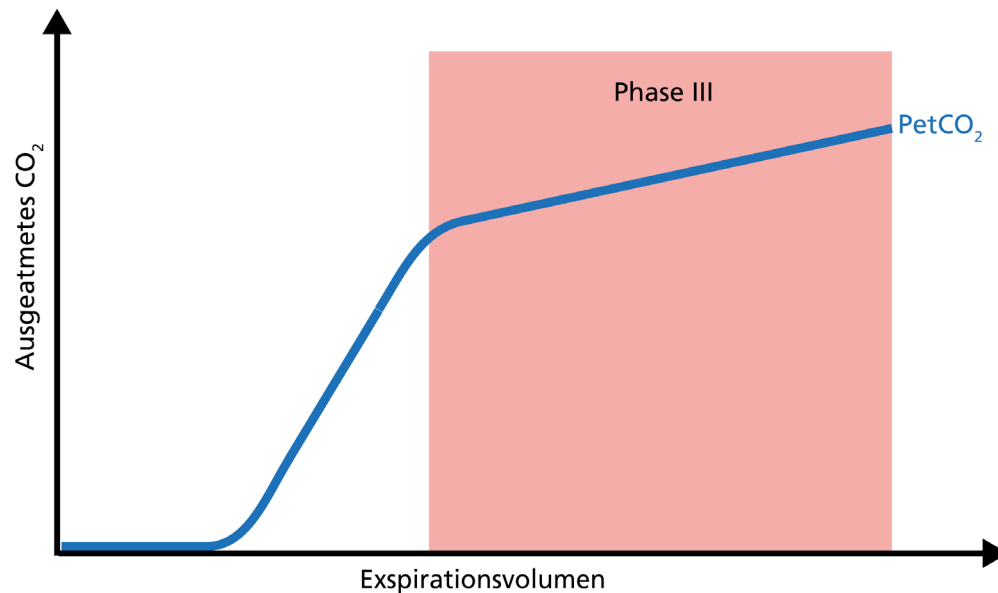
Phase II stellt das Gas dar, das sich anteilig aus dem distalen Atemwegsvolumen gemischt mit dem Gas aus sich schnell entleerenden Alveolen zusammensetzt. Der Anstieg der Kurve gibt wieder, wie schnell das Gas aus den distalen Atemwegen zum Gas aus den Alveolen übergeht. Das veranschaulicht Informationen zu Veränderungen in der Perfusion sowie zur Resistance im Atemweg.



Eine verlängerte Phase II kann auf einen Anstieg der Resistance im Atemweg und/oder ein schlecht angepasstes Ventilations-Perfusions-Verhältnis (V/P) hinweisen.

Phase III – Plateauphase

In Phase III stammt das gesamte Gas aus den Alveolen, in denen der Gasaustausch stattfindet. Diese Phase gibt die Gasverteilung wieder. Der endgültige CO_2 -Wert in Phase III wird als endtidaler CO_2 -Gehalt (PetCO_2) bezeichnet.



Ein steiler Anstieg in Phase III stellt Informationen zur heterogenen Belüftung der Lunge mit einigen sich schnell und einigen sich langsam entleerenden Lungenarealen bereit.

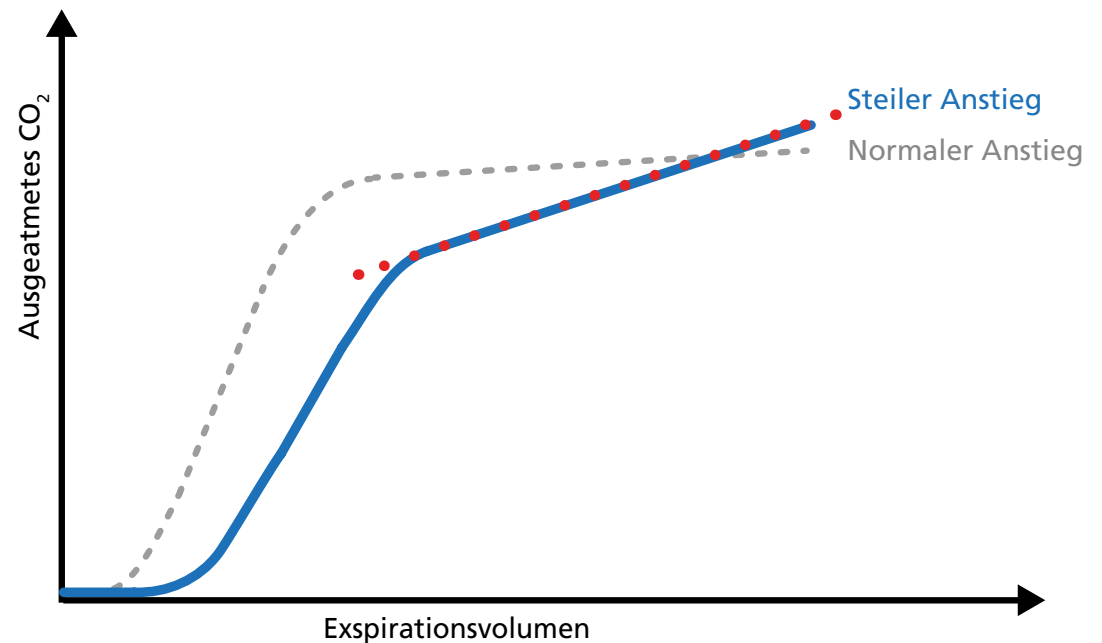
Beispielsweise führt eine Blockierung des Atemwegs zu unzureichend belüfteten Alveolen, was hohe CO_2 -Werte sowie erhöhte Zeitkonstanten in dieser Region zur Folge hat.

Anstieg in Phase III

Der Anstieg in Phase III ist ein Merkmal der Form des volumetrischen Kapnogramms. Dieser Anstieg wird in der geometrischen Mitte der Kurve gemessen, die als die mittleren zwei Viertel zwischen V_{ds} und dem Ende der Expiration definiert ist.



Ein steiler Anstieg ist zum Beispiel bei COPD- und ARDS-Patienten zu beobachten.



CO₂-Analyse bei einem Atemhub

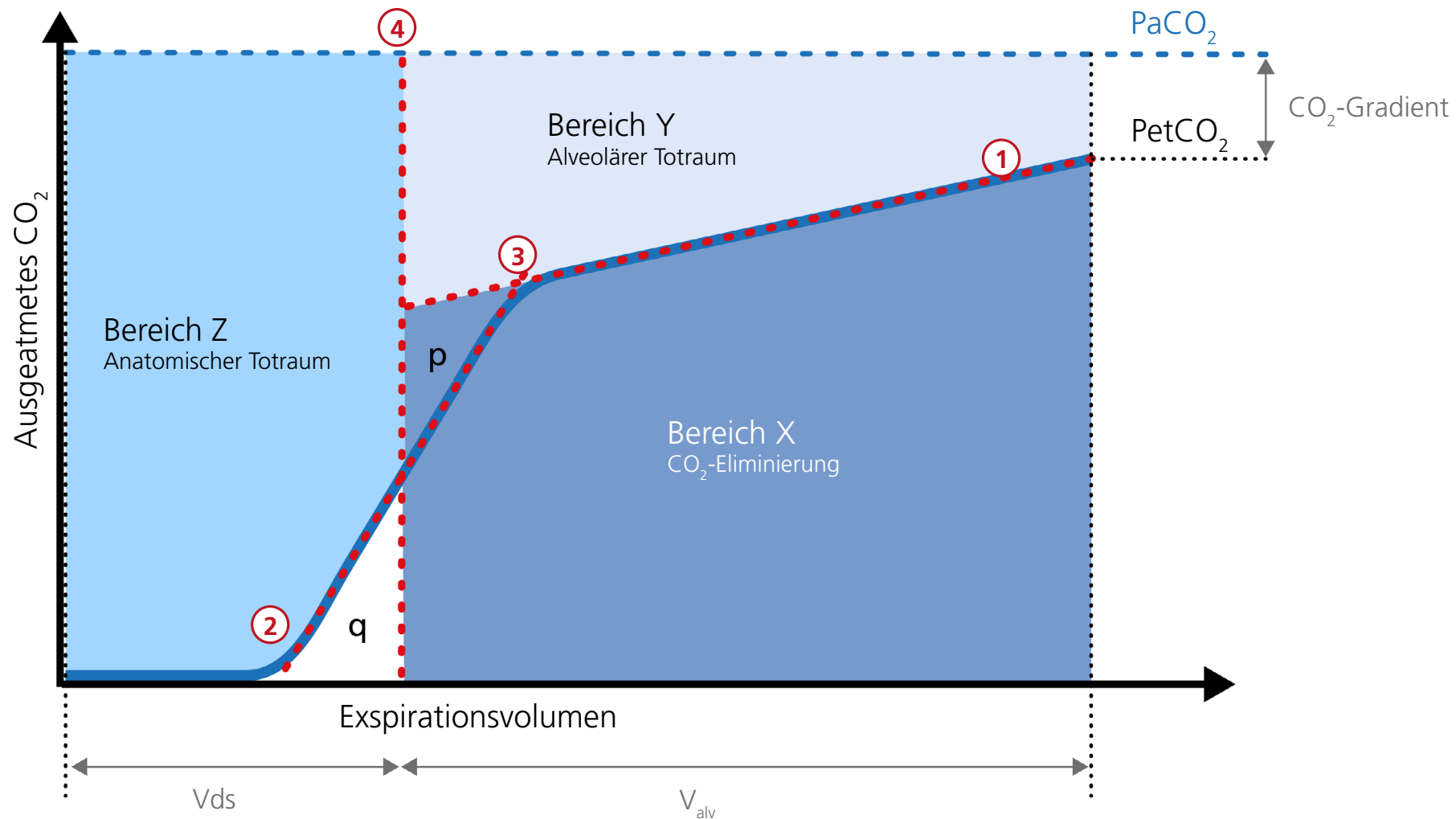
Einblick in den Lungenzustand des Patienten

Das volumetrische Kapnogramm kann ebenfalls in drei Bereiche unterteilt werden:

-  Bereich X – CO₂-Eliminierung
-  Bereich Y – alveolärer Totraum
-  Bereich Z – anatomischer Totraum

Die Größe der Bereiche sowie die Form der Kurve geben Aufschluss über den Lungenzustand des Patienten im Hinblick auf:

- Totraumfraktion – V_{ds}/VTE
- Alveoläres Minutenvolumen – VT_{alv}/min



1. Anstieg in Phase III
2. Anstieg in Phase II
3. Der Schnittpunkt zwischen den Linien 1 und 2 definiert die Grenze zwischen Phase II und Phase III.
4. Eine senkrechte Linie wird auf die X-Achse projiziert und so angepasst, dass die Bereiche p und q auf beiden Seiten gleich groß sind.

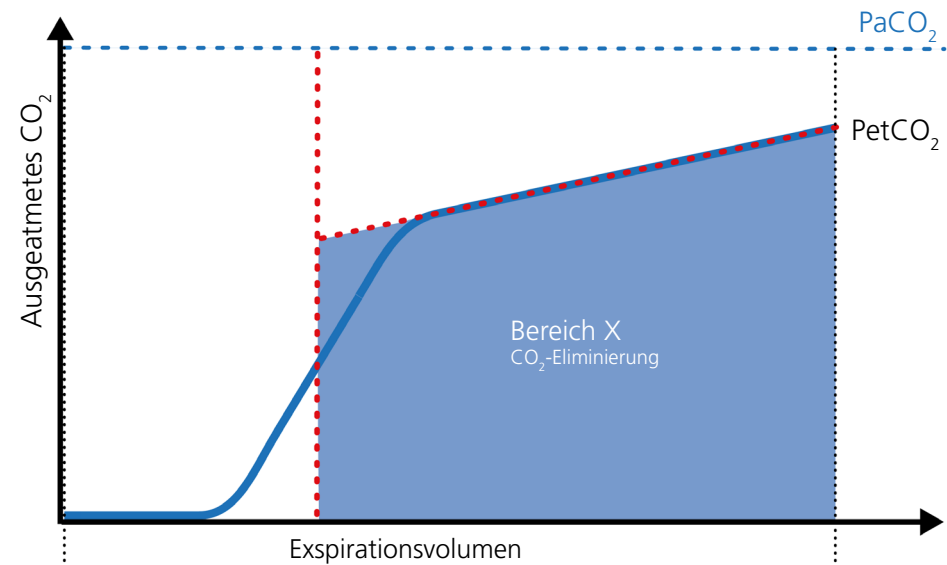
Bereich X – CO₂-Eliminierung ($V'\text{CO}_2$) – 1/2

Bereich X stellt das tatsächliche CO₂-Volumen dar, das bei einem Atemhub ausgeatmet wird ($V_e\text{CO}_2$). Durch Addition aller einzelnen Atemhübe in einer Minute erhalten Sie die gesamte CO₂-Eliminierung pro Minute ($V'\text{CO}_2$). Wenn Herzzeitvolumen, Lungenperfusion und Ventilation stabil sind, ergibt sich daraus eine Bewertung der CO₂-Produktion, die $V'\text{CO}_2$ genannt wird. Der am Beatmungsgerät angezeigte $V'\text{CO}_2$ -Wert kann durch jegliche Veränderung in CO₂-Produktion, Herzzeitvolumen, Lungenperfusion und Ventilation beeinflusst werden. Er zeigt sofort an, wie der Gasaustausch des Patienten auf eine Veränderung der Einstellungen am Beatmungsgerät reagiert. Die Überwachung von Trends ermöglicht es, plötzliche und schnelle Änderungen des $V'\text{CO}_2$ -Werts zu erkennen.



Abnehmender $V'\text{CO}_2$ -Wert

Hypothermie, starke Sedierung, Hypothyreose, Lähmung und Hirntod senken die CO₂-Produktion und führen damit zu einer Abnahme des $V'\text{CO}_2$ -Werts. Ein sinkender $V'\text{CO}_2$ -Wert kann auch auf eine Abnahme des Herzzeitvolumens oder auf Blutverlust zurückzuführen sein und weist möglicherweise auf eine Veränderung des Blutflusses in die Lungenareale hin. Bei einer Lungenembolie kommt es beispielsweise zu einer Abnahme des $V'\text{CO}_2$ -Werts und einem flacheren Anstieg in Phase II.



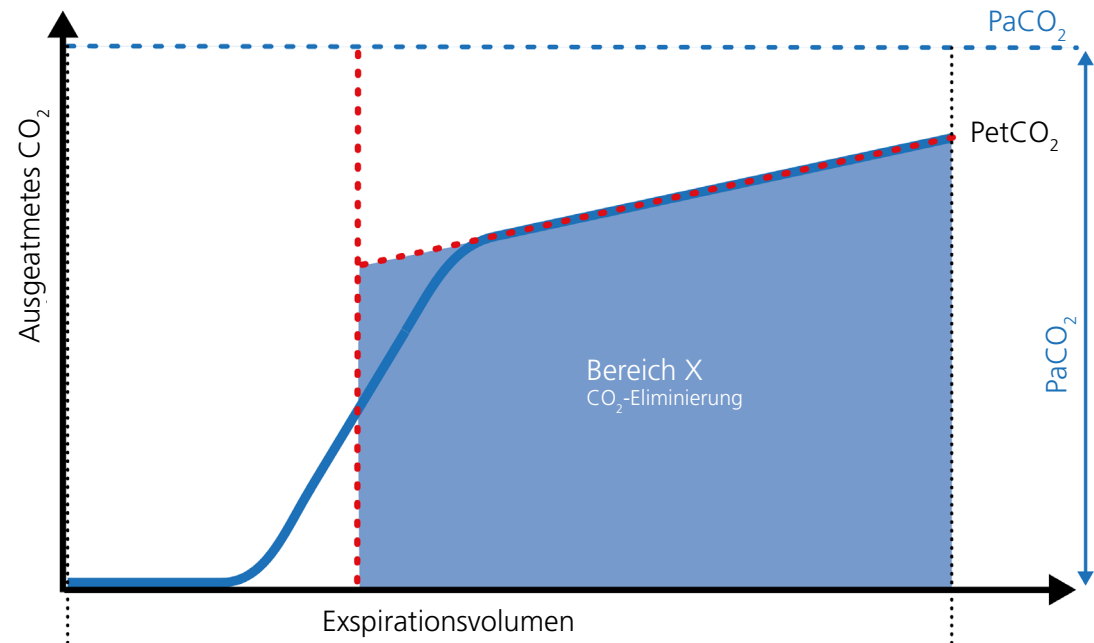
Bereich X – CO₂-Eliminierung (V'CO₂) – 2/2



Ansteigender V'CO₂-Wert

Ist in der Regel auf die Infusion von Bicarbonat oder einen Anstieg der CO₂-Produktion aufgrund folgender Ursachen zurückzuführen:

- Fieber
- Sepsis
- Krämpfe
- Hyperthyreose
- Insulintherapie



Bereich Y – alveolärer Totraum

Bereich Y stellt die CO_2 -Menge dar, die nicht durch den alveolären Totraum eliminiert wird.

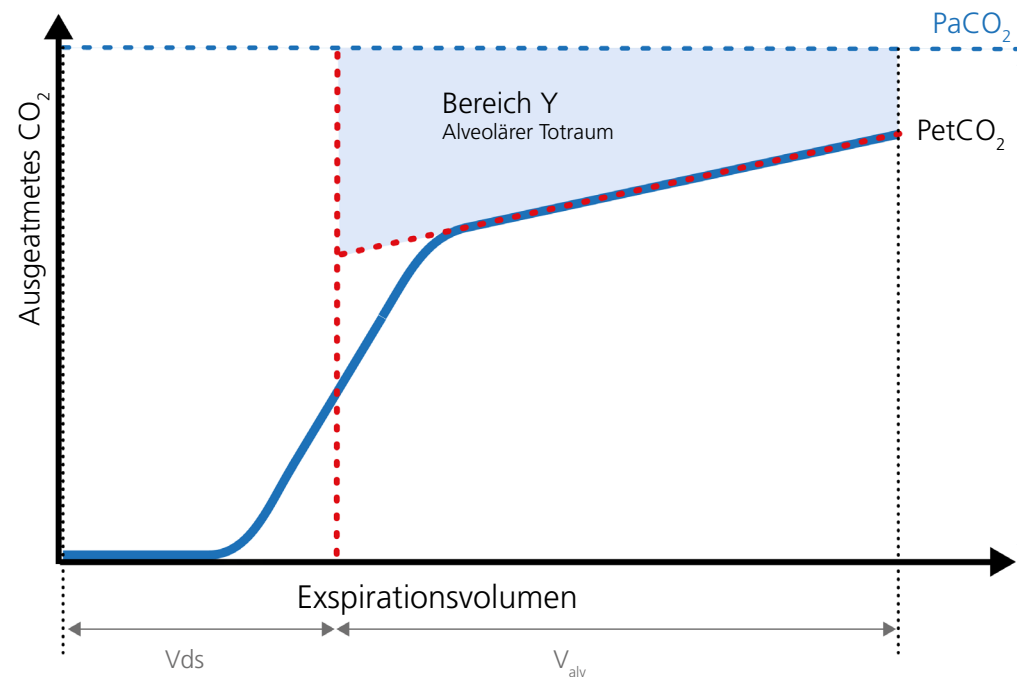


Erhöhung

Der alveoläre Totraum erhöht sich bei Lungenemphysem, Überblähung der Lunge, Lungenembolie, pulmonaler Hypertonie und beeinträchtigtem Herzzeitvolumen.

Verringerung

Bei einer Besserung der oben genannten Zustände durch eine erfolgreiche Therapie verringert sich der alveoläre Totraum.



Bereich Z – anatomischer Totraum

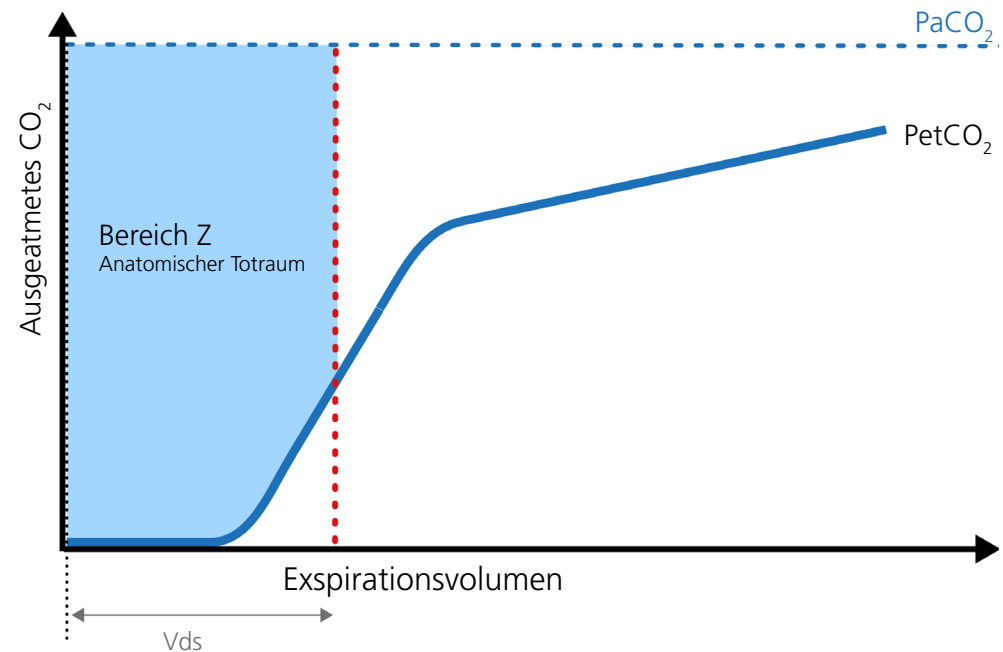
Die Messung des anatomischen Totraums mithilfe eines volumetrischen Kapnogramms bietet eine effektive In-vivo-Messung des Volumens, das im leitenden Atemweg verloren geht. Dieser Bereich stellt das Volumen ohne CO_2 dar. Es ist nicht am Gasaustausch beteiligt und besteht aus dem Atemweg, dem Endotrachealtubus und künstlichen Atemwegskomponenten, z. B. einem flexiblen Schlauch, der den CO_2 -Sensor mit dem Patienten verbindet.



Eine Vergrößerung des Bereichs Z

kann auf eine Erhöhung der anatomischen Totraumbeatmung (V_{ds}) hinweisen. Erwägen Sie die Reduzierung des künstlichen Totraumvolumens.

Eine **Verkleinerung des Bereichs Z** ist zu beobachten, wenn das künstliche Totraumvolumen verringert und ein übermäßig hoher PEEP reduziert wird.



Alveoläres Minutenvolumen – VTalv/min

Phase III der Kurve stellt die Gasmenge dar, die aus den Alveolen kommt und aktiv am Gasaustausch beteiligt ist. VTalv/min ergibt sich durch Subtraktion des anatomischen Totraums (V_{ds}) vom Tidalvolumen (VTE) multipliziert mit der Atemfrequenz aus dem Minutenvolumen (MinVol): $VTalv/min = AF * Vt_{alv} = AF * (VTE - V_{ds})$

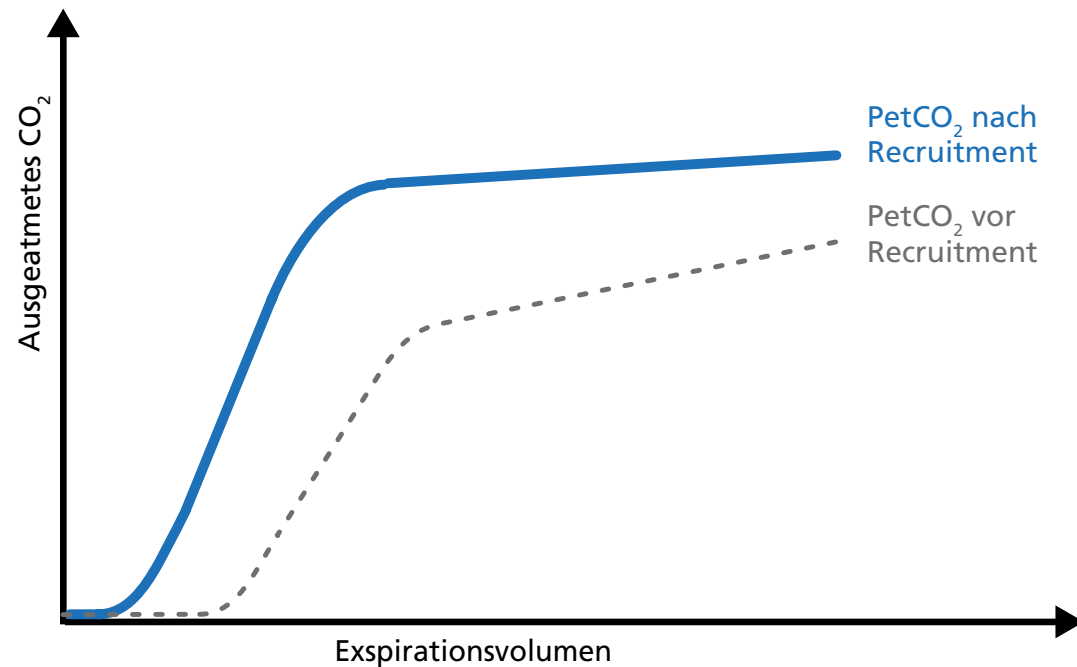


Erhöhung

Eine Erhöhung des VTalv/min-Werts ist nach einem wirksamen Recruitmentmanöver zu beobachten und bewirkt einen vorübergehenden Anstieg des $V'CO_2$ -Werts.

Verringerung

Eine Abnahme des VTalv/min-Werts kann darauf hinweisen, dass weniger Alveolen am Gasaustausch beteiligt sind, z. B. aufgrund eines Lungenödems.



Totraumbeatmung – Verhältnis V_{ds}/VTE

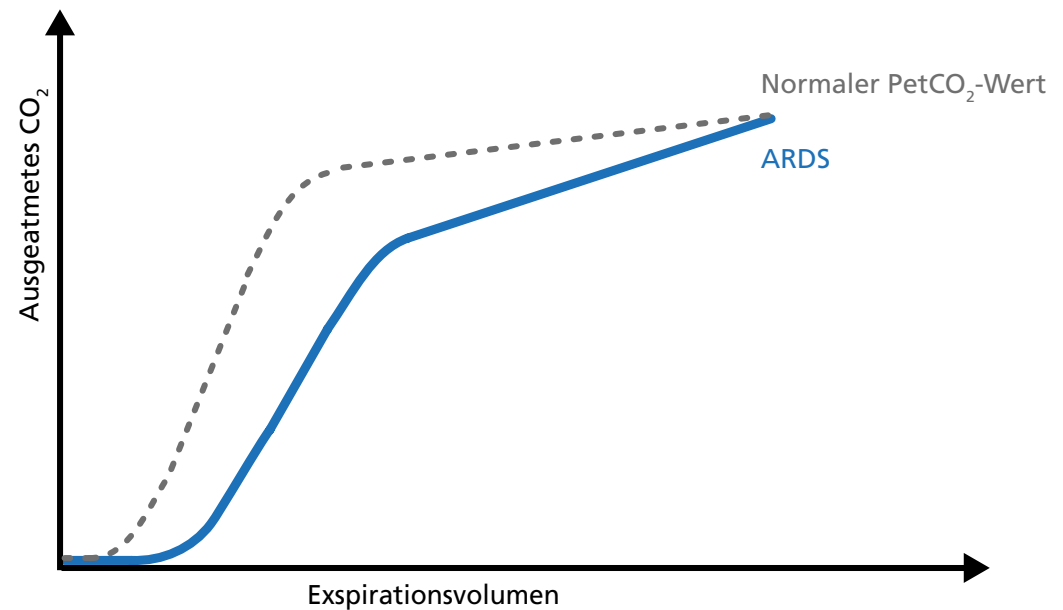
Das Verhältnis des anatomischen Totraums (V_{ds}) zum Tidalvolumen (VTE) – das Verhältnis V_{ds}/VTE – ermöglicht Aussagen über die Wirksamkeit der Beatmung.



Ein Anstieg des Verhältnisses V_{ds}/VTE kann ein Anzeichen für ARDS sein.

Bei normalen Lungen liegt das Verhältnis V_{ds}/VTE zwischen 25 und 30 %.

Im Frühstadium von ARDS liegt es zwischen 58 und 83 %.



Wie ist das klinisch relevant?

Qualität und Effizienz der Beatmung verbessern

Sie können die Erkenntnisse aus der CO_2 -Kurve dazu verwenden, um die Qualität und Effizienz der Beatmung für Ihre Patienten zu verbessern. Auf den folgenden Seiten finden Sie Beispiele, wie die CO_2 -Kurve in den unten aufgeführten klinischen Situationen eingesetzt wird:

- Anzeichen für ARDS
- PEEP-Management
- Recruitmentmanöver
- Expiratorische Resistance
- Obstruktive Lungenerkrankung
- Lungenembolie
- Hämorrhagischer Schock
- Management des Entwöhnungsprozesses optimieren
- Perfusion während des Patiententransports überwachen
- Rückatmung erkennen

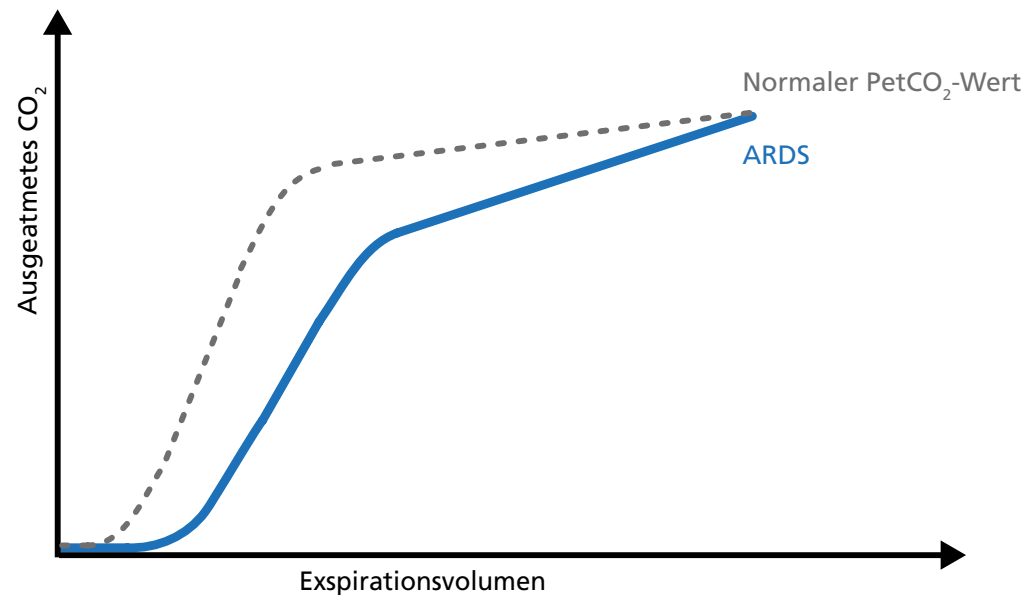
Anzeichen für ARDS – akutes Atemnotsyndrom

Bei ARDS ist das Ventilations-Perfusions-Verhältnis gestört und es sind Veränderungen im Anstieg der volumetrischen Kapnogrammkurve zu beobachten.



Phase I ist aufgrund eines durch den PEEP verursachten erhöhten anatomischen Totraums größer. Der Anstieg in Phase II ist aufgrund von Anomalien in der Lungenperfusion flacher.

Der Anstieg in Phase III ist aufgrund einer heterogenen Belüftung der Lunge steiler.



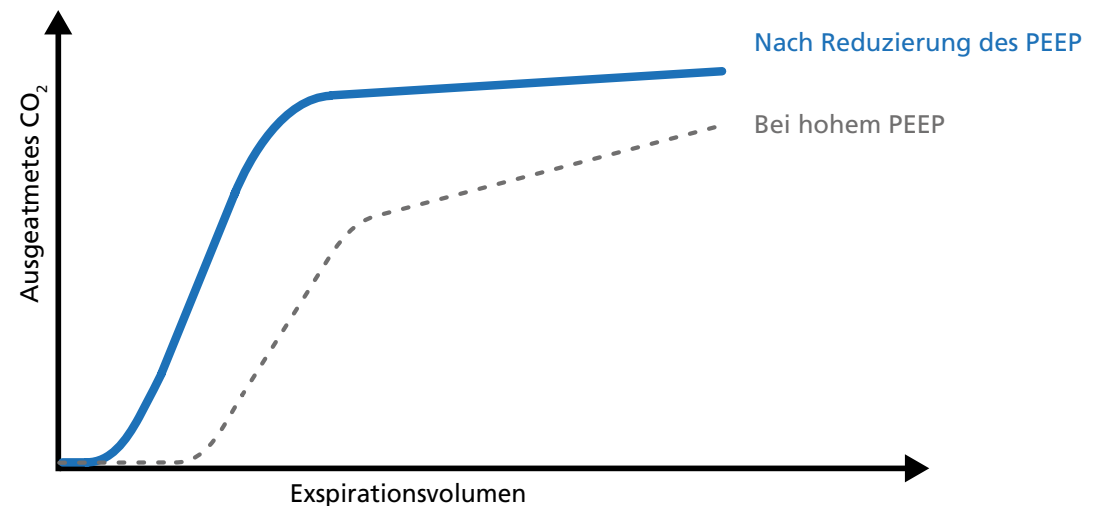
PEEP-Management

Wenn der PEEP zu hoch ist, steigt der intrathorakale Druck an, der venöse Rückstrom nimmt ab und der pulmonale Gefäßwiderstand (PVR) erhöht sich. Diese Veränderungen sind am volumetrischen Kapnogramm leicht abzulesen.



Ein Anstieg in Phase I zeigt eine Zunahme des anatomischen Totraums auf. Ein flacherer Anstieg in Phase II weist auf eine Abnahme der Perfusion hin.

Ein steilerer Anstieg in Phase III veranschaulicht eine Fehlverteilung von Gas, die durch eine unangemessen niedrige oder hohe PEEP-Einstellung verursacht wird und zu einer Überblähung der Lunge führt.



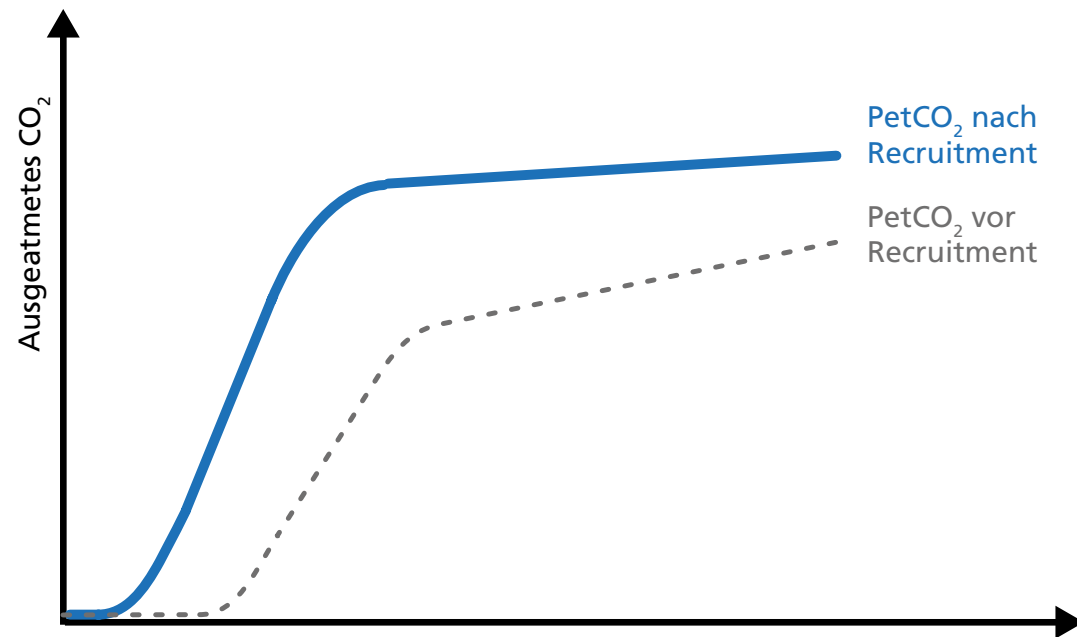
Recruitmentmanöver

Das volumetrische Kapnogramm kann zur Beurteilung der Wirksamkeit von Recruitmentmanövern verwendet werden und ermöglicht Aussagen über das rekrutierte Lungenvolumen.



Nach einem erfolgreichen Recruitmentmanöver sollte ein vorübergehender Anstieg des $V'\text{CO}_2$ -Werts zu sehen sein.

Phase I kann etwas abnehmen. Der Anstieg in Phase II wird aufgrund einer verbesserten Lungenperfusion steiler. Der Anstieg in Phase III verbessert sich aufgrund einer homogenen Entleerung der Lunge.



Expiratorische Resistance

Konkave volumetrische Kapnogramme in Phase III wurden bei adipösen Patienten sowie bei Patienten mit erhöhter expiratorischer Resistance beobachtet. Adipöse Patienten (Abb. 1) können eine biphasische Entleerung aufweisen und die PetCO_2 -Werte liegen möglicherweise über den PaCO_2 -Werten. Diese Abweichung legt sich ändernde Eigenschaften im Hinblick auf Mechanik und Ventilation/Perfusion nahe. Der Anstieg in der expiratorischen Resistance (Abb. 2) kann auf eine langsame Expirationsphase mit sich langsam akkumulierendem CO_2 hinweisen. Die Alveolen, die sich zuletzt entleeren, haben ggf. mehr Zeit für die Diffusion von CO_2 .

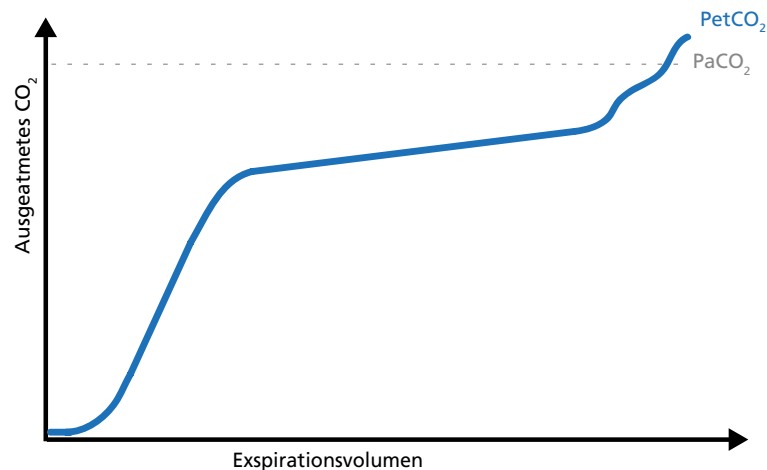


Abb. 1: Konkaves volumetrisches Kapnogramm im Zusammenhang mit Adipositas

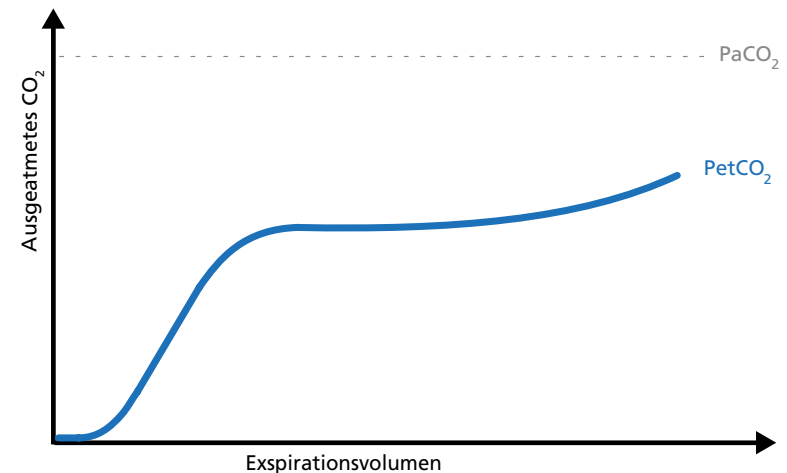


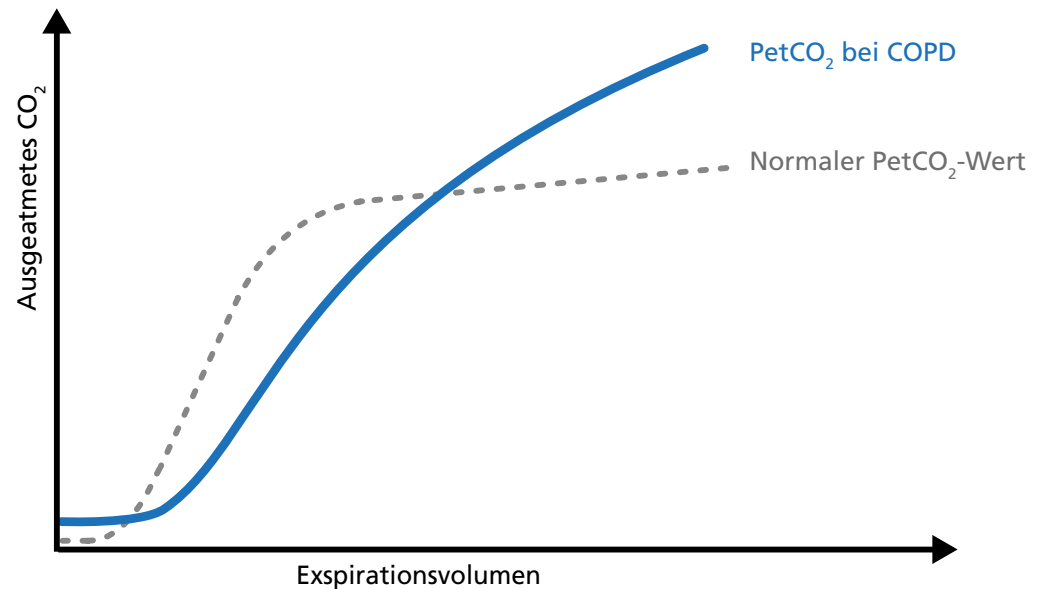
Abb. 2: Konkaves volumetrisches Kapnogramm im Zusammenhang mit einer erhöhten Atemwegs-Resistance

Obstruktive Lungenerkrankung – 1/2

Wenn keine zuverlässigen spirometrischen Messungen möglich sind, kann die volumetrische Kapnographie als Alternative eingesetzt werden, um das Maß der funktionellen Beteiligung bei Patienten mit obstruktiver Lungenerkrankung (COPD, Asthma, zystischer Fibrose usw.) zu beurteilen. Für die obstruktive Lungenerkrankung ist eine asynchrone Entleerung der Lungenkompartimente mit unterschiedlichen Ventilations-Perfusions-Verhältnissen charakteristisch.



Bei Patienten mit COPD weist das volumetrische Kapnogramm eine verlängerte Phase II, einen erhöhten PetCO₂-Wert sowie einen kontinuierlich zunehmenden Anstieg ohne Plateau in Phase III auf.



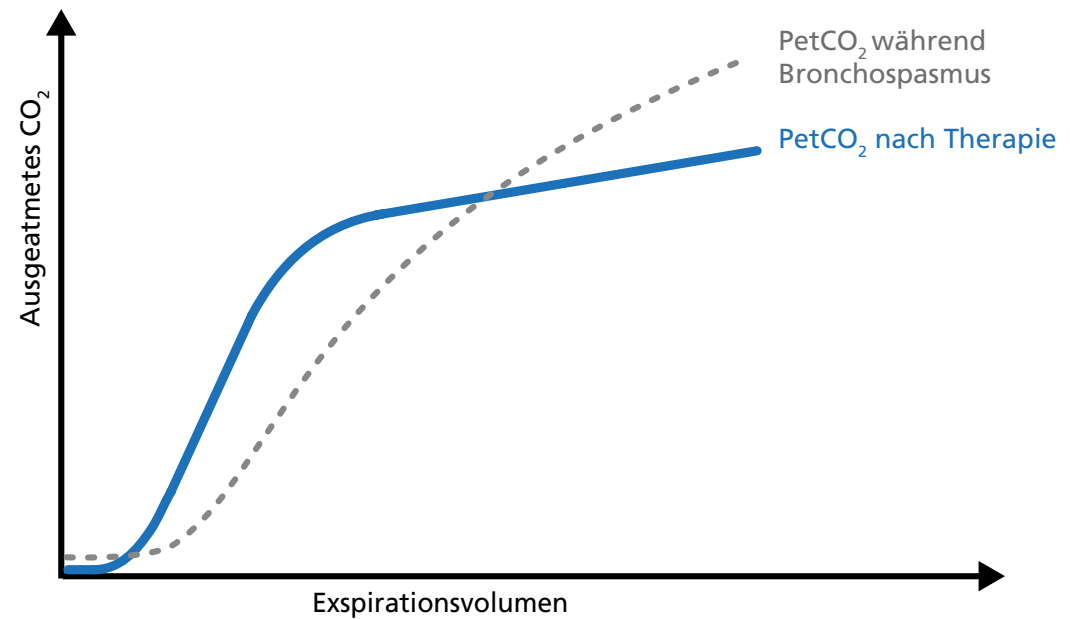
Obstruktive Lungenerkrankung – 2/2

Bei Patienten mit hoher Atemwegs-Resistance ist ein flacherer Anstieg in Phase II sowie ein steiler Anstieg in Phase III zu beobachten. Das volumetrische Kapnogramm ermöglicht einen Einblick, wie wirksam die Therapie ist.



Eine Verschiebung nach links in Phase II weist auf eine verringerte Resistance hin.

Der Anstieg in Phase III ist flacher. Das ist ein Hinweis auf eine bessere Gasverteilung sowie einen geringeren alveolären Totraum (V_{ds}).



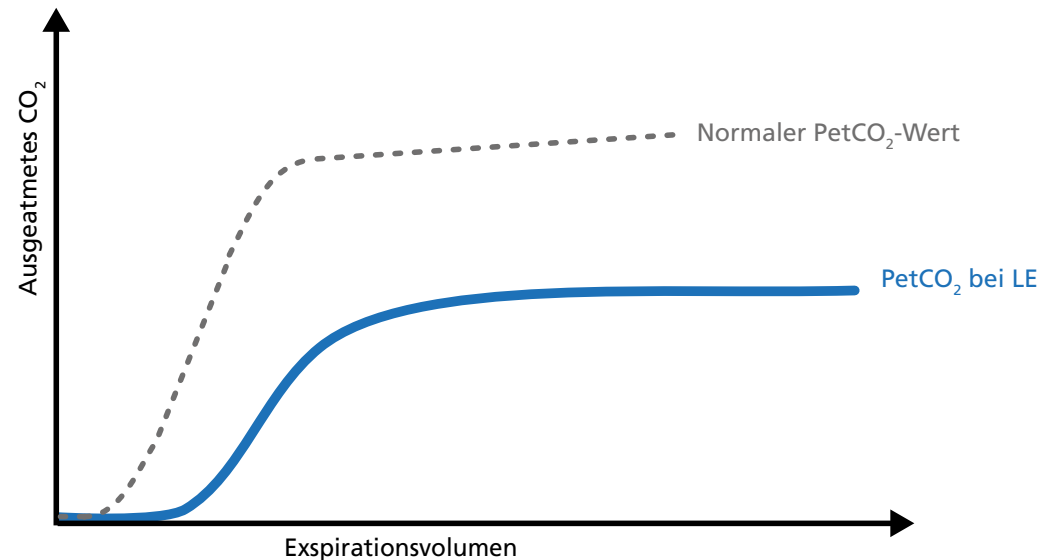
Anzeichen für Lungenembolie

Eine Lungenembolie (LE) führt zu einem abnormalen alveolären Totraum, der synchron mit dem Gas aus normal perfundierten Alveolen ausgeatmet wird. Dieses Merkmal der LE grenzt sie von Lungenerkrankungen ab, die den Atemweg betreffen und die durch eine asynchrone Entleerung der Lungenkompartimente mit einem ungleichmäßigen Ventilations-Perfusions-Verhältnis gekennzeichnet sind. Bei einer plötzlichen Lungenembolie weist die volumetrische Kapnographie eine typische, unverwechselbare Form auf.



Bei Patienten mit plötzlichem Gefäßverschluss in der Lunge aufgrund einer Lungenembolie vergrößert sich Phase I durch den höheren anatomischen Totraum.

Der Anstieg in Phase II ist aufgrund einer mangelhaften Lungenperfusion flacher. Phase III weist ein normales Plateau mit einem niedrigen PetCO_2 -Wert auf, da weniger Alveolen funktionsfähig sind. In diesem Fall kommt es zu einem plötzlichen Abfall des $\text{V}'\text{CO}_2$ -Werts.

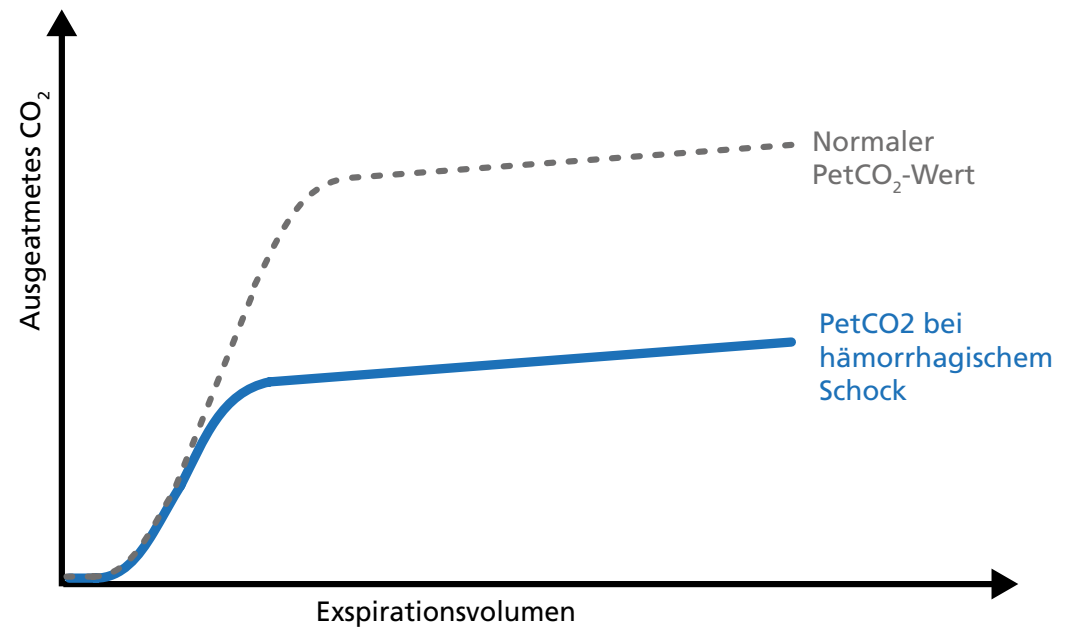


Hämorrhagischer Schock

Ein hämorrhagischer Schock ist ein Zustand mit verringerter Durchblutung des Gewebes, was zu einer unzureichenden Versorgung mit Sauerstoff und Nährstoffen führt, die für die Zellfunktion erforderlich sind.



Die ausgeatmete CO_2 -Konzentration sinkt drastisch ab. Phase I bleibt unverändert. Dasselbe gilt für den Anstieg in Phase II und Phase III, aber der Pet- CO_2 -Wert sinkt aufgrund des erhöhten alveolären Totraums.



Management des Entwöhnungsprozesses optimieren – 1/2

Das volumetrische Kapnogramm und die Trends zeigen die Reaktion des Patienten auf Entwöhnungsversuche und ermöglichen ein besseres Management des Entwöhnungsprozesses.

Hinweise für einen erfolgreichen Entwöhnungsversuch sind:

- **Stabiler $V_{T\text{alv}}/\text{min}$ -Wert und konstante Tidalvolumina**

Mit zunehmender Reduzierung der respiratorischen Unterstützung übernimmt der Patient die zusätzliche Atemarbeit, während der $V_{T\text{alv}}/\text{min}$ -Wert stabil bleibt und die spontanen Tidalvolumina konstant bleiben.

- **Der $V'\text{CO}_2$ -Wert bleibt stabil und steigt dann leicht an**

Der leichte Anstieg des $V'\text{CO}_2$ -Werts bedeutet einen Anstieg in der CO_2 -Produktion, da die Atemarbeit des Patienten durch die verringerte respiratorische Unterstützung zunimmt. Das lässt auf eine erhöhte Stoffwechselaktivität durch die zusätzlichen Atembemühungen des Patienten schließen.

Management des Entwöhnungsprozesses optimieren – 2/2

Hinweise für einen nicht erfolgreichen Entwöhnungsversuch sind:

- **Dramatischer Anstieg des $V'\text{CO}_2$ -Werts**

Ein dramatischerer Anstieg des $V'\text{CO}_2$ -Werts legt eine übermäßig hohe Atemarbeit und eine mögliche bevorstehende respiratorische Dekompensation nahe. In dieser Situation ist auch die Beobachtung einer verstärkten Atemnot zu erwarten (z. B. Retraktion, Tachypnoe und Unruhe). Der $V'\text{CO}_2$ -Wert sinkt schließlich, wenn der Patient erschöpft ist.

- **Abnehmender $V'\text{CO}_2$ -Wert**

Wenn die Einstellungen am Beatmungsgerät immer weiter verringert werden, ist der Patient nicht mehr in der Lage, eine ausreichende spontane Atmung aufrecht zu erhalten und das Gesamt-Atemminutenvolumen fällt mit abnehmender CO_2 -Eliminierung ab.

- **Erhöhtes Verhältnis V_{ds}/VTE**

Wenn die respiratorische Unterstützung nach einer Verringerung des Tidalvolumens reduziert wird, erhöht sich das Verhältnis V_{ds}/VTE . Das setzt die Wirksamkeit der Beatmung herab und verringert die Fähigkeit des Patienten, CO_2 zu eliminieren.

Perfusion während des Patiententransports überwachen

Wenn Sie beim Transport eines beatmeten Patienten nicht routinemäßig einen arteriellen Zugang legen, kann der PetCO₂-Wert zur Überwachung von Perfusion und Ventilation während des Transports eingesetzt werden.



Eine **Abnahme des PetCO₂-Werts bei gleichzeitiger Abnahme des VCO₂-Werts** kann Folgendes bedeuten:

- Verrutschen des ET-Tubus
- Verringertes Herzzeitvolumen
- Lungenembolie
- Atelektase
- Überblähung der Alveolen (z. B. übermäßig hoher PEEP)

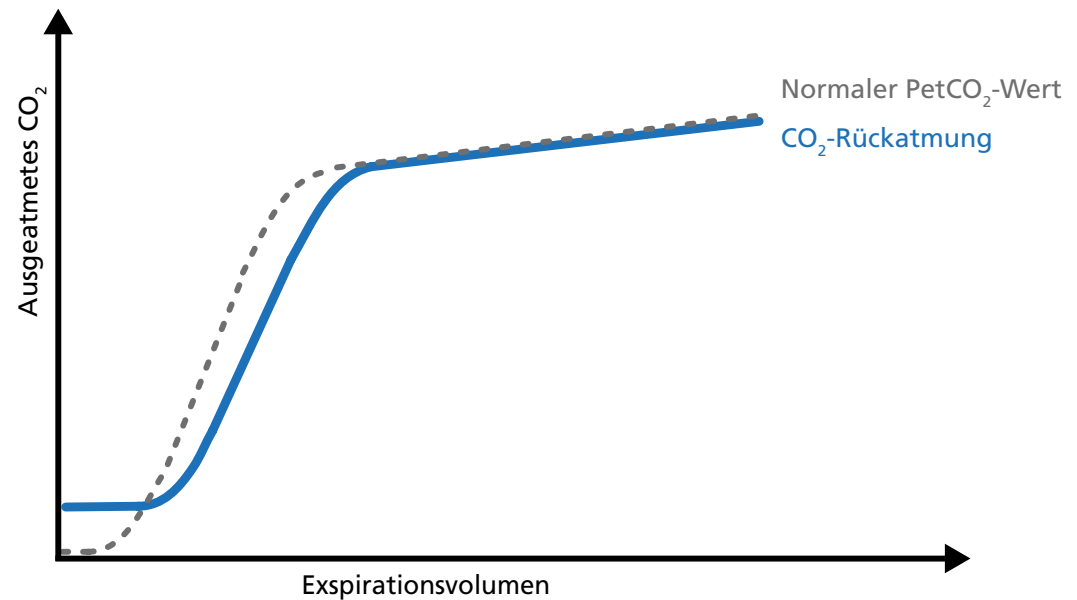


Rückatmung erkennen

Eine Erhöhung des Ausgangswerts während Phase I weist auf eine Rückatmung von CO_2 hin, die eventuell auf mechanische Probleme oder den therapeutischen Einsatz von mechanischem Totraum zurückzuführen ist.



Erwägen Sie, den CO_2 -Sensor neu zu kalibrieren oder weniger künstliche Atemwegskomponenten einzusetzen.



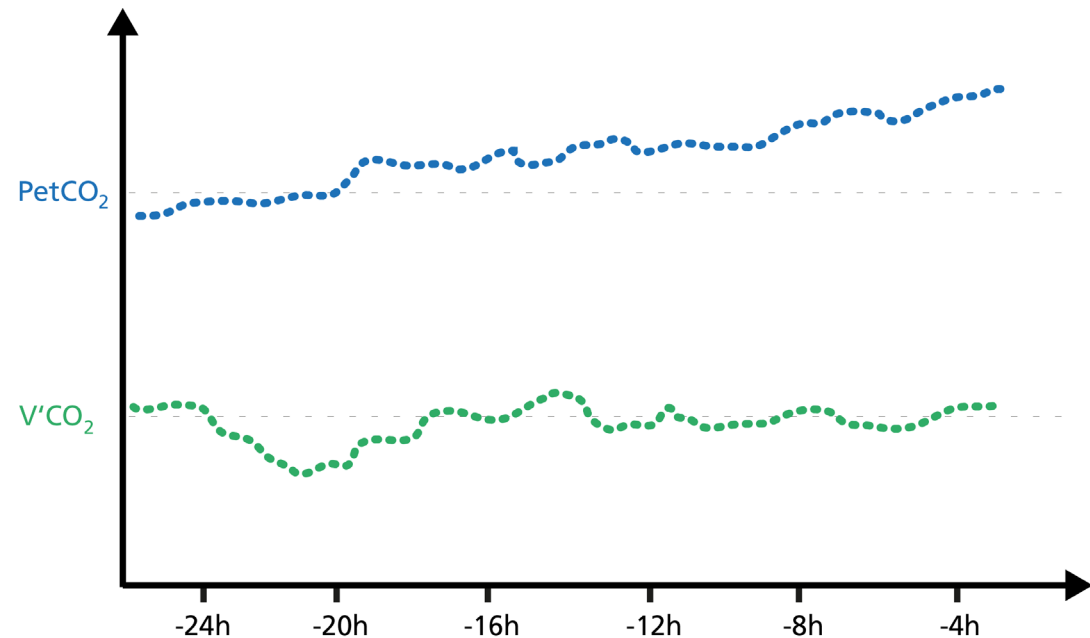
Klinische Anwendung der Trends

PetCO₂ im Vergleich zu V'CO₂ – gegenläufige, asynchrone Trends



Wenn sich der PetCO₂-Trend nach oben bewegt, während der V'CO₂-Trend für eine Weile abnimmt und dann zum Ausgangswert zurückkehrt, weist dies auf eine Verschlechterung der Beatmung hin.

Wenn sich der PetCO₂-Trend nach unten bewegt, während der V'CO₂-Trend für eine Weile zunimmt und dann zum Ausgangswert zurückkehrt, weist dies auf eine Verbesserung der Beatmung hin.

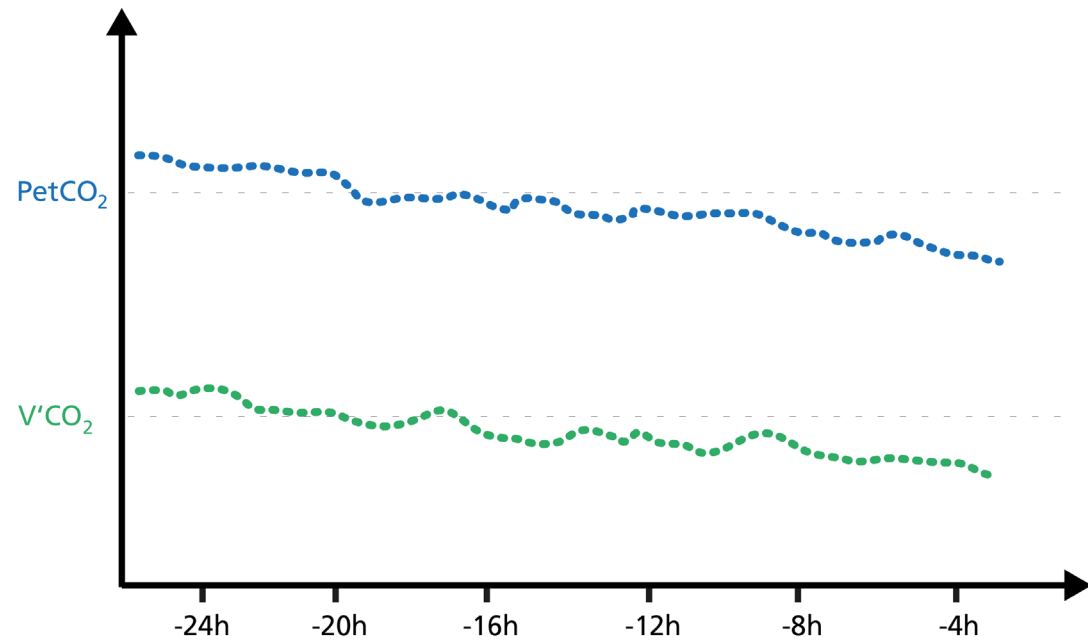


PetCO₂ im Vergleich zu V'CO₂ – synchrone Trends



Ansteigende PetCO₂- und V'CO₂-Trends weisen auf eine zunehmende CO₂-Produktion hin (Unruhe, Schmerzen, Fieber).

Fallende PetCO₂- und V'CO₂-Trends sind ein Indikator für eine Abnahme der CO₂-Produktion.

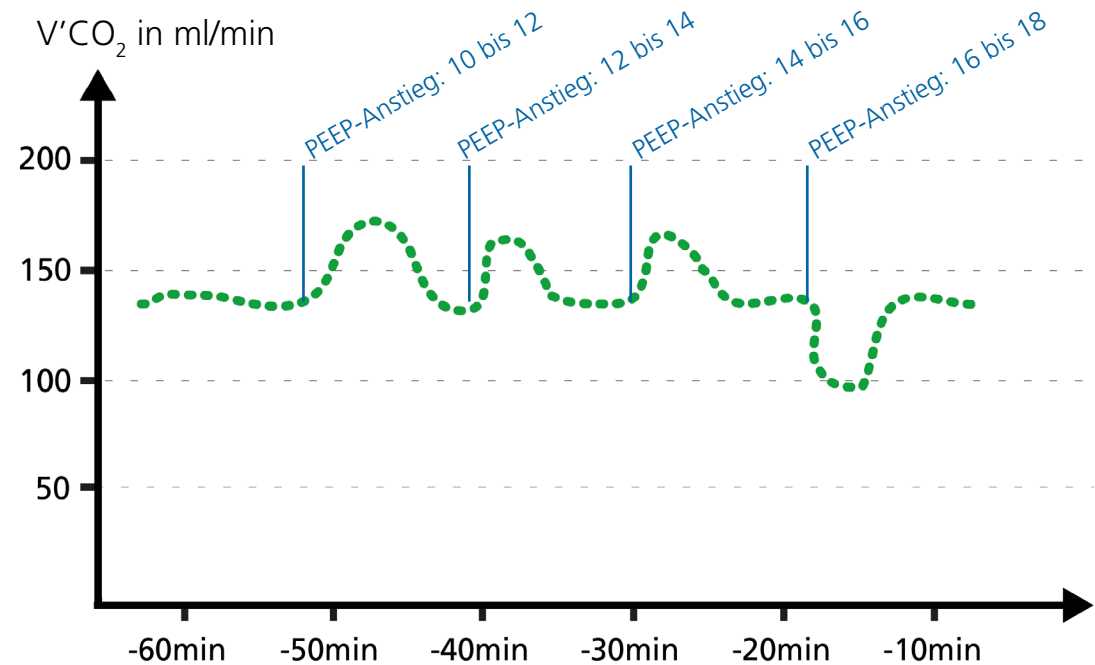


PEEP anhand von Trends optimieren



Wenn die Veränderung des PEEP mit einem sich verbessernden Ventilations-Perfusions-Verhältnis verbunden ist, weist $V'\text{CO}_2$ für einige Minuten einen vorübergehenden Anstieg auf und kehrt dann zum Ausgangswert zurück, d. h. zu einer ausgeglichenen CO_2 -Produktion.

Wenn die Veränderung des PEEP mit einem sich verschlechternden Ventilations-Perfusions-Verhältnis verbunden ist, sinkt der $V'\text{CO}_2$ -Wert vorübergehend für einige Minuten und kehrt dann zum Ausgangswert zurück.



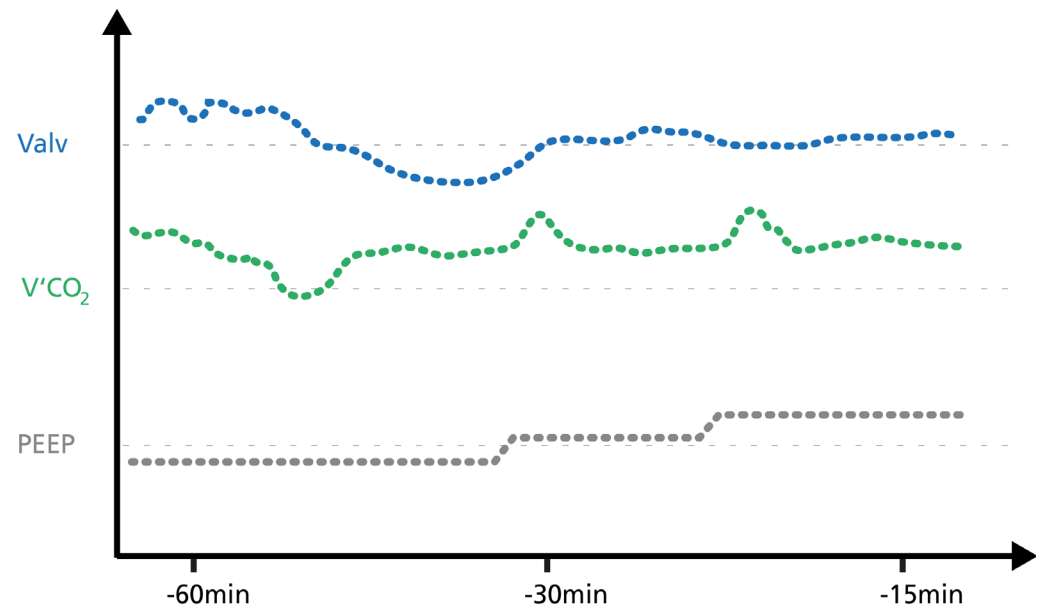
Alveoläres Derecruitment erkennen



Die volumetrische Messung des CO_2 -Gehalts ermöglicht ein kontinuierliches Monitoring, um ein Derecruitment bzw. Recruitment der Alveolen zu erkennen.

Die Ventilation der Alveolen und der $\text{V}'\text{CO}_2$ -Wert nehmen zunächst bei einem Derecruitment der Lunge ab und stabilisieren sich dann wieder im Gleichgewicht.

Ein Recruitment, beispielsweise während eines PEEP-Anstiegs, ist an kurzen $\text{V}'\text{CO}_2$ -Spitzen zu erkennen, bevor der $\text{V}'\text{CO}_2$ -Wert wieder ins Gleichgewicht zurückkehrt.



Testen Sie Ihr Wissen

Multiple-Choice-Test

Jetzt ist es Zeit, Ihr neu erworbenes Wissen zu testen. Auf den folgenden Seiten finden Sie klinische Fälle von intubierten Patienten auf der Intensivstation sowie jeweils drei typische Symptome für den Fall. Ermitteln Sie den Zustand des Patienten, indem Sie das volumetrische Kapnogramm interpretieren.

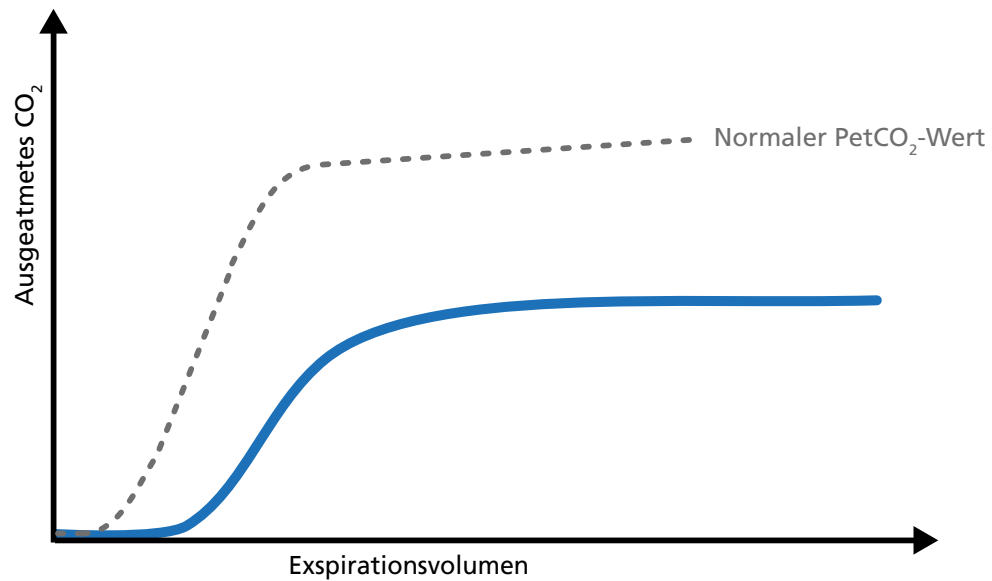
Es stehen drei Antwortmöglichkeiten zur Auswahl, von denen nur eine korrekt ist. Die Lösungen finden Sie auf Seite 48.

Viel Erfolg!

A	☐
B	☒
C	☐

Patient A

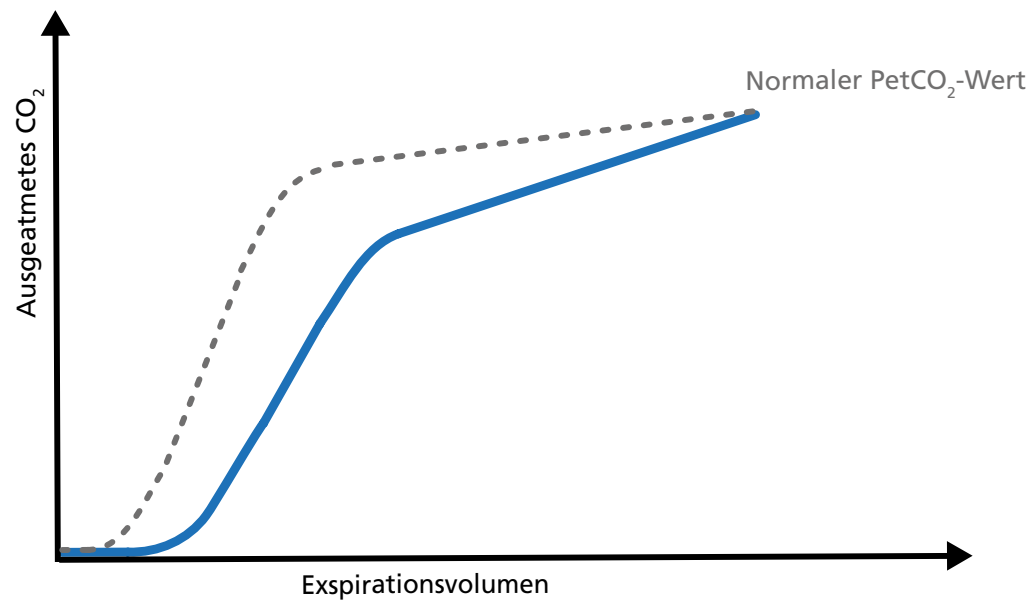
Es handelt sich um eine erwachsene, intubierte Patientin mit einer Atemfrequenz von 35 Atemhüben/Minute (Tachypnoe) und geschwollenen Waden. Worauf weist das volumetrische Kapnogramm hin?



- a) **Lungenembolie**
- b) **ARDS**
- c) **Sepsis**

Patient B

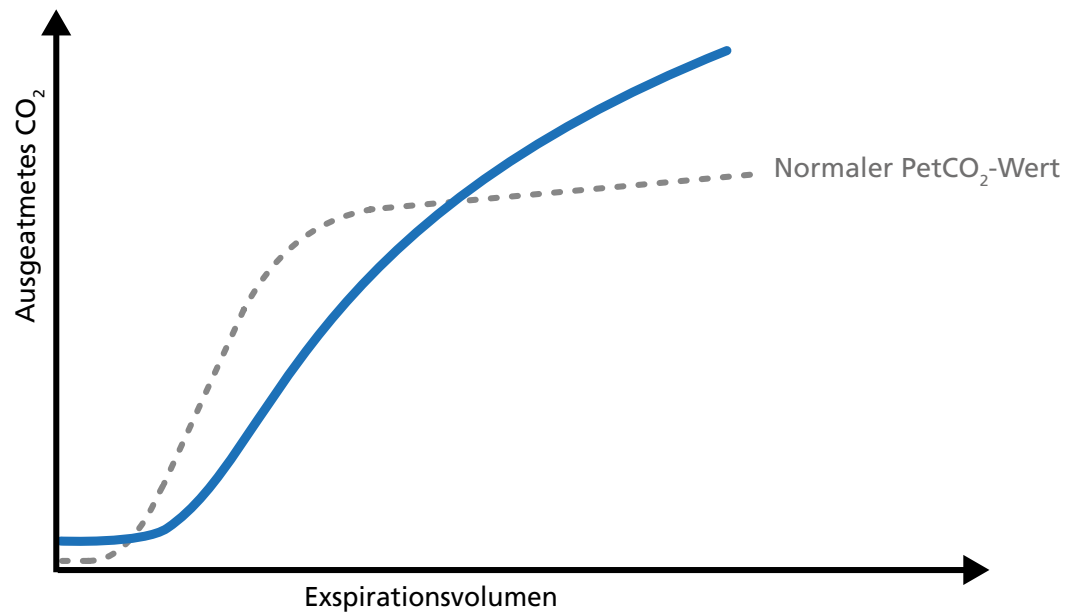
Es handelt sich um einen erwachsenen, intubierten Patienten mit trockenem Husten ohne Auswurf, Rasselgeräuschen in der Lunge und einer Herzfrequenz von 110 Schlägen/Minuten (Tachykardie). Worauf weist das volumetrische Kapnogramm hin?



- a) **Herzstillstand**
- b) **ARDS**
- c) **Sepsis**

Patient C

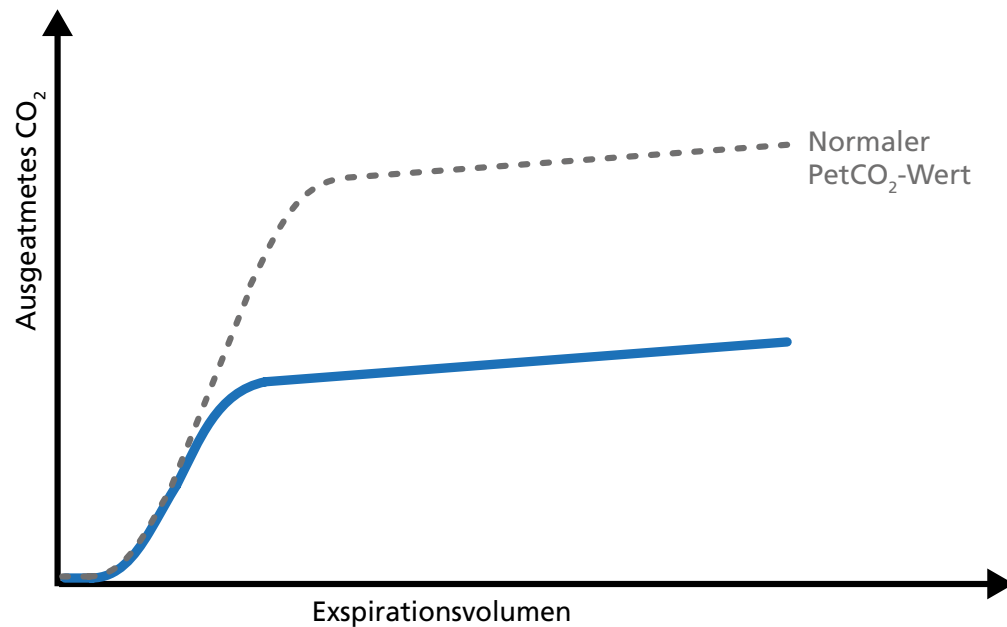
Es handelt sich um einen erwachsenen intubierten Patienten mit blauen Lippen und Nagelbetten (Zyanose) und einer Sauerstoffsättigung (SaO_2) von 89 %. Auf der Röntgenaufnahme sind überblähte Lungen zu erkennen. Worauf weist das volumetrische Kapnogramm hin?



- a) **PEEP ist zu hoch**
- b) **Lungenembolie**
- c) **Gravierende COPD**

Patient D

Es handelt sich um eine erwachsene Patientin, die nach einem Autounfall bewusstlos ohne sichtbare Verletzungen ins Krankenhaus eingeliefert wurde. Nach der Intubation weist sie einen niedrigen Blutdruck, Hyperglykämie und eine Herzfrequenz von 118 Schlägen/Minute (Tachykardie) auf. Worauf weist das volumetrische Kapnogramm hin?



- a) **Pneumothorax**
- b) **ARDS**
- c) **Hämorrhagischer Schock**

Lösungen

Patient A a) Lungenembolie

Patient B b) ARDS

Patient C c) Gravierende COPD

Patient D c) Hämorrhagischer Schock

Anhang

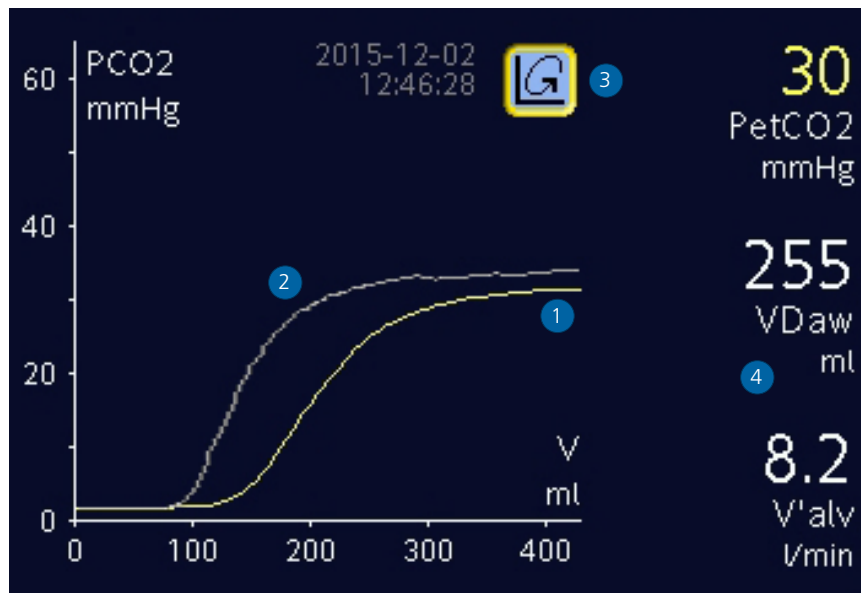
Volumetrische Kapnographie bei Beatmungsgeräten von Hamilton Medical

Alle Beatmungsgeräte von Hamilton Medical bieten die volumetrische Kapnographie als integrierte Standardausstattung oder optionale Funktion an.

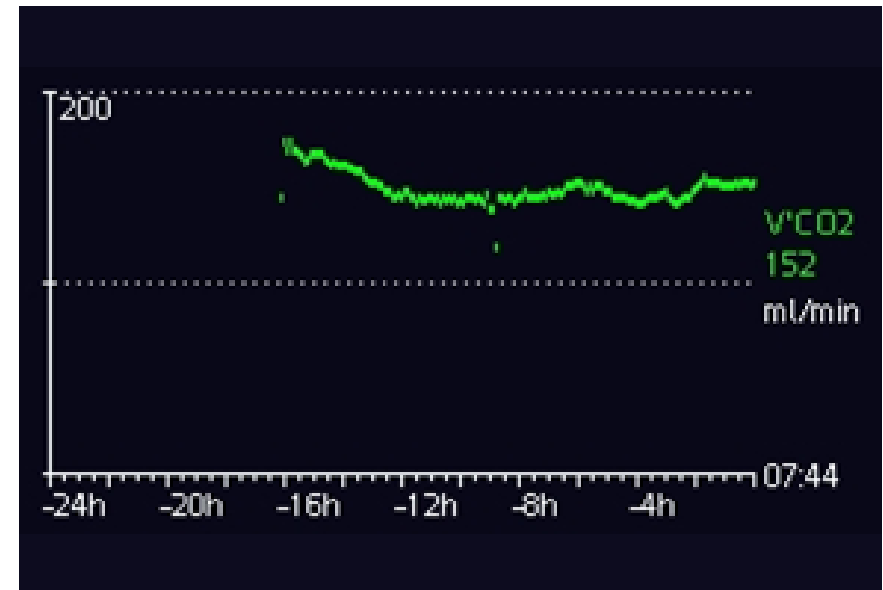
Die CO_2 -Messung wird mit einem CAPNOSTAT® 5 Hauptstrom- CO_2 -Sensor an der Atemwegsöffnung des Patienten vorgenommen. Der CAPNOSTAT® 5 Sensor ermöglicht modernste Messungen des endtidalen Kohlendioxidgehalts (PetCO_2) und der Atemfrequenz. Darüber hinaus bietet er für alle Atemfrequenzen bis zu 150 Atemhüben pro Minute ein übersichtliches, genaues Kapnogramm.



Loops und Trends auf dem Bildschirm



- 1 Aktueller Loop für das volumetrische Kapnogramm
- 2 Referenz-Loop für das volumetrische Kapnogramm
- 3 Schaltfläche „Referenz-Loop“ mit Datum und Uhrzeit des Referenz-Loops
- 4 Die wichtigsten CO₂-Werte für jeden Atemhub

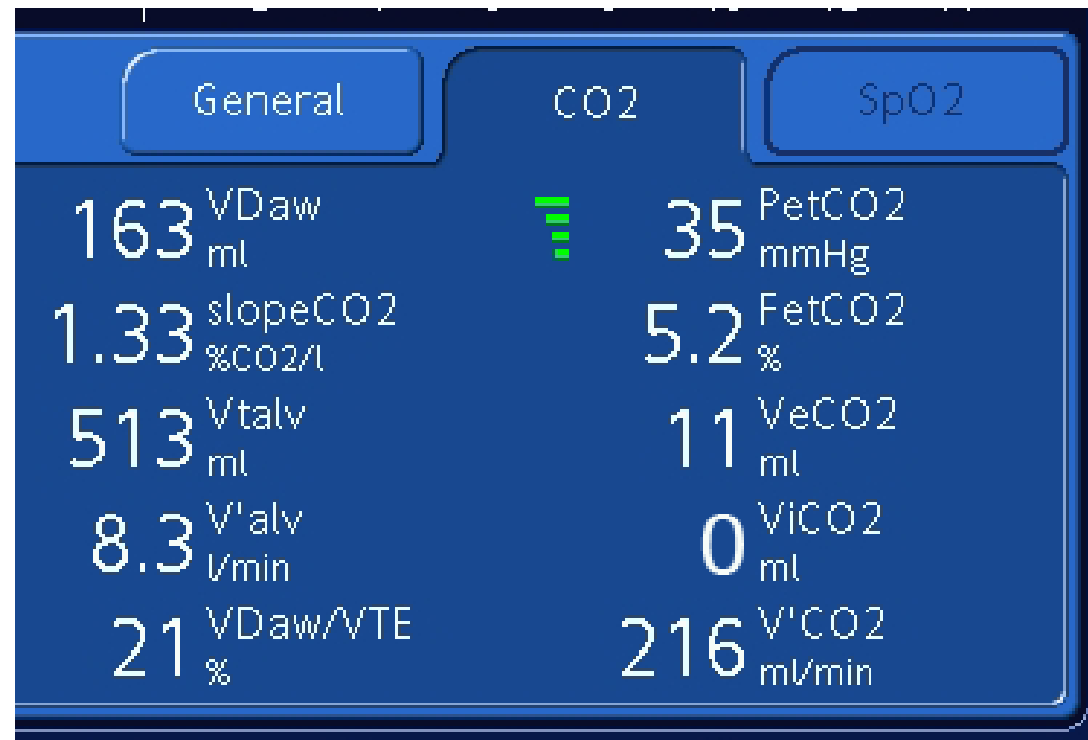


Ein 72-Stunden-Trend (bzw. 96 Stunden beim HAMILTON-S1/G5) ist für folgende Parameter verfügbar:

- PetCO₂
- V'CO₂
- FetCO₂
- VeCO₂
- ViCO₂
- V_{ds}
- VD_{ds}/VTE
- SlopeCO₂

Volumetrische Kapnographie im Monitoring

Zur Erleichterung Ihrer Arbeit bieten die Beatmungsgeräte von Hamilton Medical im Monitoring-Fenster einen Überblick über alle wichtigen CO₂-bezogenen Werte.



Formeln für die Berechnung

VT_{alv} Alveoläres Tidalvolumen

$$VT_{alv} = Vt - V_{ds}$$

VT_{alv}/min Alveoläres Minutenvolumen

$$VT_{alv}/min = AF * VT_{alv}$$

VCO_2 Volumen des eliminierten CO_2 /Atemhub

$$VCO_2 = VeCO_2 - ViCO_2$$

$V'CO_2$ Volumen des eliminierten CO_2 /Minute

$$VCO_2 * \text{Anzahl der Atemhübe/Minute}$$

$FetCO_2$ Fraktionale CO_2 -Konzentration im ausgeatmeten Gas

$$FetCO_2 = V'CO_2 / \text{MinVol}$$

$PetCO_2$ CO_2 -Partialdruck im ausgeatmeten Gas

$$PetCO_2 = FetCO_2 * (Pb - PH_2O)$$

V_{ds}/VTE Anatomische Totraumfraktion

$$V_{ds}/VTE = 1 - (PetCO_2 / PaCO_2)$$

Beispiele für Normalwerte bei beatmeten Patienten¹

Beschreibung	Einheit ²	Normal	Referenzliteratur
V_{ds}	ml	2,2 ml/kg IBW	Radford 1954
SlopeCO ₂	%CO ₂ /l	$31324 * V_t - 1,535$	Aström 2000
$V'CO_2$	ml/min	2,6 bis 2,9 ml/min/kg	Weissmann 1986/ Wolff 1986
FetCO ₂	%	5,1 % bis 6,1 %	Wolff 1986
VTalv/min	l/min	0,052 bis 0,070 l/min/kg	$(V'CO_2 / FetCO_2)$

1. Diese Werte dienen nur zur Veranschaulichung und ersetzen nicht die Behandlung durch den Arzt.
2. Große Gasvolumina wie Minutenvolumina und Tidalvolumina werden in der Regel unter BTPS-Bedingungen gemessen. Spezifische Gasvolumina werden in STPD ausgedrückt. Die Konvertierungsfaktoren können in Physikbüchern nachgeschlagen werden.

Referenzliteratur von A bis Z

- Anderson** JT, Owings JT, Goodnight JE. Bedside noninvasive detection of acute pulmonary embolism in critically ill surgical patients. Arch Surg 1999;134(8):869–874; discussion 874–875.
- Aström** E, Niklason L, Drefeldt B, Bajc M, Jonson B. Partitioning of dead space – a method and reference values in the awake human. Eur Respir J. 2000 Oct; 16(4):659-664.
- Blanch** L, Romero PV, Lucangelo U. Volumetric capnography in the mechanically ventilated patient. Minerva Anesthesiol. 2006 Jun;72(6):577-85.
- Erikson**, L, Wollmer, P, Olsson, CG, et al. Diagnosis of pulmonary embolism based upon alveolar dead space analysis. Chest1989;96,357-362.
- Fletcher** R. The single breath test for carbon dioxide [dissertation]. Lund, Sweden: University of Lund, 1980. 2nd edition revised and reprinted, Solna, Sweden: Siemens Elema, 1986.
- Kallet** RH, Daniel BM, Garcia O, Matthay MA. Accuracy of physiologic dead space measurements in patients with acute respiratory distress syndrome using volumetric capnography: comparison with the metabolic monitor method. Respir Care. 2005 Apr;50(4):462-7.
- Kiiski**, Ritva, and Jukka Takala. „Hypermetabolism and efficiency of CO2 removal in acute respiratory failure.“ CHEST Journal 105.4 (1994): 1198-1203.
- Kumar** AY, Bhavani-Shankar K, Moseley HS, Delph Y. Inspiratory valve malfunction in a circle system: pitfalls in capnography. Can J Anaesth 1992;39(9):997–999.
- Nuckton** TJ, Alonso JA, Kallet RH, Daniel BM, Pittet JF, Eisner MD, Matthay MA. Pulmonary dead-space fraction as a risk factor for death in the acute respiratory distress syndrome. N Engl J Med. 2002 Apr 25; 346(17):1281-1286.
- Olsson** K, Jonson B, Olsson CG, Wollmer P. Diagnosis of pulmonary embolism by measurement of alveolar dead space. J Intern Med. 1998 Sep;244(3):199-207.
- Pyles** ST, Berman LS, Modell JH. Expiratory valve dysfunction in a semiclosed circle anesthesia circuit: verification by analysis of carbon dioxide waveform. Anesth Analg 1984;63(5):536–537.
- Radford** EP. Ventilation standards for use in artificial respiration. N Engl J Med 1954; 251:877-883.
- Rodger** MA, Jones G, Rasuli P, Raymond F, Djunaedi H, Bredeson CN, Wells PS. Steady-state end-tidal alveolar dead space fraction and D-dimer: bedside tests to exclude pulmonary embolism. Chest 2001;120(1):115–119.
- Yaron** M, Padyk P, Hutsinpiiler M, Cairns CB. Utility of the expiratory capnogram in the assessment of bronchospasm. Ann Emerg Med. 1996 Oct;28(4):403-7.
- Weissman** C, Kemper M, Elwyn DH, Askanazi J, Hyman AI, Kinney JM. The energy expenditure of the mechanically ventilated critically ill patient. An analysis. Chest. 1986 Feb; 89(2):254-259.
- Wolff** G, Brunner JX, Grädel E. Gas exchange during mechanical ventilation and spontaneous breathing. Intermittent mandatory ventilation after open heart surgery. Chest. 1986 Jul; 90(1):11-17
- Wolff** G, Brunner JX, Weibel W, et al. Anatomical and series dead space volume: concept and measurement in clinical practice. Appl Cardiopul Pathophysiol 1989; 2:299-307.

Glossar von A bis Z

f	Frequenz bzw. Atemfrequenz = Anzahl der Atemhübe pro Minute
PaCO ₂	Kohlendioxidpartialdruck im arteriellen Blut; arterielle Kohlendioxidkonzentration oder -spannung Wird entweder in mmHg oder in kPa angegeben
PCO ₂	Kohlendioxidpartialdruck
PetCO ₂	Endtidaler Kohlendioxidgehalt
SBCO ₂	Kohlendioxidgehalt in einem Atemhub
VTalv/min	Alveoläres Minutenvolumen Der Anteil des Minutenvolumens, der tatsächlich am Gasaustausch beteiligt ist
V'CO ₂	CO ₂ -Volumen, das pro Minute eliminiert wird
VD	Physiologischer Totraum
V _{ds}	Anatomische Totraumbeatmung
V _{ds} /VTE	Verhältnis des anatomischen Totraums zum Tidalvolumen
Ve	Minutenvolumen = Tidalvolumen mal Atemfrequenz ($V_t \times f = V_e$)
VeCO ₂	Ausgeatmetes CO ₂ -Volumen
ViCO ₂	Eingeatmetes CO ₂ -Volumen
VTE	Das Tidalvolumen ist das Lungenvolumen, welches das normale Gasvolumen darstellt, das zwischen der Inspiration und der Expiration verdrängt wird

Impressum

Herausgegeben von:	Hamilton Medical
Verfasser:	Karjaghli Munir Matthias Himmelstoss
Veröffentlichungsdatum:	März 2016
Ausgabe:	2







Weitere Informationen:

www.hamilton-medical.com/volumetric-capnography



Hersteller:

Hamilton Medical AG

Via Crusch 8, 7402 Bonaduz, Switzerland

☎ +41 58 610 10 20

info@hamilton-medical.com

www.hamilton-medical.com

ELO20170204N.02 Die abgebildeten Produkte sind nicht frei verkäuflich. Die bereitgestellten Informationen sind ausschließlich für medizinisches Fachpersonal vorgesehen. Lesen Sie stets die Angaben auf den Etiketten und beachten Sie die Gebrauchsanweisung der Produkte. Änderungen der technischen Daten vorbehalten. Einige Funktionen sind als Optionen verfügbar. Nicht alle Funktionen sind für alle Märkte verfügbar. Alle Abbildungen dienen nur zur Veranschaulichung und stellen das Produkt und dessen Verwendung möglicherweise nicht exakt dar. Informationen zu allen von der Hamilton Medical AG verwendeten eigenen Warenzeichen (®) und Warenzeichen von Dritten finden Sie unter: www.hamilton-medical.com/trademarks. © 2023 Hamilton Medical AG. Alle Rechte vorbehalten.