



Maschinelle Beatmung

Beatmungsformen -
Beatmungsmuster



W. Oczenski

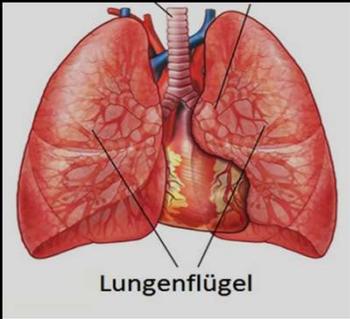
Abteilung für Anästhesie und
Intensivmedizin; Klinik Floridsdorf

ANÄSTHESIE FORUM

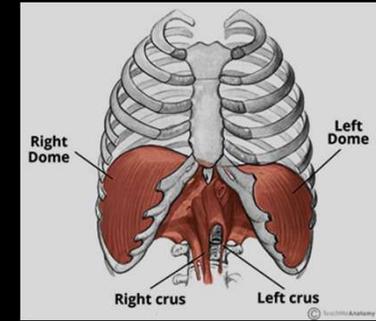


ALPBACH

REPETITORIUM



Akute Respiratorische Insuffizienz (ARI)



Hypoxämisches ARI
(Parenchymversagen)

↔
Störung

Hyperkapnische ARI
(Atempumpversagen)

Respiratorische
Partialinsuffizienz

$\text{PaO}_2 \downarrow$ $\text{PaCO}_2 \downarrow$

Blutgase

Respiratorische
Globalinsuffizienz

$\text{PaCO}_2 \uparrow$ $\text{PaO}_2 \downarrow$

Oxygenation \uparrow

O₂-Gabe, HFOT/CPAP
Beatmung
(NIV, IV)

*Primäre
Therapie*

Ventilation \uparrow

Beatmung
(NIV, IV)

Beatmungsform (Atemhilfe)

- beschreibt die **Interaktion** zwischen Patient und Respiратор
- den Anteil der **Atemarbeit**, den der Patient bzw. der Respiратор leistet → **kontrolliert vs. augmentiert**
- die **Freiheitsgrade** (Druck oder Volumen) während der Beatmung

Atemhilfen

Kontrolliert

Atemarbeit übernimmt zur Gänze der Respiator

Respiator fungiert als Ersatz für die Atemmuskulatur

VCV
PCV

Augmentiert

Atemarbeit übernimmt z.T. der Pat., z.T der Respiator

Respiator fungiert als zusätzlicher Atemmuskel

BIPAP/APRV
PSV/ASB
PPS/PAV
NAVA

Spontanatmung

Atemarbeit übernimmt fast zur Gänze der Patient

Keine Druckunterstützung vom Respiator

CPAP

Beatmungsmuster

- beschreibt den zeitlichen Verlauf von *Druck*, *Volumen* und *Flow* und damit die intrapulmonale Gasverteilung während eines *Atemzyklus*.

wird definiert durch die *Einstellgrößen*

- *Hubvolumen* bzw. *Inspirationsdruck*
- *Frequenz*
- *PEEP*
- *I:E-Verhältnis*
- *FiO₂*

Einstellgrößen am Respirator

Ventilationsparameter

PaCO₂

VT (VCV)

P_{insp} (PCV)

Frequenz (f)

Oxygenationsparameter

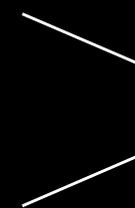
PaO₂

PEEP

I : E

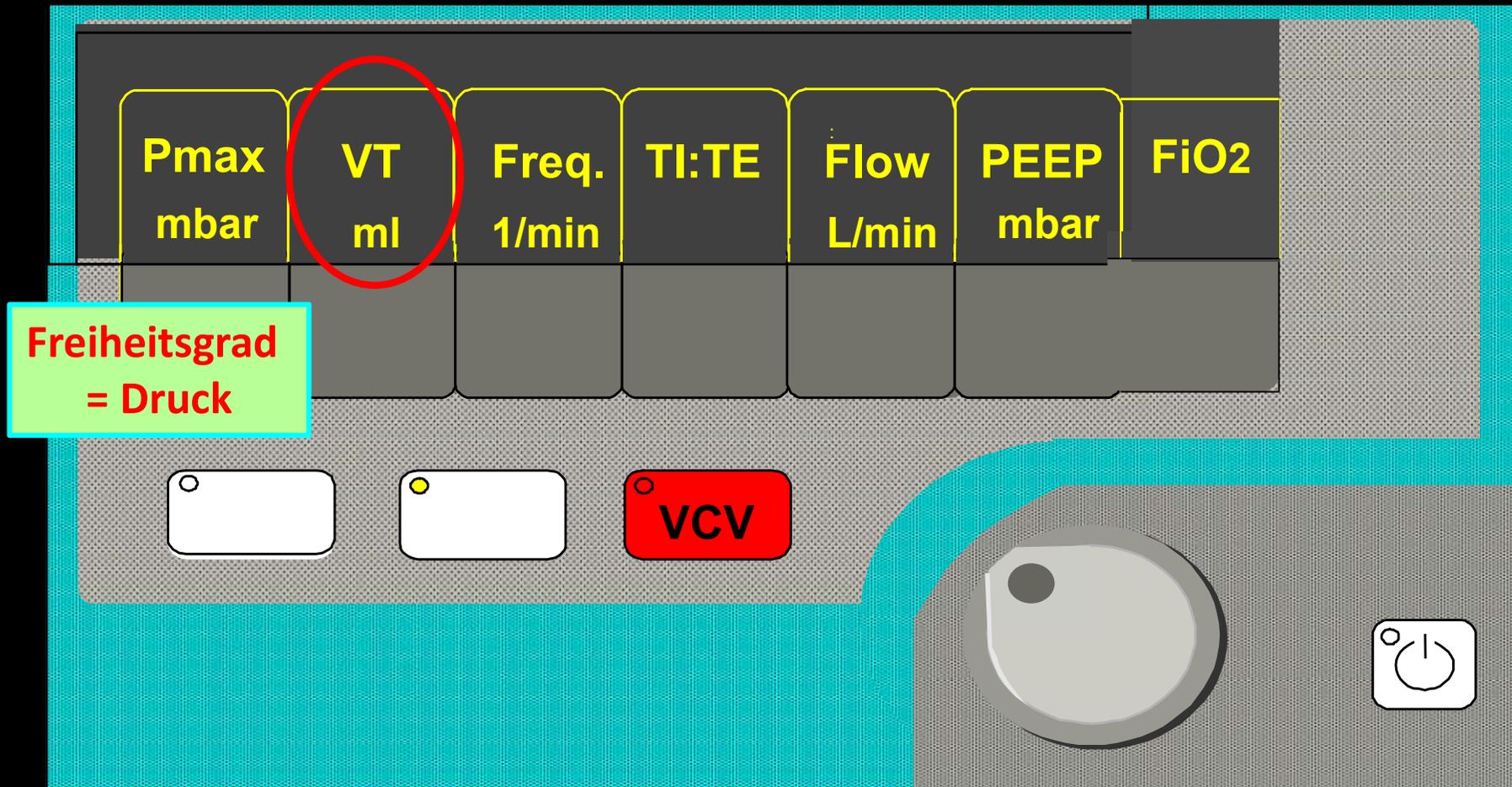
FiO₂

MAP



Volume Controlled Ventilation (VCV)

Einstellgrößen am Respirator



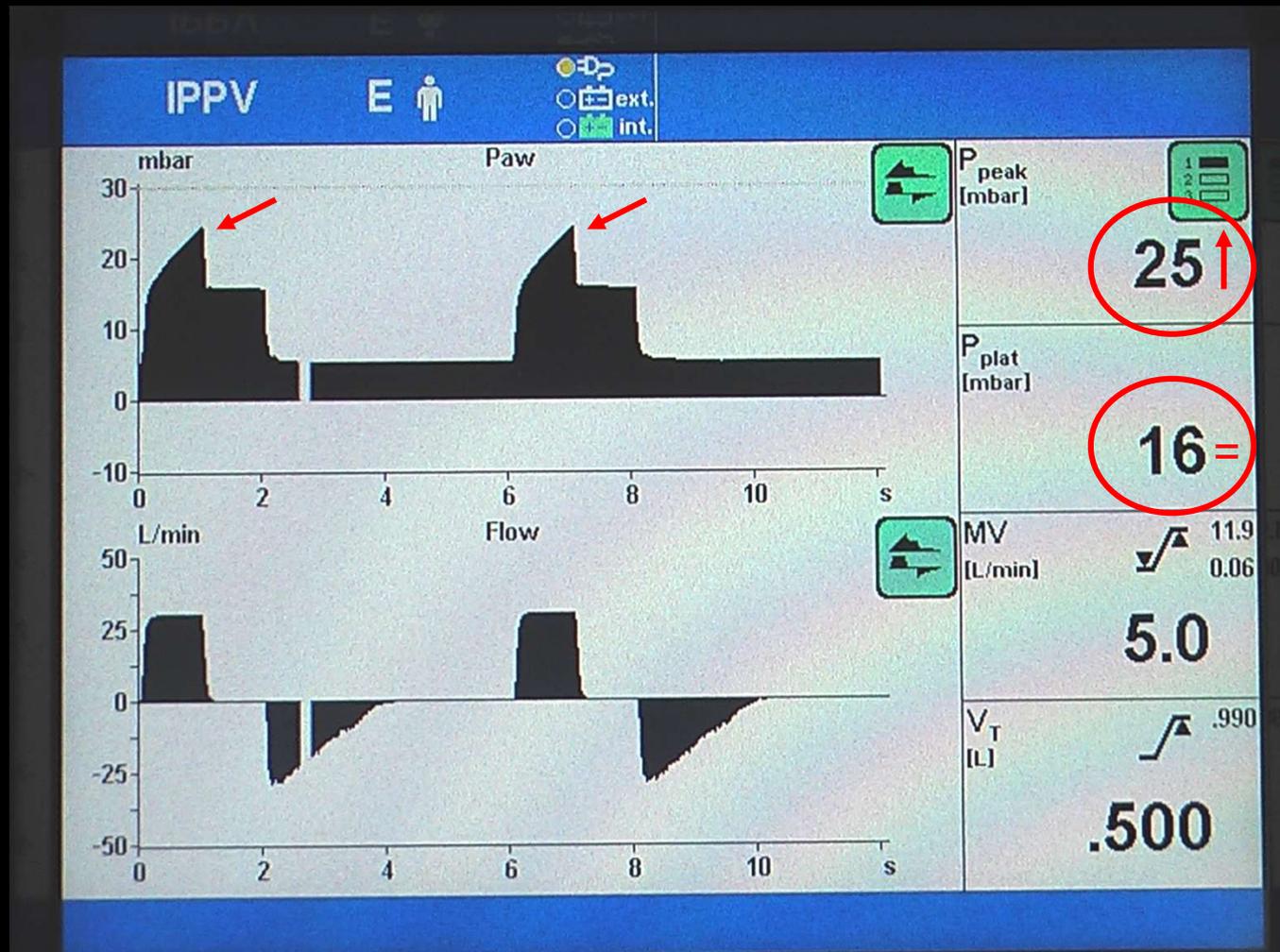
Volume Controlled Ventilation (VCV)

Initiale Respiratoreinstellung:

- **Atemhubvolumen:** 6-8 ml/kgKG
- **Atemfrequenz:** 10-15/min (nach PaCO₂)
- **Inspiratorischer Flow:** 30-40 L/min
- **PEEP:** 5-8 mbar
- **I : E - Verhältnis** 1 : 2
- **FiO₂:** 40-50% bzw. nach PaO₂/SaO₂
- **Obere Druckbegrenzung:** 30-35 mbar

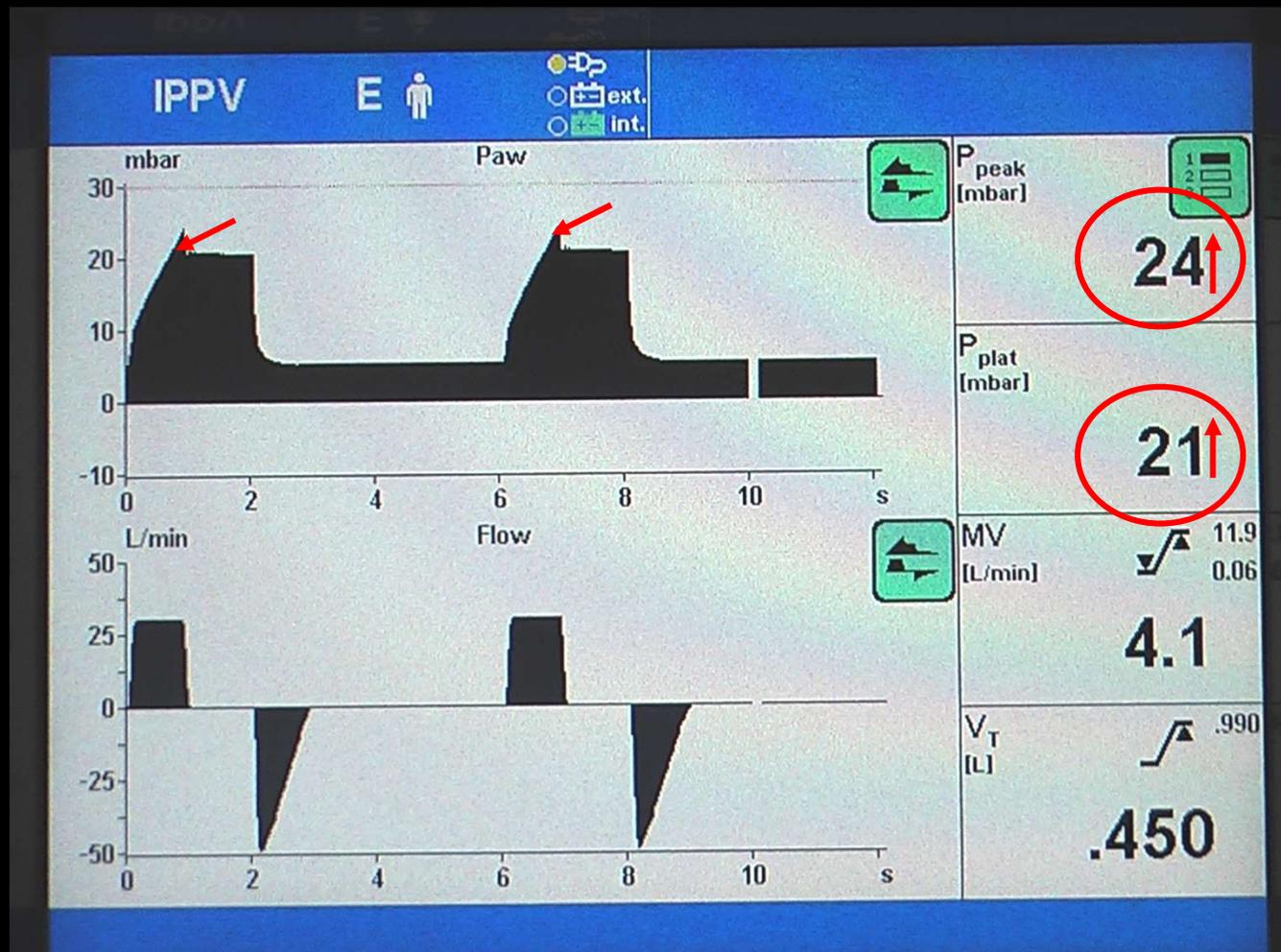
Druck-Zeit-Diagramm und Flow-Zeit-Diagramm unter VCV

Erhöhung der Resistance des resp. Systems



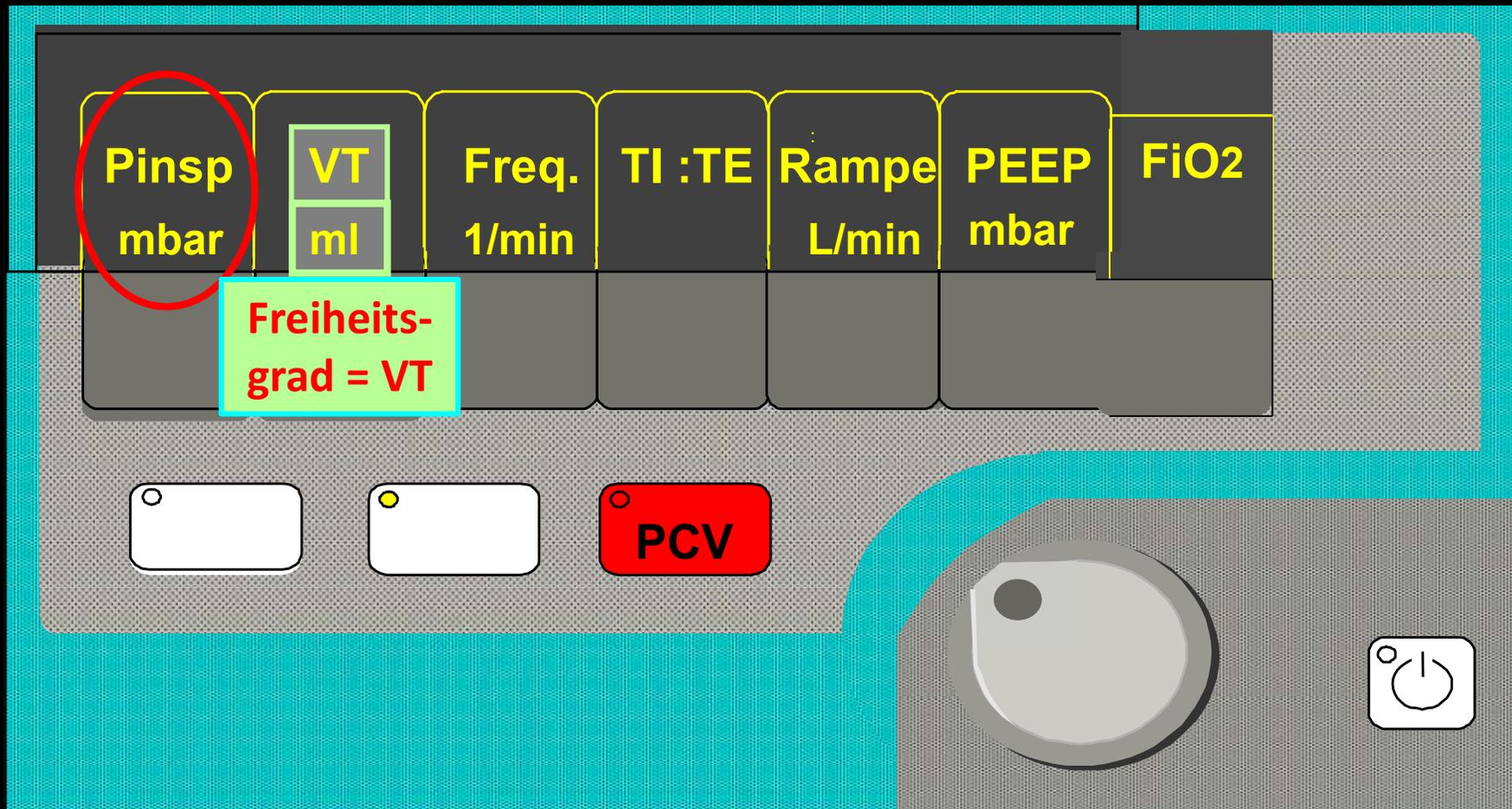
Druck-Zeit-Diagramm und Flow-Zeit-Diagramm unter VCV

Erniedrigung der Compliance des resp. Systems



Pressure Controlled Ventilation (PCV)

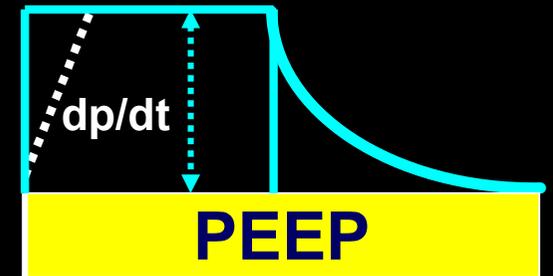
Einstellgrößen am Respirator



Pressure Controlled Ventilation (PCV)

Grundeinstellung des Respirators:

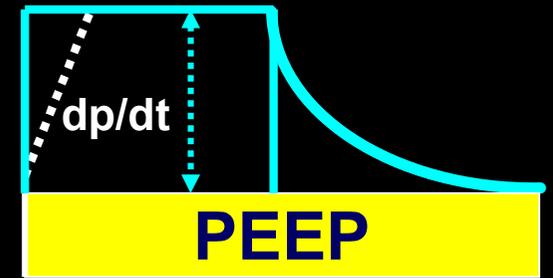
- **Inspirationsdruck:** 10-12 mbar *über PEEP*
- **Tidalvolumen (Freiheitsgrad):** 6-8 ml/kg
- **PEEP:** 5-8 mbar
- **Druckanstieg (“Rampe”)** 0,2 sec
- **Atemfrequenz:** 10-15/min (nach **PaCO₂**)
- **I : E - Verhältnis** 1 : 2
- **FiO₂:** 40-50 % bzw. nach **PaO₂/SaO₂**



Pressure Controlled Ventilation (PCV)

Grundeinstellung des Respirators:

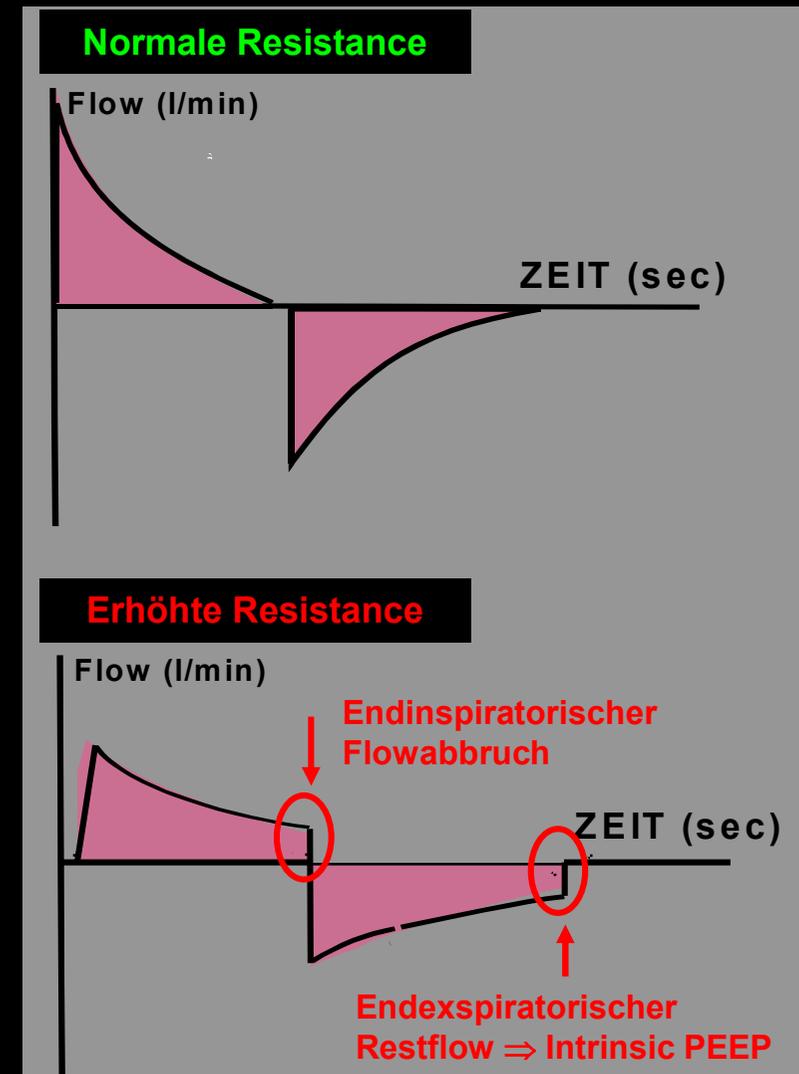
- **Inspirationsdruck:** 10-12 mbar *über PEEP*
- **Tidalvolumen (Freiheitsgrad):** 6-8 ml/kg
- **PEEP:** 5-8 mbar
- **Druckanstieg (“Rampe”)** 0,2 sec
- **Atemfrequenz:** 10-15/min (nach **PaCO₂**)
- **I : E - Verhältnis** 1 : 2
- **FiO₂:** 40-50 % bzw. nach **PaO₂/SaO₂**



Druckkontrollierte Beatmung (PCV/BIPAP)

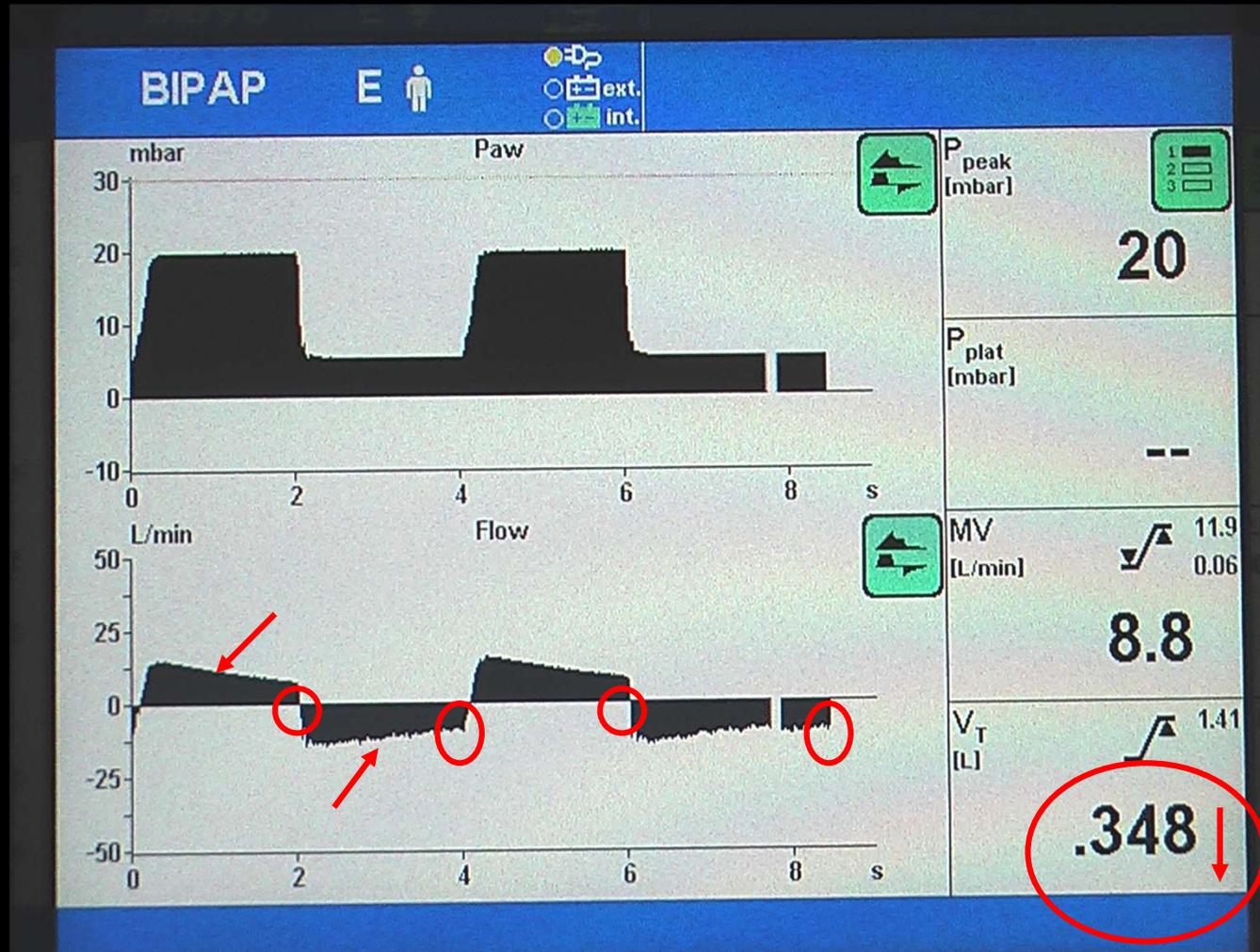
Flow-Zeit-Diagramm bei hoher Resistance respiratorischen Systems

- Abnahme des insp. und exp. Spitzenflows
- Flach verlaufende insp. und exp. Flowkurven
- Endinspiratorischer Flowabbruch
Endexpiratorischer Restflow
⇒ **Intrinsischer PEEP**
- **Große Zeitkonstante τ** ⇒ langsame Füllung und Entleerung der Lungenkompartimente



Flow-Zeit-Diagramm unter PCV/BIPAP

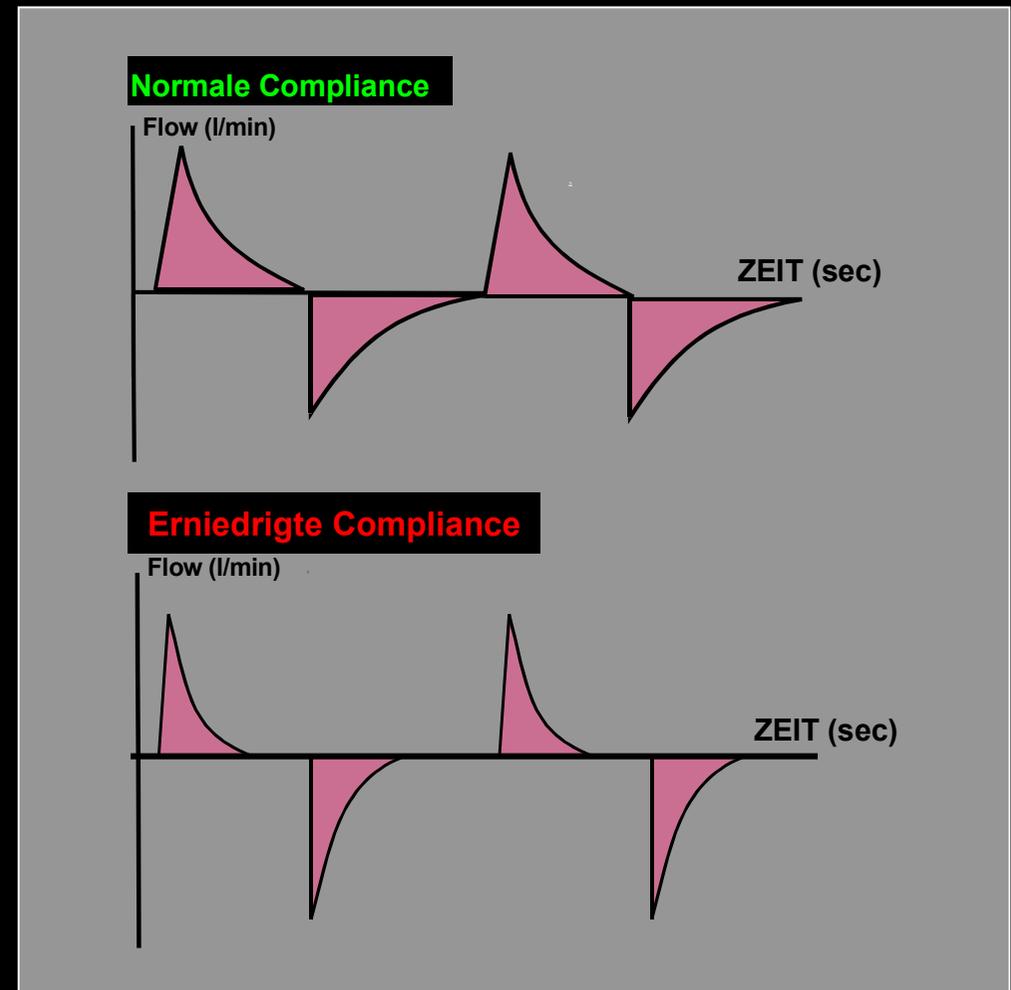
Akute Obstruktion im respiratorischen Systems



Druckkontrollierte Beatmung (PCV/BIPAP)

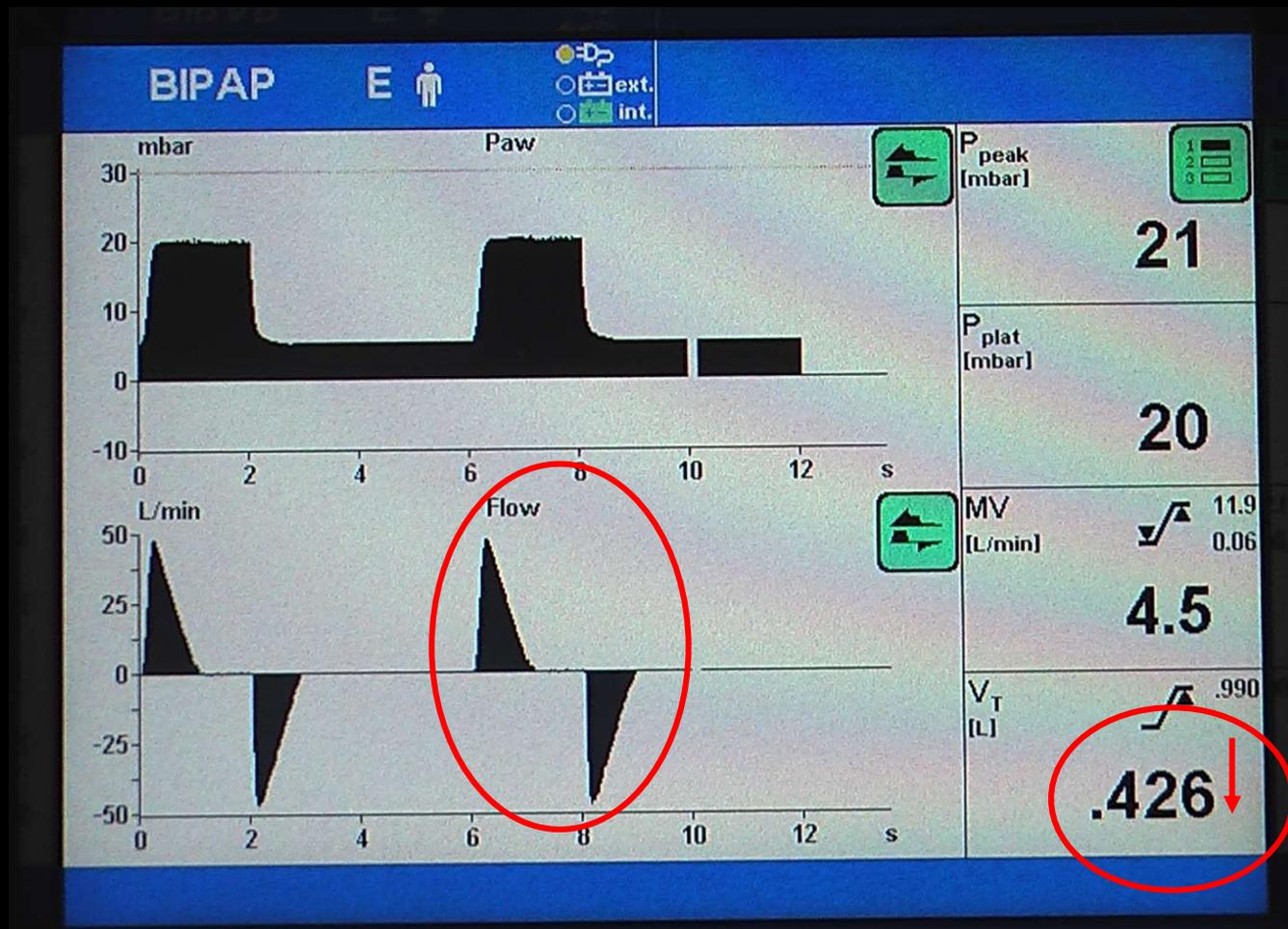
Flow-Zeit-Diagramm bei niedriger Compliance respiratorischen Systems

- Steilerer Anstieg bzw. Abfall der insp. und exp. Flowkurven
⇒ dezelerierender Schenkel
- Endinsp.- und endexpiratorische Pause
- **Kleine Zeitkonstante τ** ⇒
Schnelle Füllung und Entleerung
der Lungenkompartimente



Druck-Zeit-Diagramm Flow-Zeit-Diagramm bei erniedrigter Compliance unter PCV/BIPAP

Erniedrigung der Compliance des resp. Systems



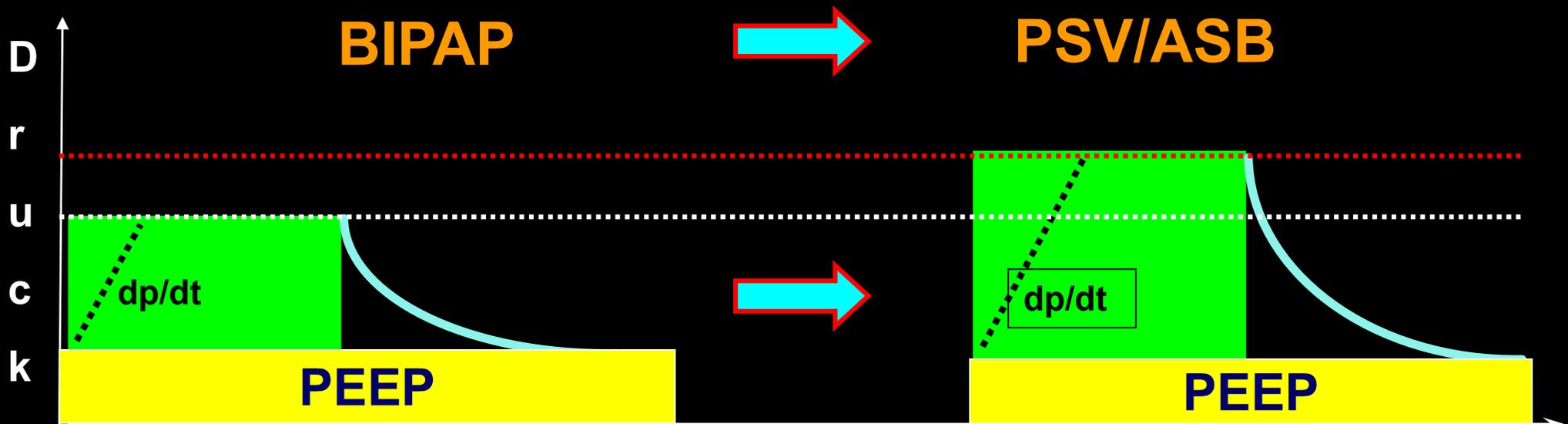
Druckgeregelte Beatmungsformen

Einstellmodalitäten:

Inspirationsdruck (P_{insp})

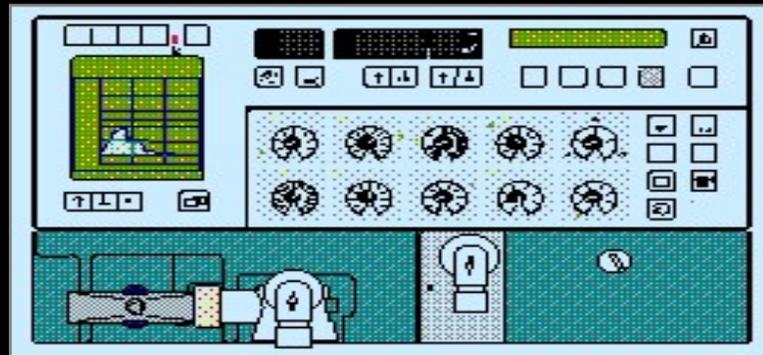
Absoluter Druck

Druck über PEEP



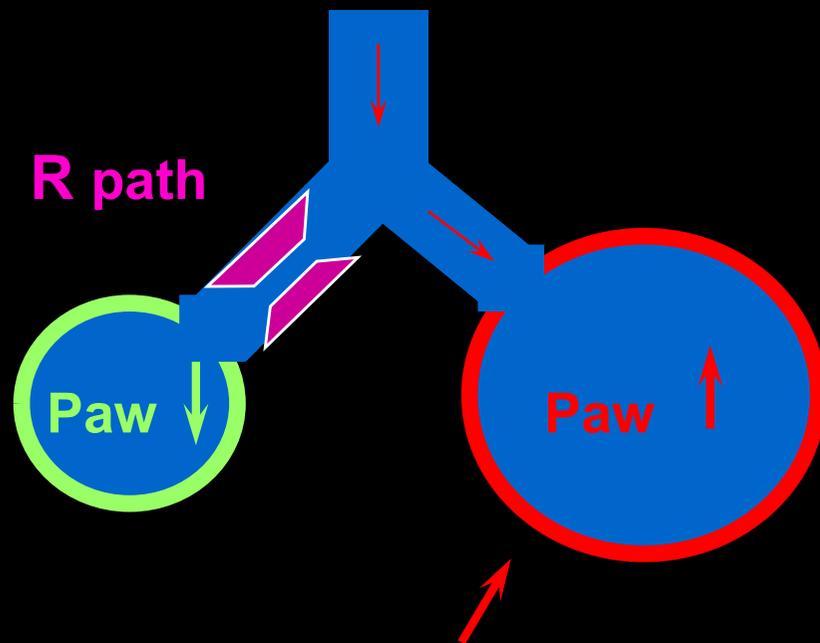
Kontrollierte Beatmung

VCV versus PCV



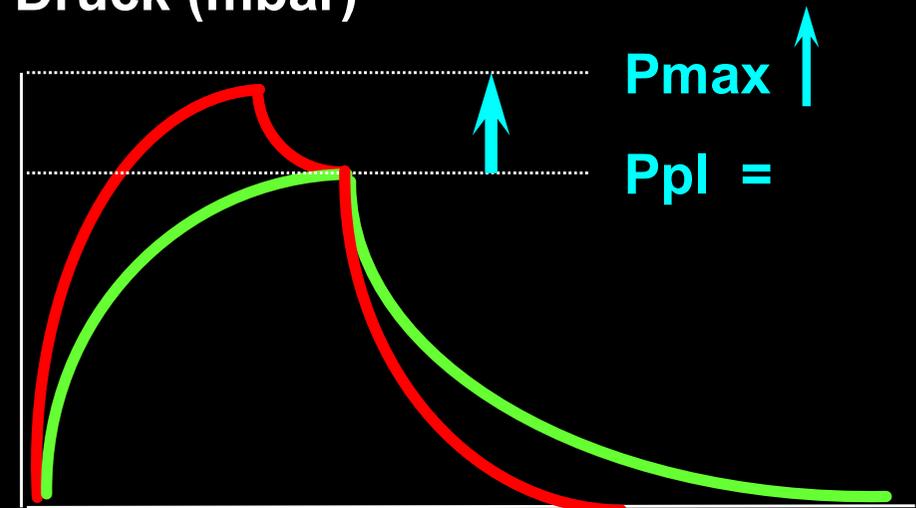
Volume Controlled vs Pressure Controlled Ventilation

2-Kompartimentmodell



Kompartiment mit normaler Zeitkonstante wird überdehnt

Druck (mbar)



VCV

Zeit (s)

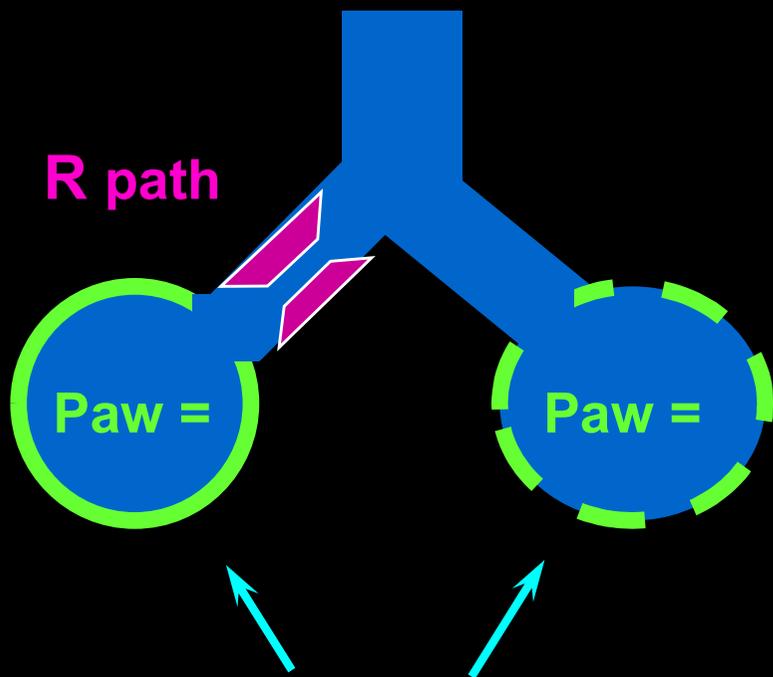
Verteilungsgestörte Lunge



inhomogene Atemgasverteilung

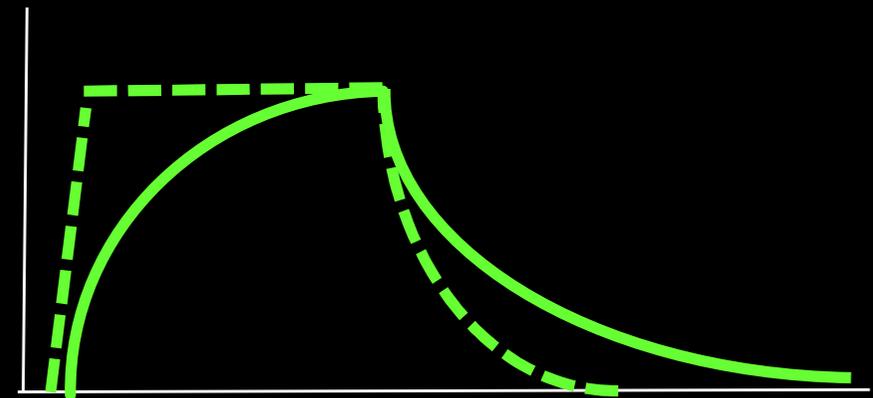
Volume Controlled vs Pressure Controlled Ventilation

2-Kompartimentmodell



Beide Kompartments werden mit gleichem Druck beatmet

Druck (mbar)



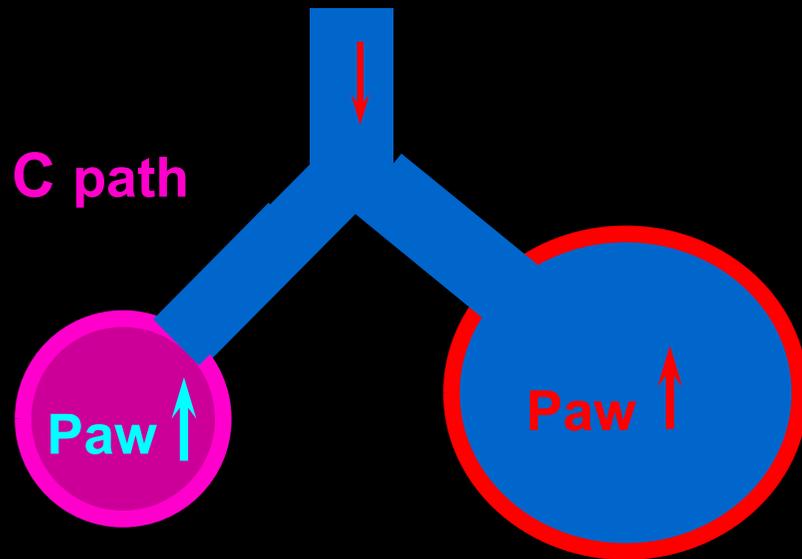
PCV

Zeit (s)

- **Homogenere Atemasverteilung**
- **Vermeidung hoher Beatmungsdrücke in gesunden Kompartimenten**
- **Höherer Mitteldruck bei niedrigerem Plateudruck**
- **Mehr Zeit für alveoläre Rekrutierung**

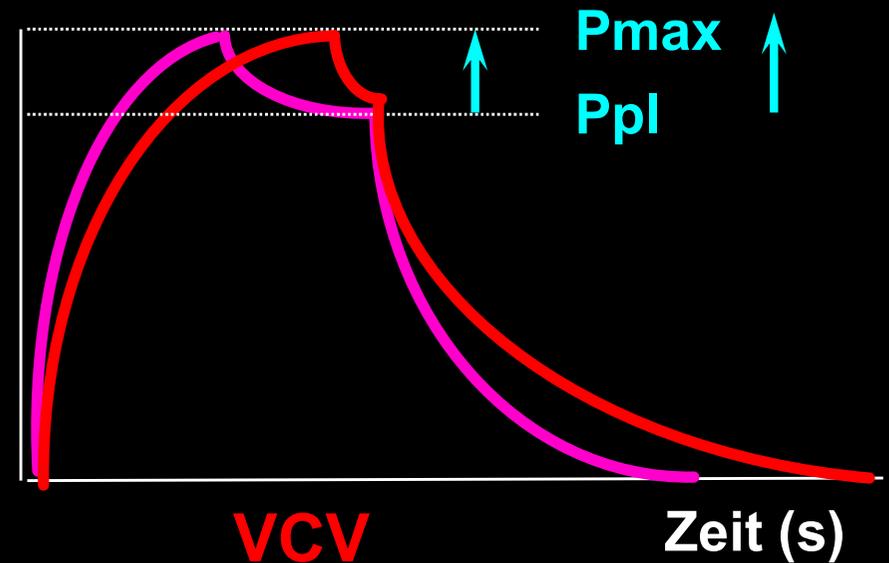
Volume Controlled vs Pressure Controlled Ventilation

2-Kompartimentmodell



Kompartiment mit normaler
Zeitkonstante wird überdehnt

Druck (mbar)



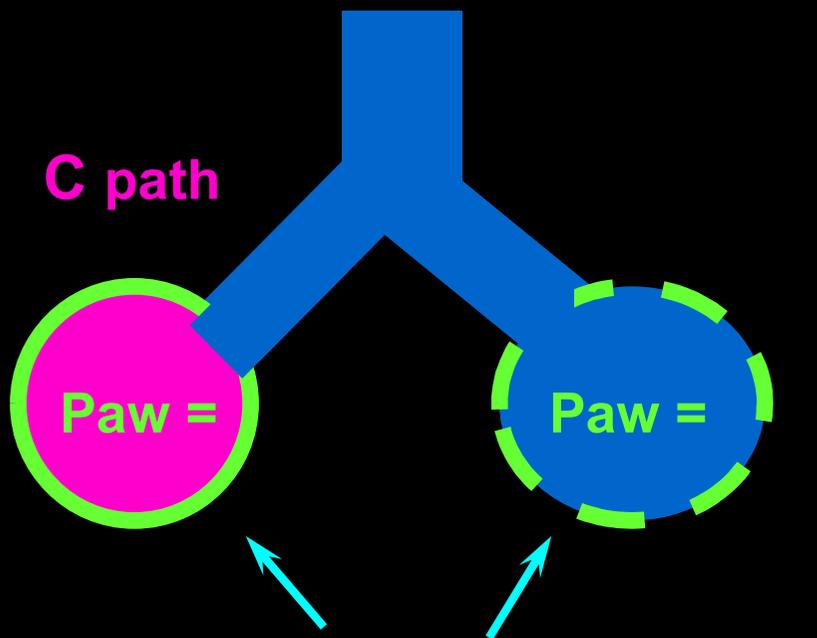
Verteilungsgestörte Lunge



inhomogene Atemgasverteilung

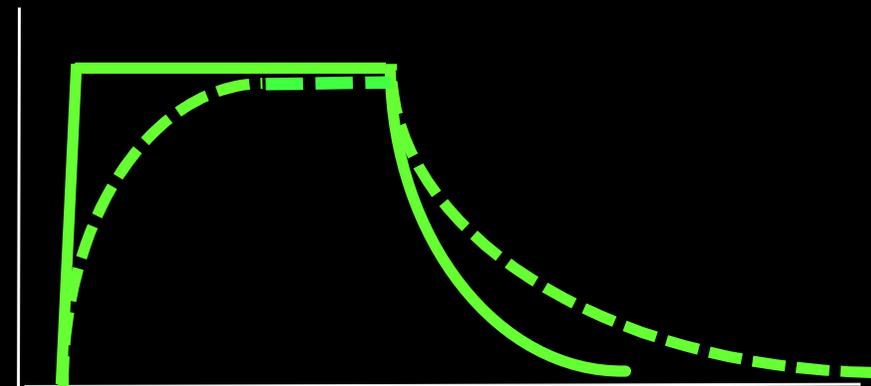
Volume Controlled vs Pressure Controlled Ventilation

2-Kompartimentmodell



Beide Kompartments werden mit gleichem Druck beatmet

Druck (mbar)



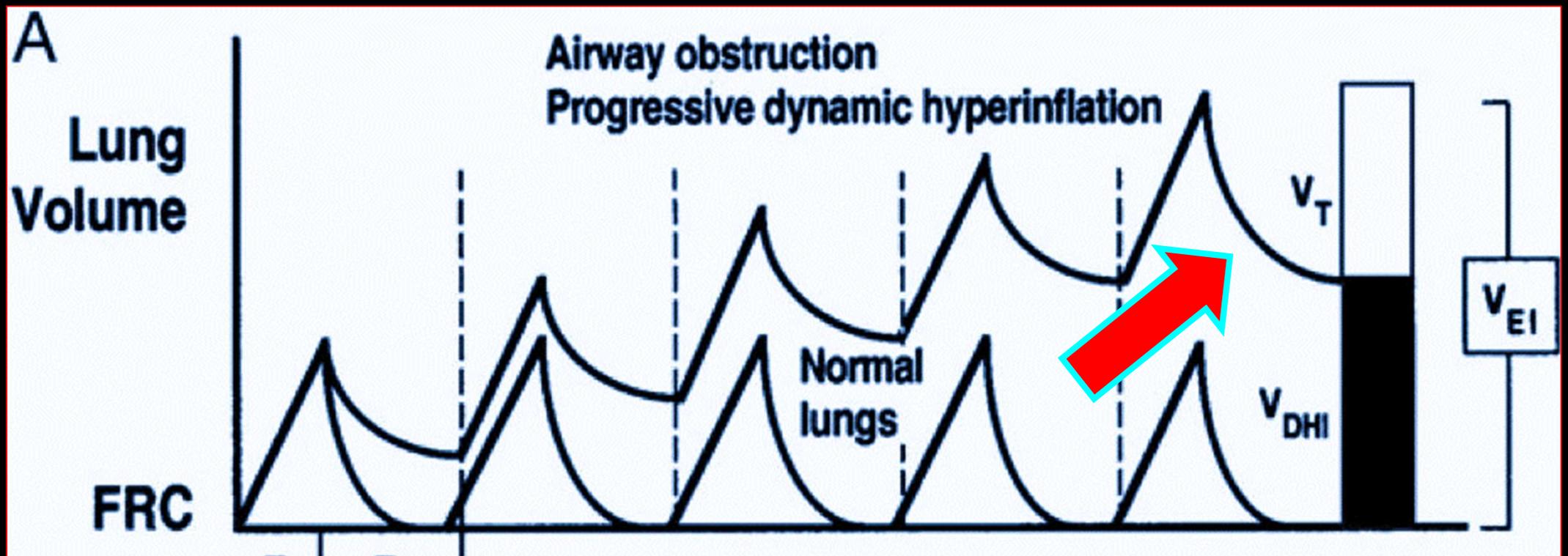
PCV

Zeit (s)

- **Homogenere Atemasverteilung**
- **Vermeidung hoher Beatmungsdrücke in gesunden Kompartimenten**
- **Höherer Mitteldruck bei niedrigerem Plateaudruck**
- **Mehr Zeit für alveoläre Rekrutierung**

Volumenkonstante Beatmung

CAVE: Aufschaukeln von PEEPi



bei Verschlechterung der Atemmechanik !!

„Kranke Lunge“

Druckkonstante Beatmung
=
Beatmungsform der Wahl:



- **Druckkontrollierte Beatmung (PCV, BIPAP)**
- **Druckunterstützte Beatmung (PSV, PPS, NAVA)**

= lungenprotektive Beatmung

Augmentierende Beatmungsformen

Definition

- Atemhilfen zur Unterstützung einer insuffizienten Spontanatmung



- Respirator übernimmt einen Teil der Atemarbeit (**“partial ventilatory support”**)

Methoden zur Unterstützung der Spontanatmung

Wahl des Beatmungsmodus

- **Augmentation des Atemzugvolumens**
„Breath to breath Support“

z.B. PSV, PPS, NAVA, (A/C-Ventilation)

Primäres Ziel:

Entlastung der **Atempumpe** \Rightarrow **hyperkapnisches Lungenversagen**

- **Augmentation des Atemminutenvolumens**

z.B. BIPAP/APRV, (SIMV)

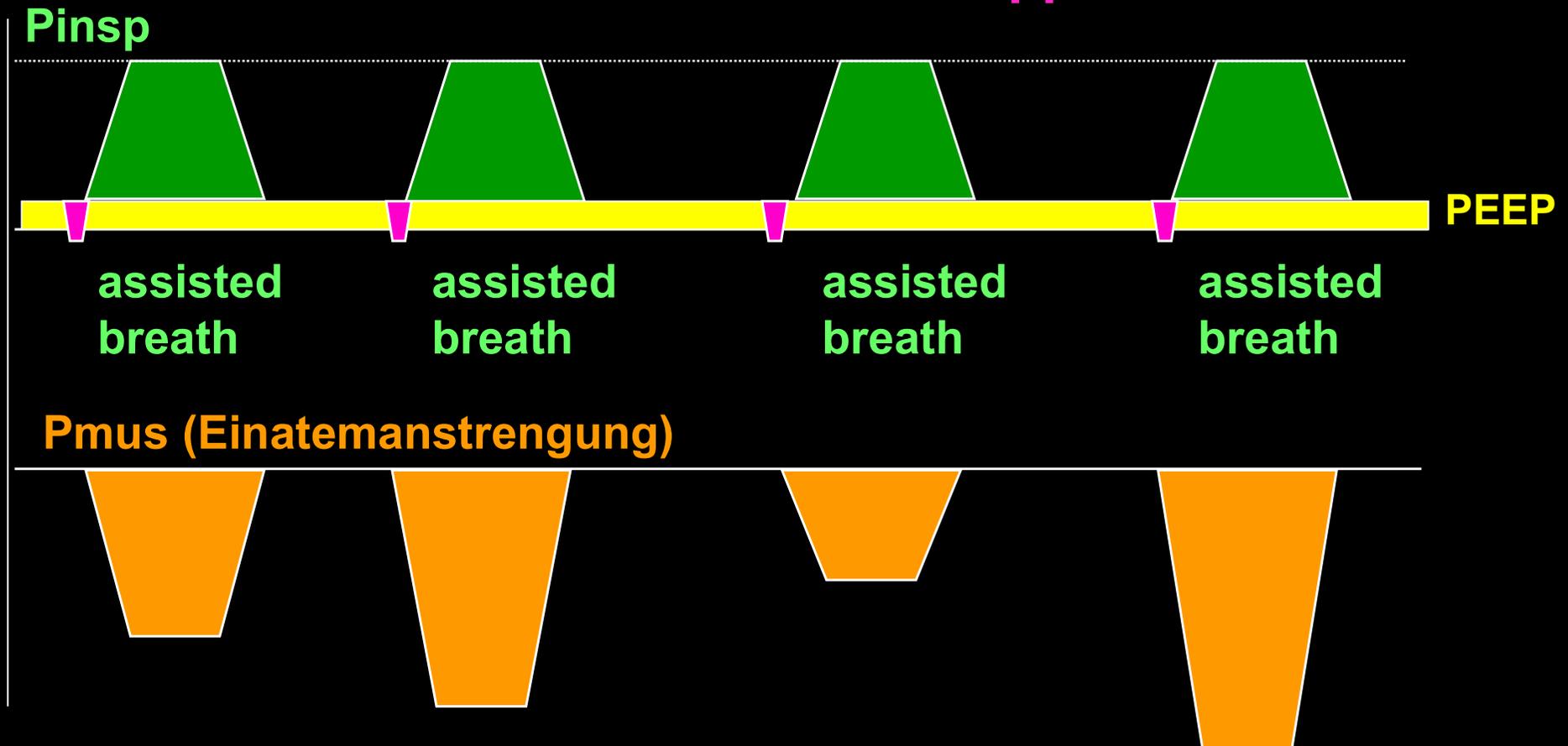
Primäres Ziel:

Verbesserung der **Oxygenierung** \Rightarrow **hypoxämisches Lungenversagen**

Pressure Support Ventilation (PSV)

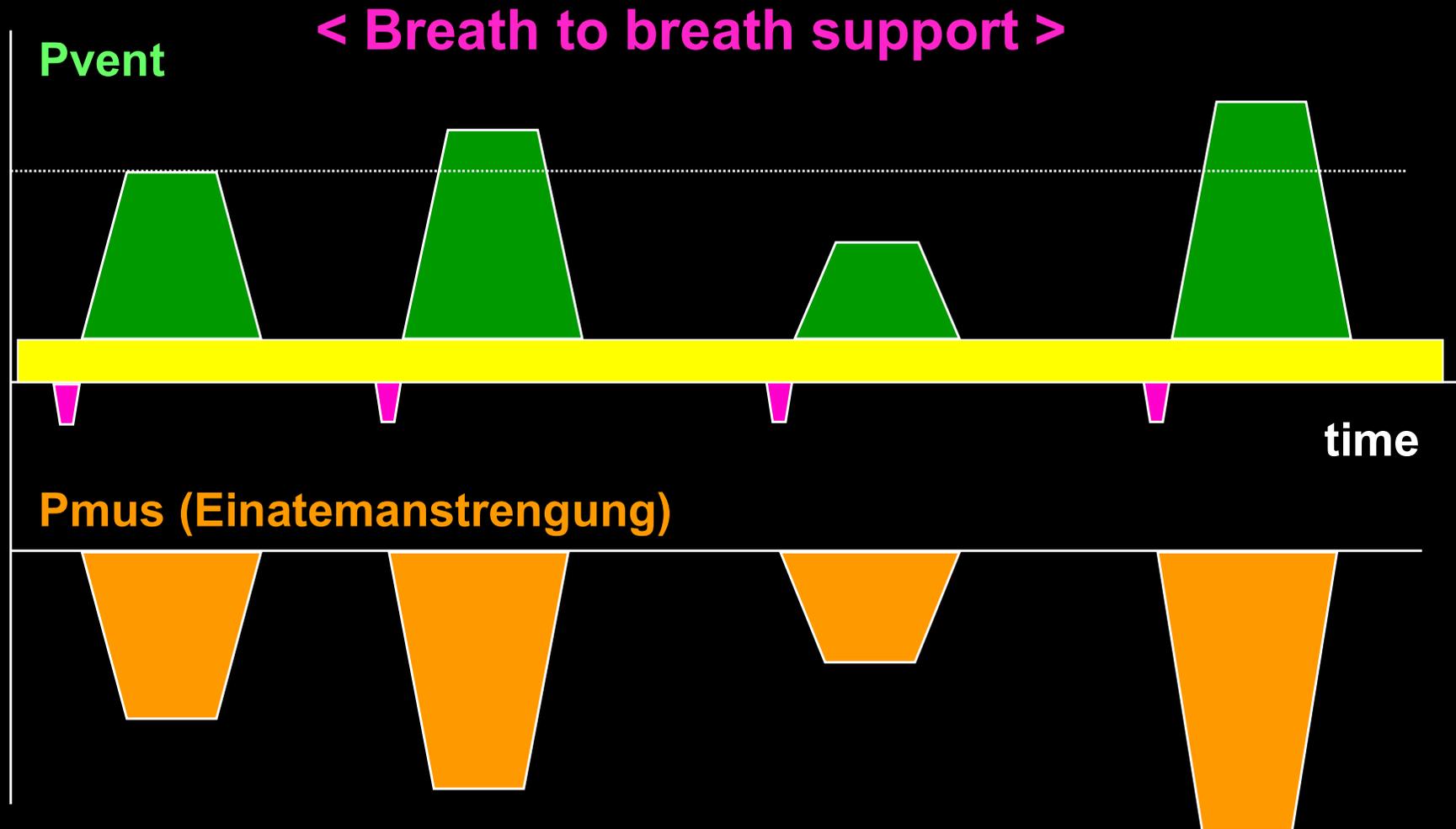
Jede Einatembemühung resultiert in einem konstanten Grad an Druckunterstützung unabhängig vom ventilatorischen Bedarf des Patienten

< Breath to breath support >



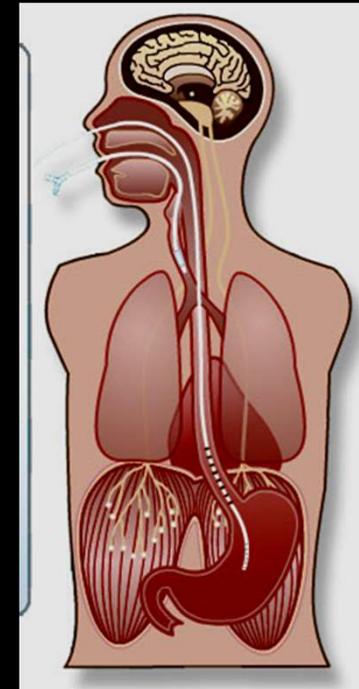
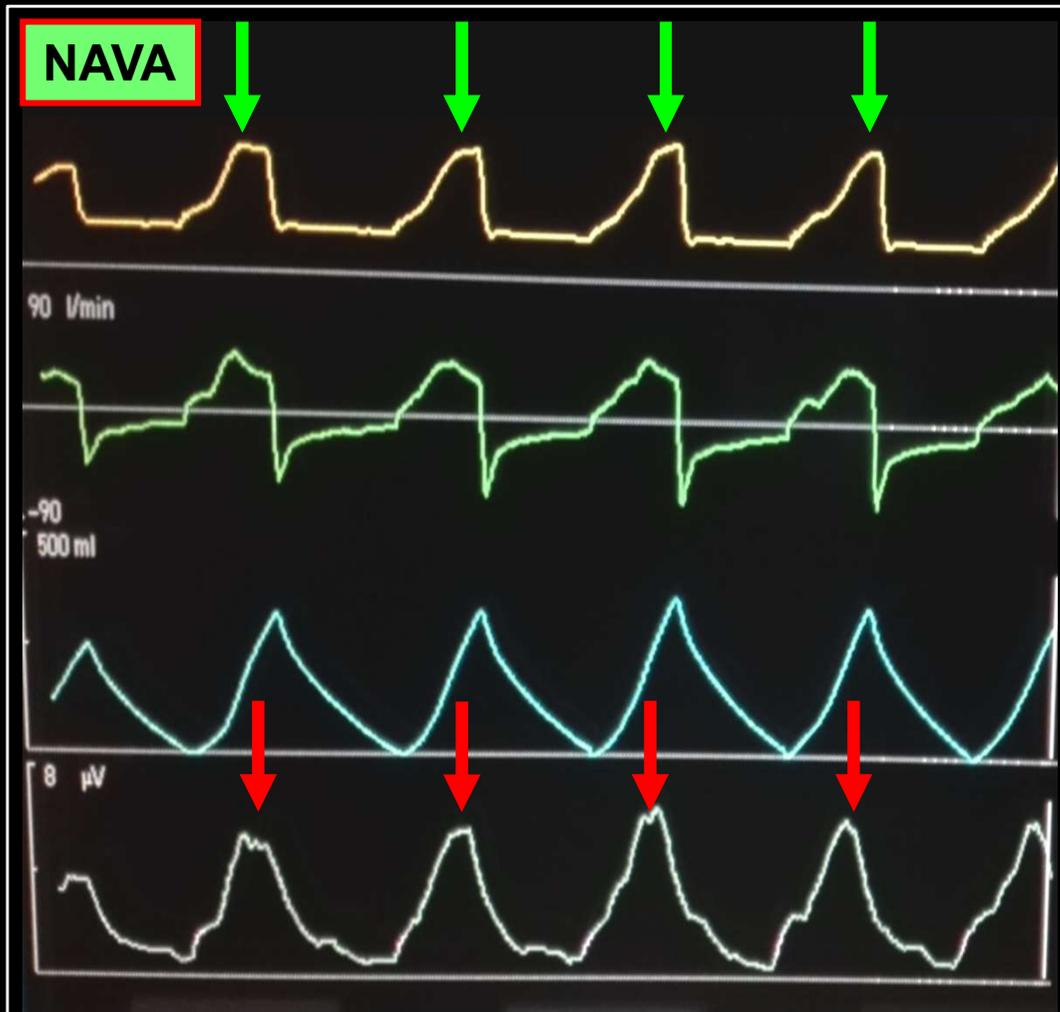
Proportionale Druckunterstützung

Der Grad der Druckunterstützung ist proportional der patienteneigenen Atemarbeit (*inspiratory effort*)



Proportionale Druckunterstützung

Neurally Adjusted Ventilatory Assist (NAVA)



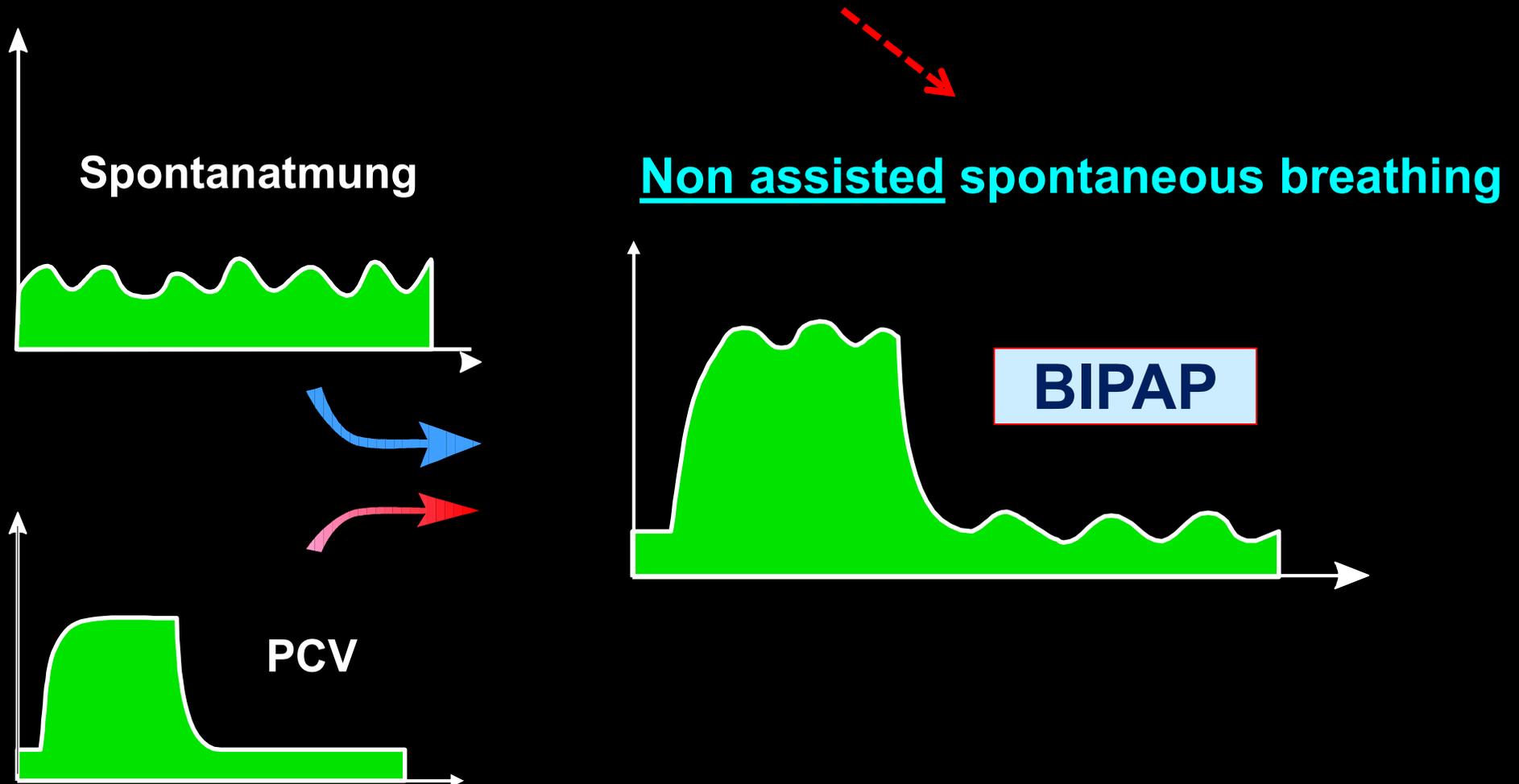
NAVA-Sonde

Modifizierte
Magensonde mit
10 Elektroden am
distalen Ende zur
Erfassung der
Zwerchfell-
Innervation

Neuronaler Trigger =
pneumatikunabhg. Trigger

Biphasic Positive Airway Pressure (BIPAP)

➔ Ermöglicht simultane (ungehinderte) Spontanatmung
= nicht augmentierte Spontanatmung



Biphasic Positive Airway Pressure (BIPAP)

Initiale Respiratoreinstellung

- Oberes Druckniveau (P_{insp}): 10-12 mbar > PEEP
- Tidalvolumen (Freiheitsgrad): 6-8 ml/kg
- Druckniveau (PEEP): 5-8 mbar
- Druckanstieg ("Rampe"): 0,2 sec
- Mandatorische Frequenz: 10-12/min (nach PaCO₂)
- Phasenzeit Thoch: 2 sec
- FiO₂: 40-50% bzw. nach PaO₂
- Triggerschwelle: 3 l/min

Biphasic Positive Airway pressure (BIPAP)

Verbesserung der Oxygenierung

- **FiO₂** ↑ (symptomatisch; “Aufsättigung”)
- **PEEP** ↑
gleichgerichtete Erhöhung mit **P_{insp}** ↑ → Δp const
- **I : E** ↑
entgegengesetzte Veränderung der Phasen-
zeiten **T_{hoch}** ↑ und **T_{niedrig}** ↓

Biphasic Positive Airway Pressure (BIPAP)

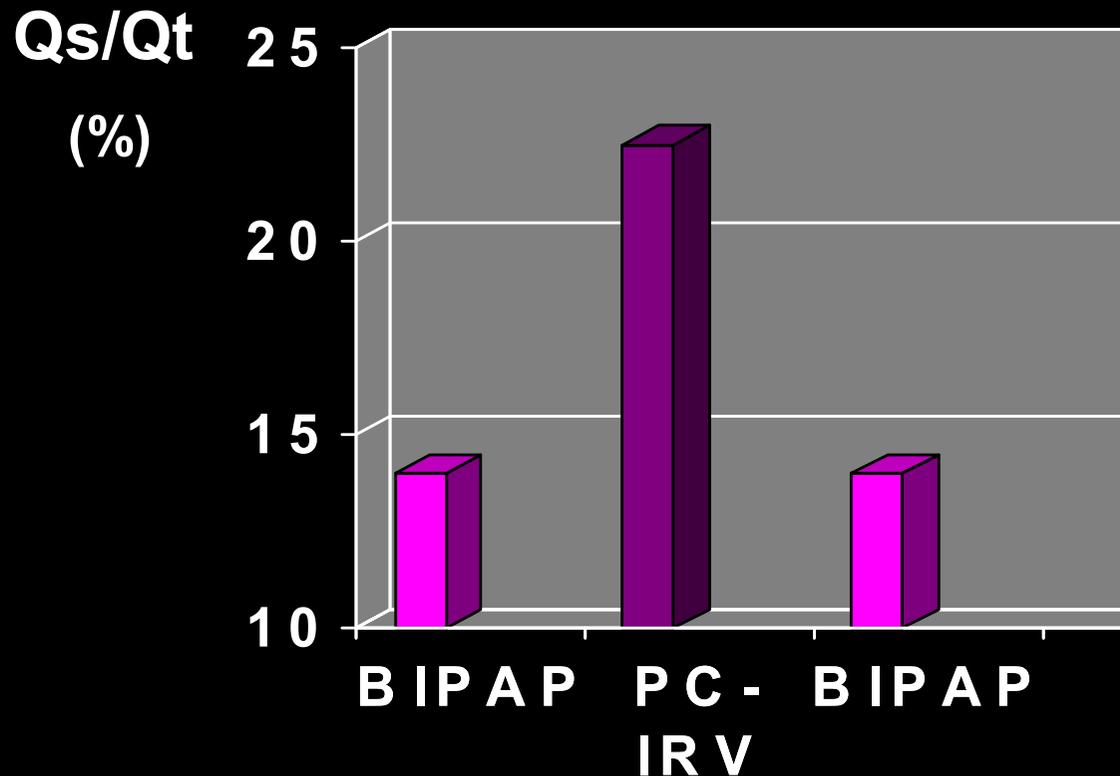
Korrektur der Ventilation:

- $\text{PaCO}_2 \downarrow$ \longrightarrow 1.) $P_{\text{insp}} \downarrow$
2.) AF \downarrow
- $\text{PaCO}_2 \uparrow$ \longrightarrow 1.) AF \uparrow
2.) $P_{\text{insp}} \uparrow$ (abhg. von Druckamplitude !)

PaCO_2 primär über die Frequenz steuern !!

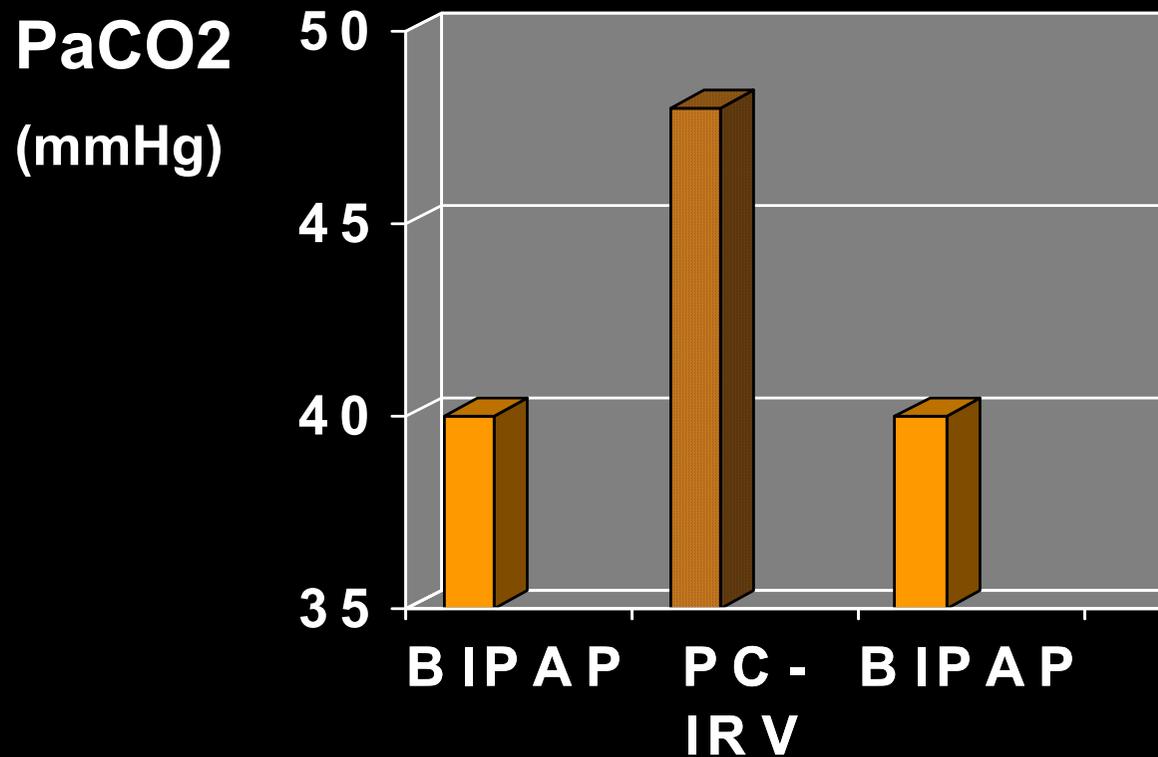
BIPAP und simultane Spontanatmung

Effekte auf den Rechts-Links-Shunt (Q_s/Q_t)

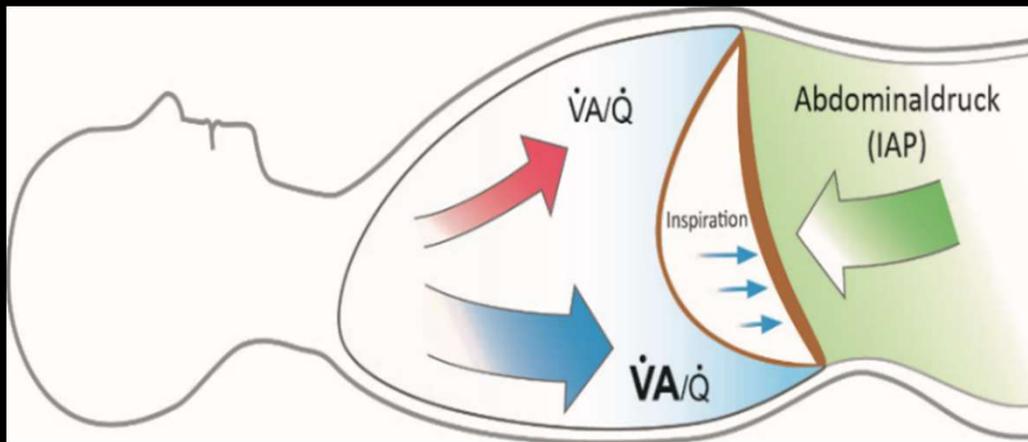


BIPAP und simultane Spontanatmung

Effekte auf den PaCO₂



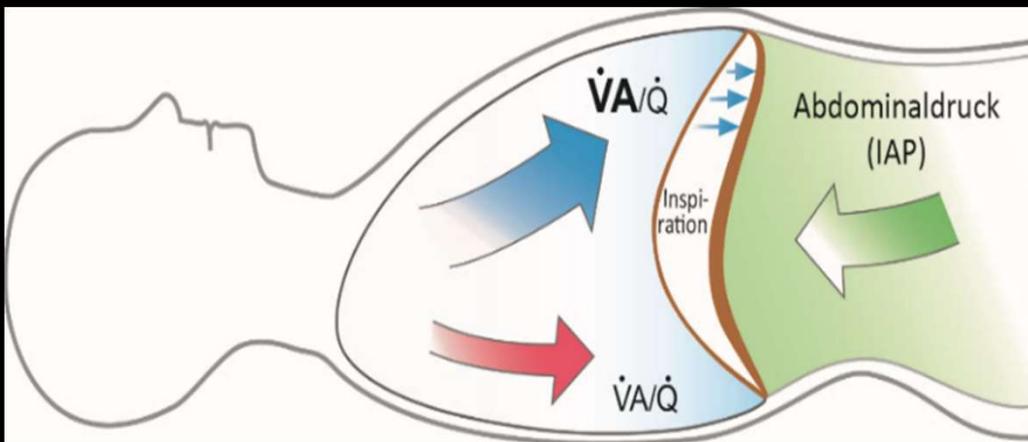
Spontanatmung versus kontrollierte Beatmung



Spontanatmung

aufgrund der
Zwerchfellanatomie

Großteil der Ventilation
nach dorsobasal



Kontrollierte Beatmung

passive
Zwerchfellbewegung

„Ventilationsshift“
nach ventral

Oczenski W. Atmen-Atemhilfen 2023; 11. Auflage, Thieme-Verlag, in press

Putensen C. Anesthesiol Intensivmed Notfallmed Schmerzther 2008; 43(6): 456-463

Froese AB. Anesthesiology 1974;41:242-265

BIPAP und simultane Spontanatmung

Ventilation

BIPAP/APRV
mit Spontanatmung

BIPAP/APRV
ohne Spontanatmung

tilation

Alveoläre Rekrutierung
74%
durch Spontanatmung
47%

Wrigge et al. Anesthesiology 2003;99:376-384

Putensen et al. Curr Opin Crit Care 2006;12:13-18

BIPAP und simultane Spontanatmung

Long-Term Effects

	BIPAP	PCV
Length of MV (d)	15 _± 2	21 _± 2 *
Length of intubation (d)	18 _± 2	25 _± 2 *
ICU-stay (d)	23 _± 2	30 _± 2 *

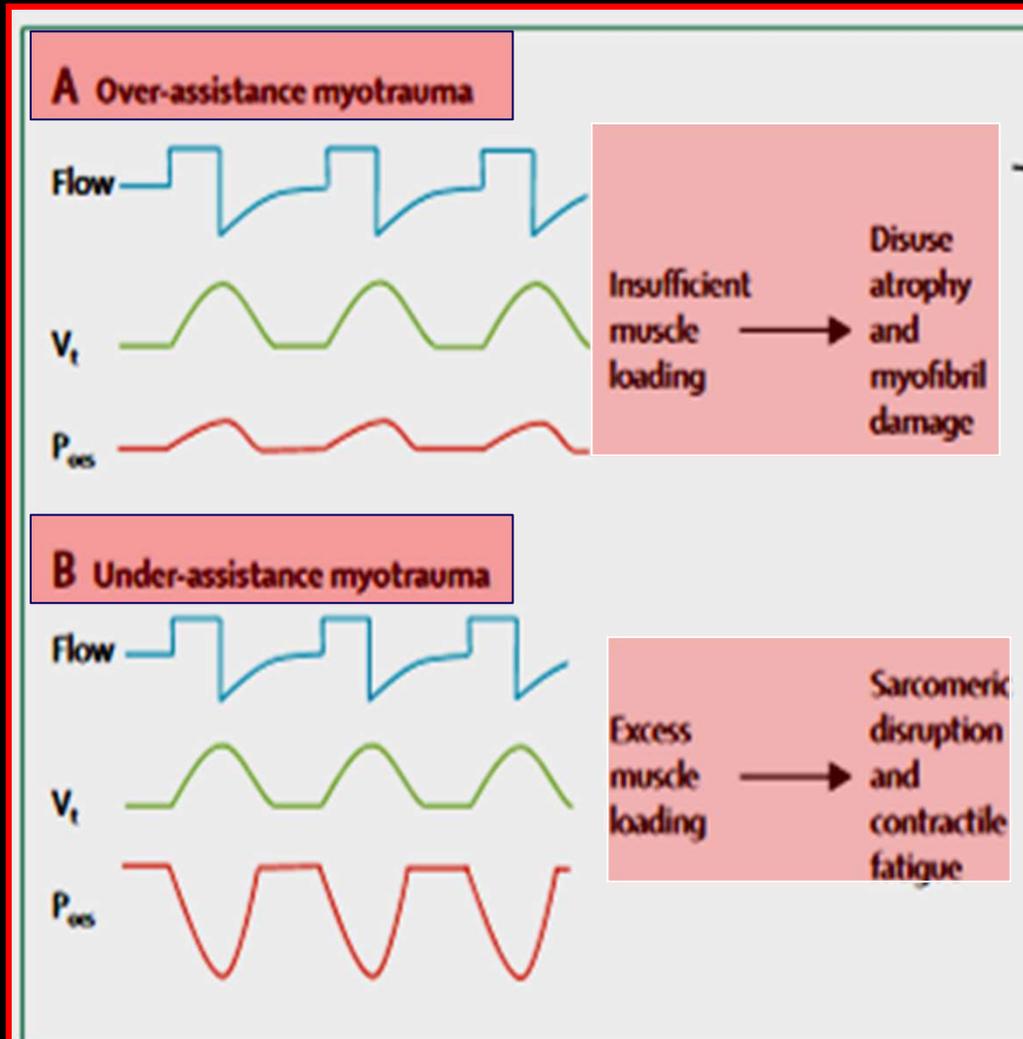
BIPAP und simultane Spontanatmung

Long-Term Effects



Diaphragmales Myotrauma

Pathomechanismen

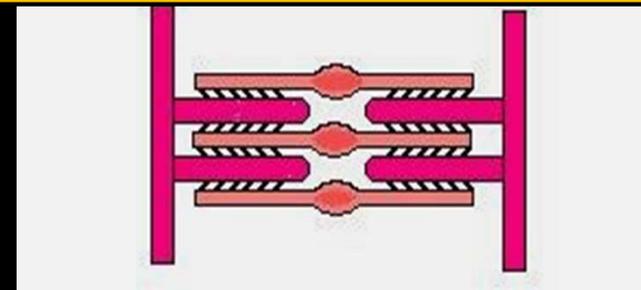


Zwerchfellatrophie



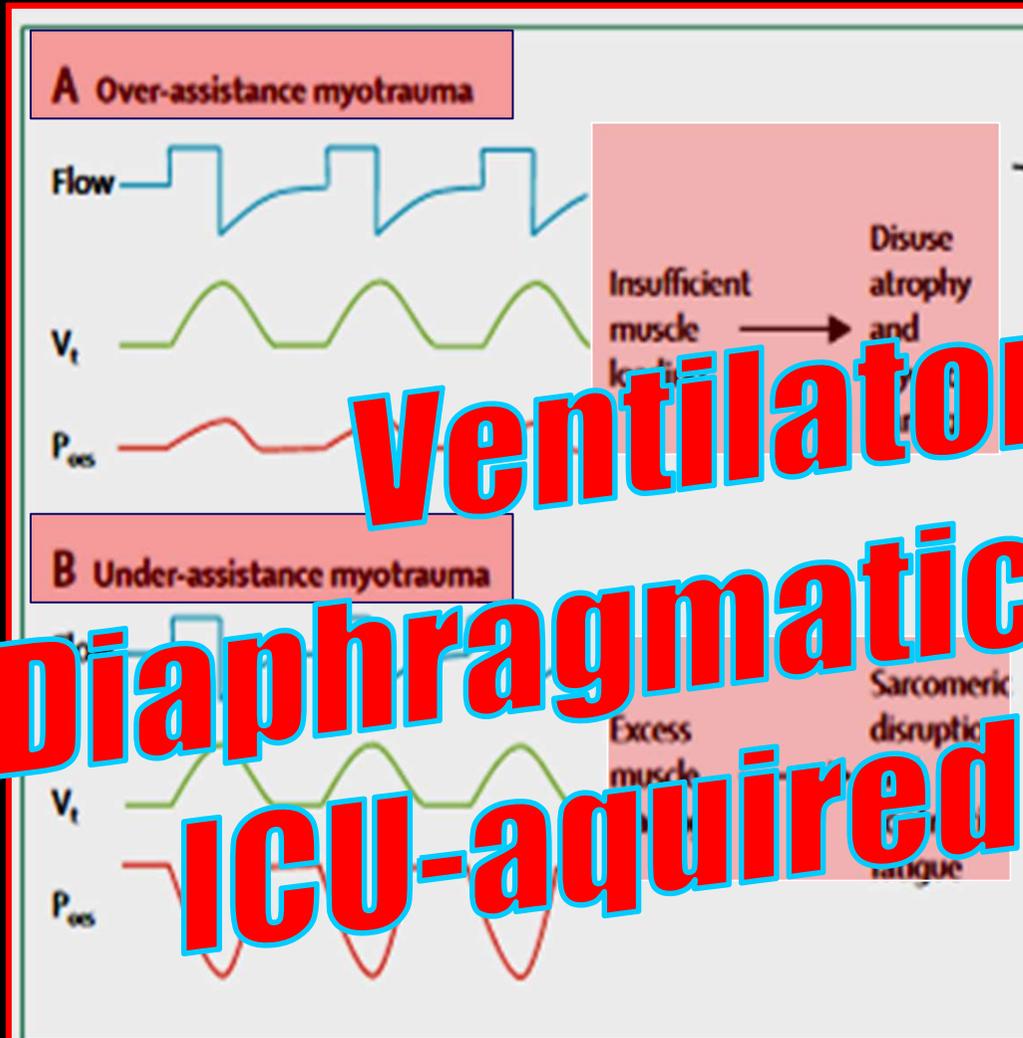
Hoher mechanischer Zwerchfellstress

Mechanische Schädigung der
Myofibrillen durch „Aufbrechen des
Sarkomers“ („Sarcomeric disruption“)



Diaphragmales Myotrauma

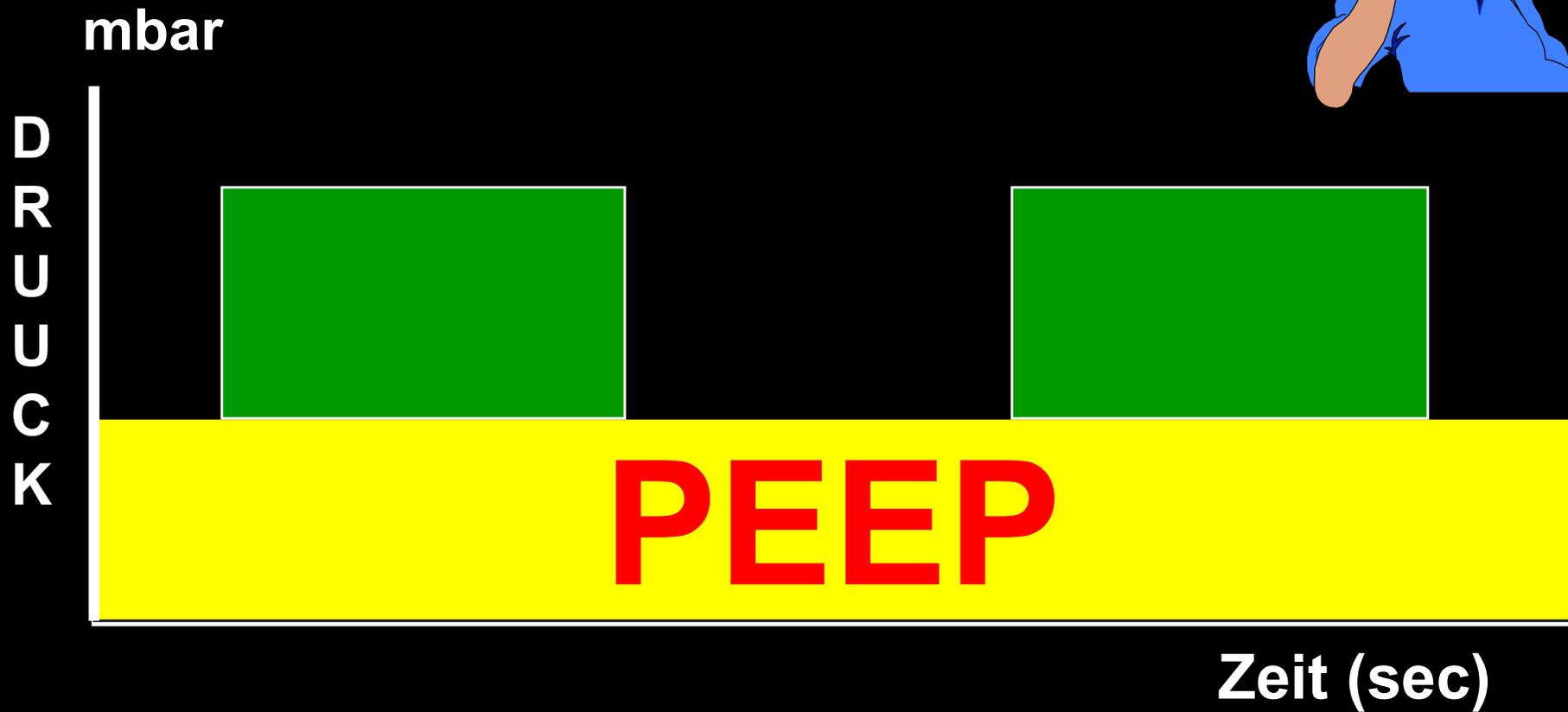
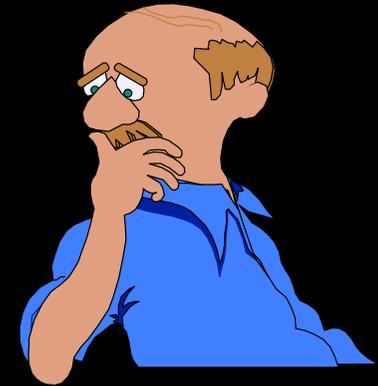
Pathomechanismen



Ventilator Induced Diaphragmatic Dysfunction - ICU-acquired weakness!

Beatmungsmuster

PEEP - A never ending story ? !



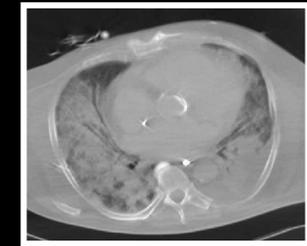
Positive endexpiratory Pressure (PEEP)

“Best PEEP”-Konzepte

- basierend auf Gasaustausch:
→ PaO₂ bzw. DO₂ ↑, PaCO₂ ↓
- basierend auf Lungenmechanik:
→ PEEP > LIP bzw. über dem Verschußdruck

Beste Compliance

Guidelinekonforme Beatmung beim akuten Lungenversagen (ARDS)



Tab. 9 Beatmungsmanagement von Patienten mit ALI/ARDS gemäß den Empfehlungen des ARDSNET [290]. (Mod. nach [23])

Evidenzgrad I / Empfehlungsgrad A

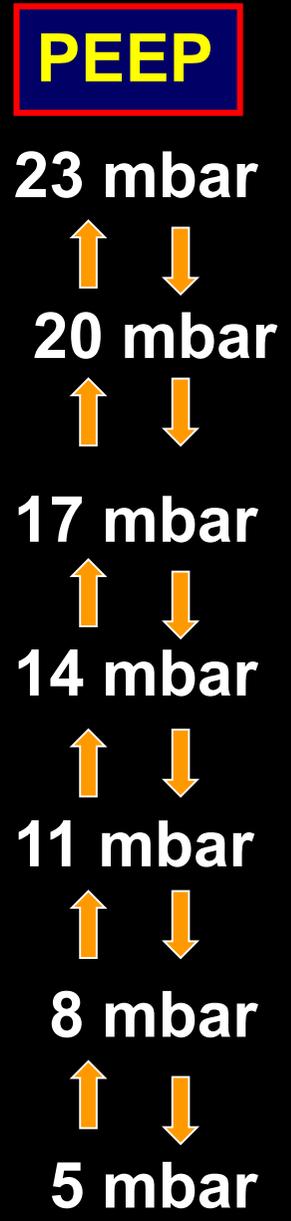
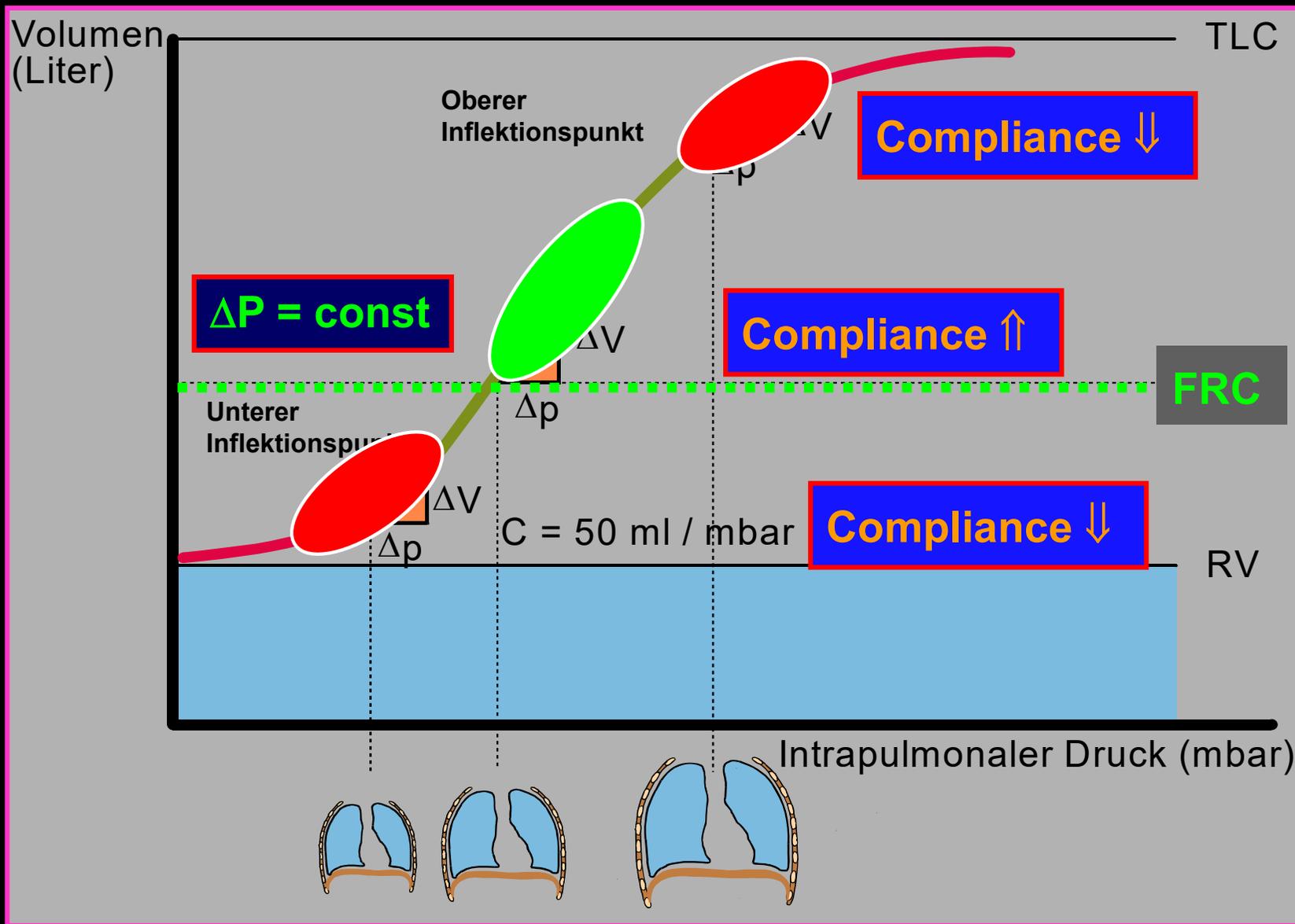
- Kontrollierte Beatmung
- Tidalvolumen auf 6 ml/kg Standardkörpergewicht^a reduzieren
- Plateaudruck unter 30 cm H₂O halten
- Tidalvolumen auf bis zu 4 ml/kg Sollgewicht reduzieren, um den zu halten.
- S_aO₂ bzw. S_pO₂ zwischen 90 und 95% halten
- Voraussichtlicher PEEP in Abhängigkeit von der F_IO₂

Driving Pressure ≤ 15 cm H₂O

F _I O ₂	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
PEEP	5	5–8	8–10	10	10–14	14	14–18	20–24

^aBerechnung des Standardkörpergewichts: Gewicht_{Männer} [kg]=50+0,91(Größe [cm]–152,4); Gewicht_{Frauen} [kg]=45,5+0,91(Größe [cm]–152,4).

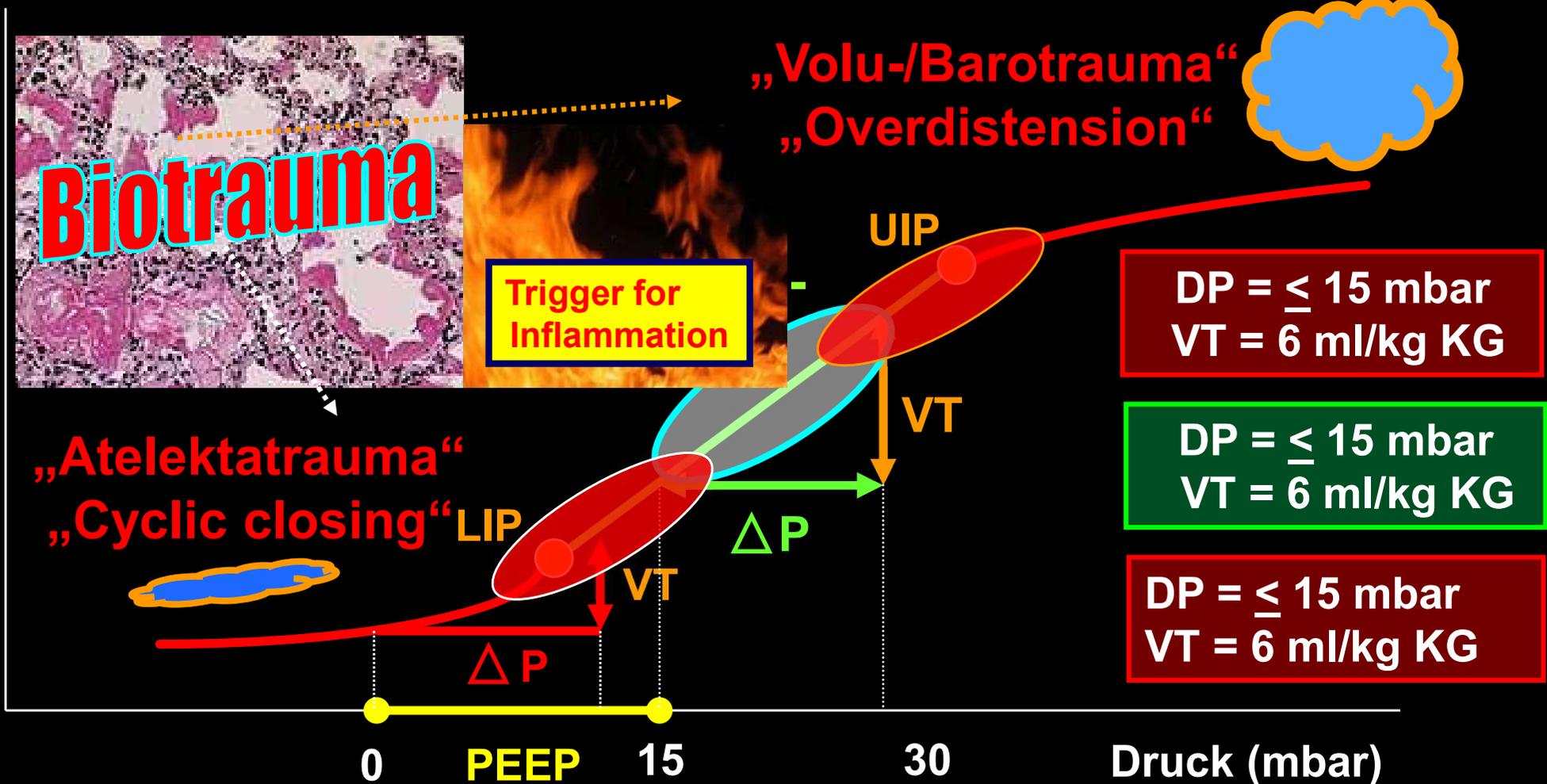
PEEP-trial und „best of Compliance-Manöver“



Guidelinekonforme Beatmung beim ARDS

Druck-Volumen-Diagramm

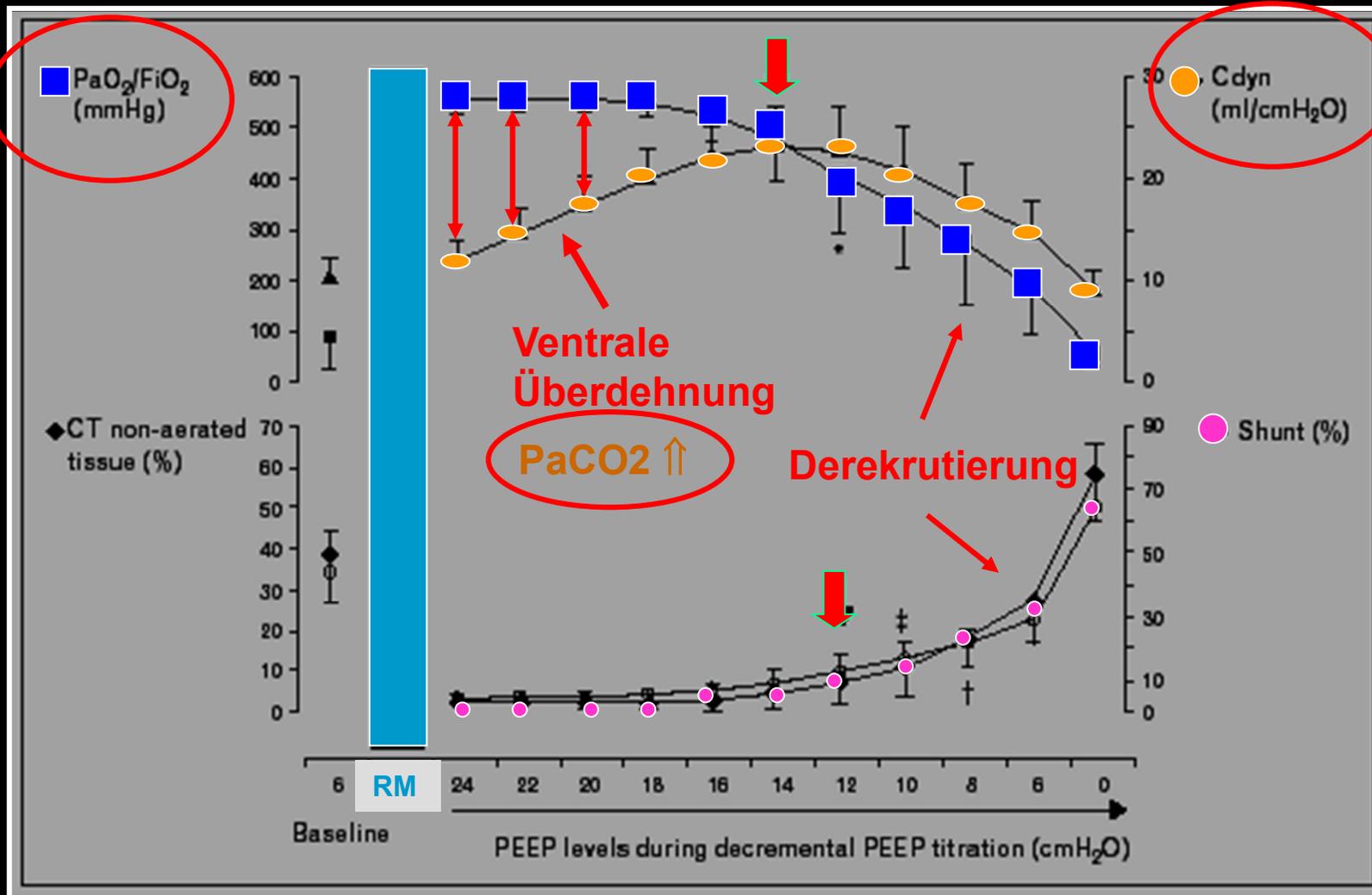
Volumen (ml)



Curly GF. Chest 2016;150:1109-1117
Amato et al. N Engl J Med 2015;372:747

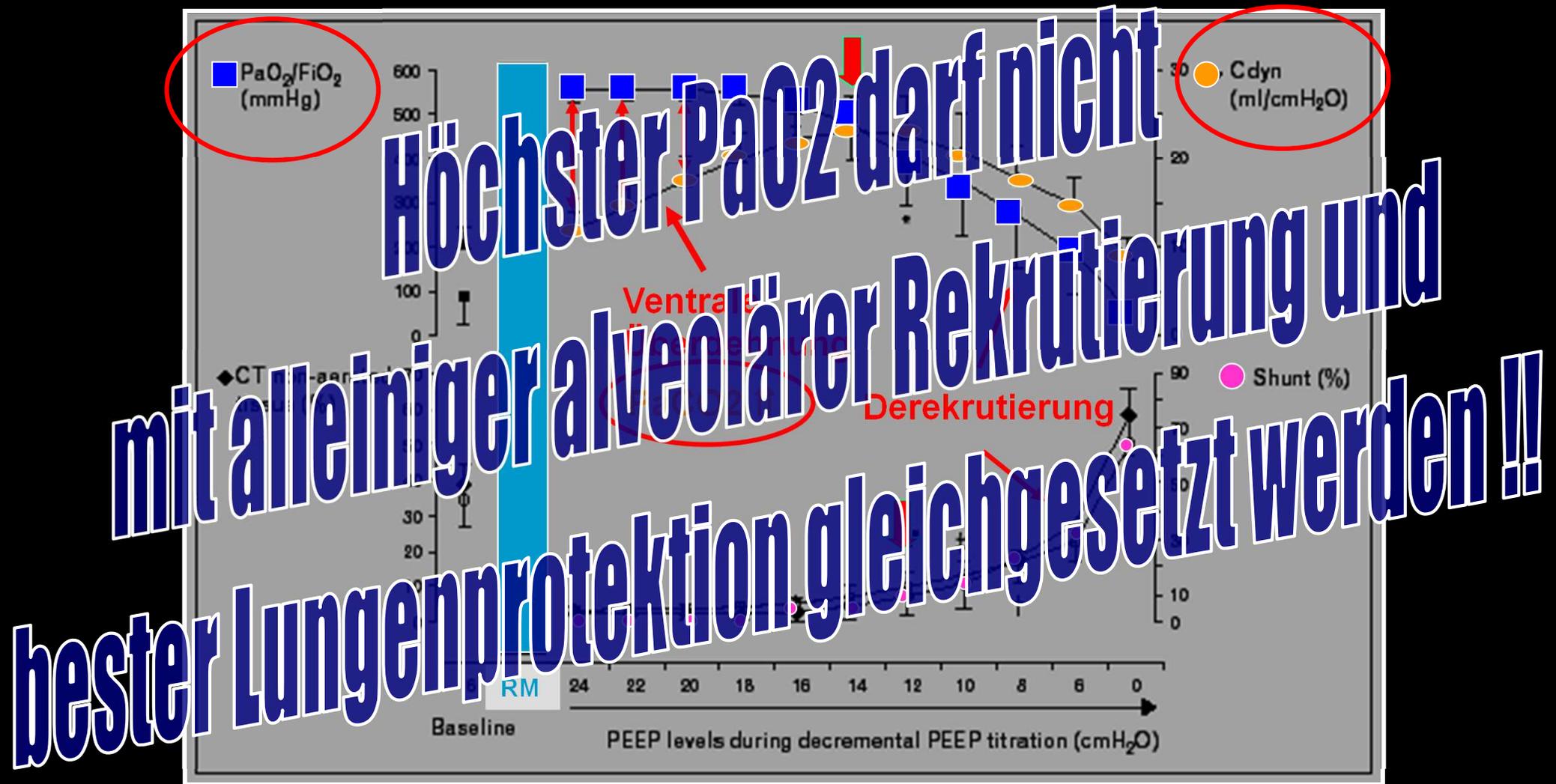
Beitler JR. Clin Chest Med 2016;37:633
Slutsky A. N Engl. J Med 2013;369:2126

Changes in oxygenation, dynamic compliance, nonaerated lung tissue and shunt during a decremental PEEP-trial



Suarez-Sipman et al. Crit Care Med 2007;35:214-221
 Dueck R. Curr Opin Anaesthesiol 2006;19:650-654

Changes in oxygenation, dynamic compliance, nonaerated lung tissue and shunt during a decremental PEEP-trial



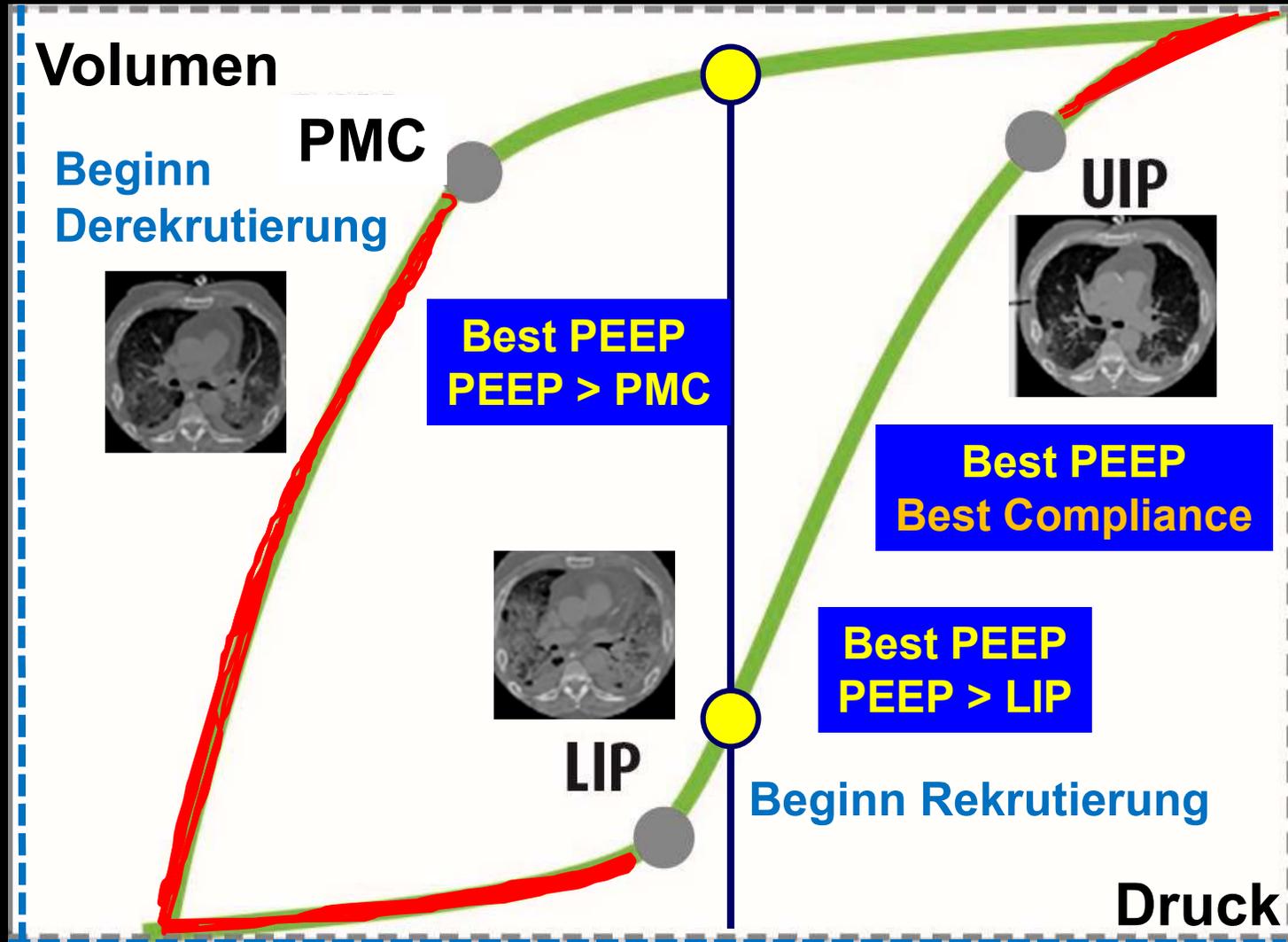
Suarez-Sipman et al. Crit Care Med 2007;35:214-221
Dueck R. Curr Opin Anaesthesiol 2006;19:650-654

take home message :

**Beste Lungenprotektion
hat Vorrang
vor bester Oxygenierung !**

Druck-Volumen-Schleife

Lung recruitment and derecruitment in an ARDS-patient



Transpulmonale Druckmessung

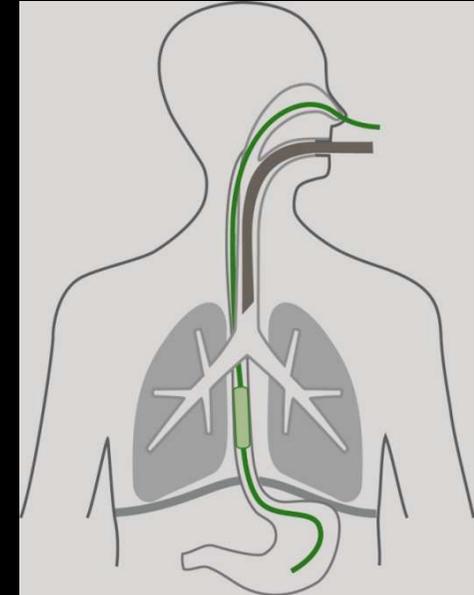
Berechnung

$$P_{tp} = P_{alv} - P_{pl}$$

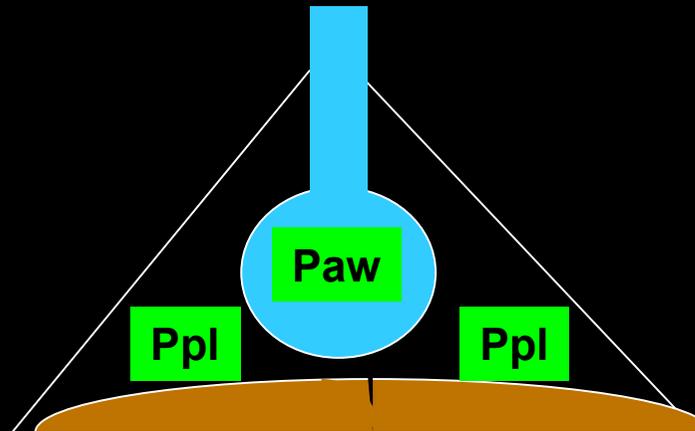
$$P_{tp_{insp}} = P_{insp} - P_{eso_{insp}}$$

$$P_{tp_{exp}} = PEEP - P_{eso_{exp}}$$

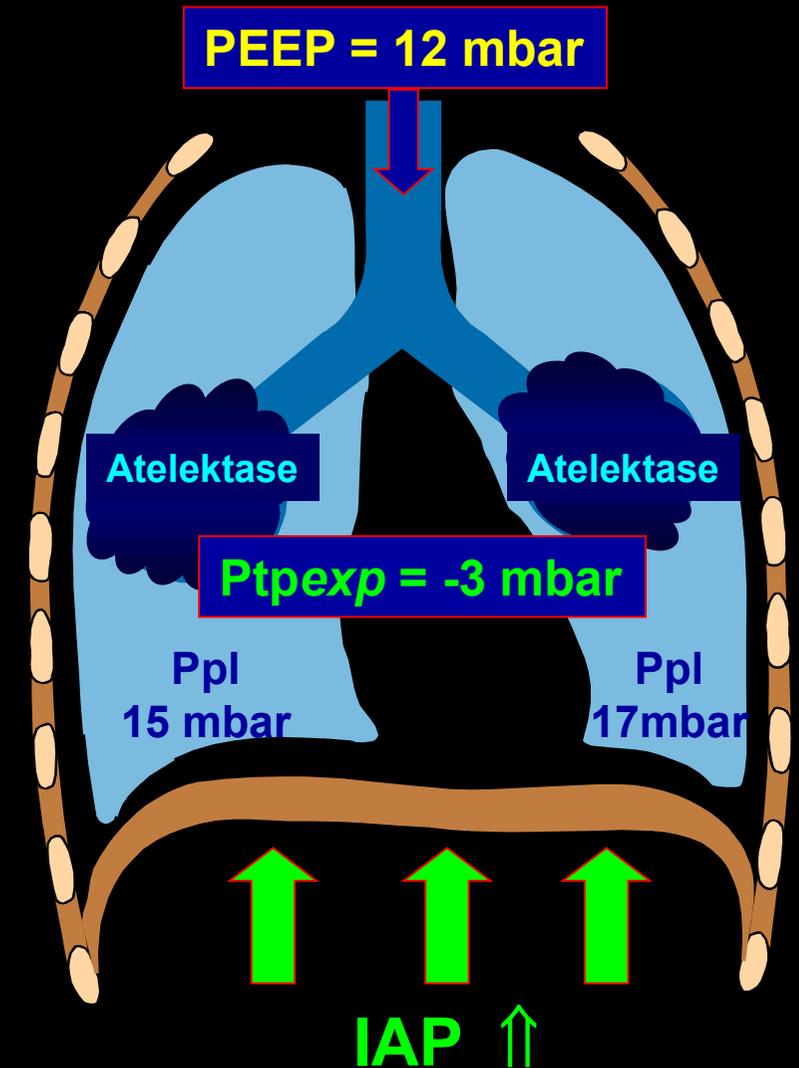
Ösophagusdrucksonde



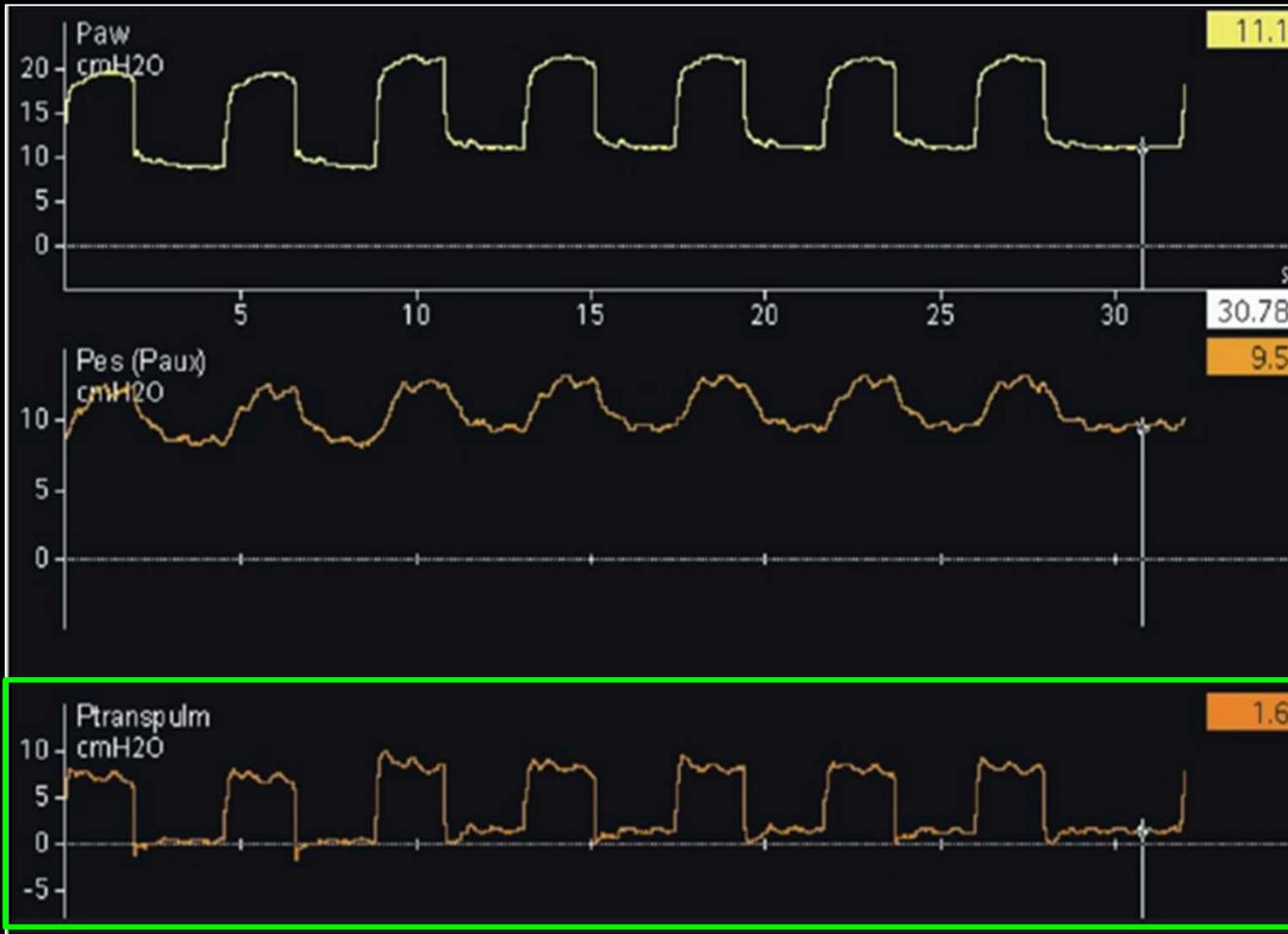
Pressure Pod



PEEP-Optimierung nach transpulmonalem Druck



PEEP-Optimierung nach transpulmonalem Druck



$$P_{tpexp} = PEEP - P_{\text{ös}exp}$$

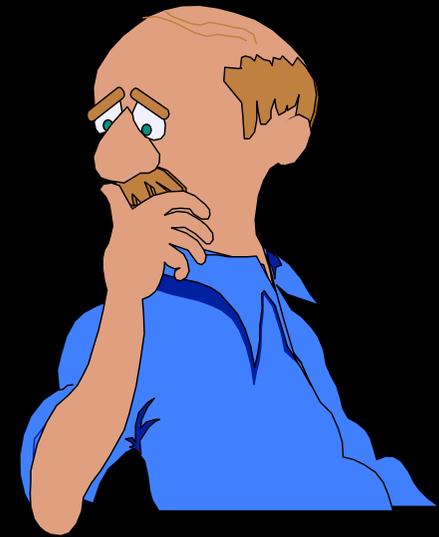
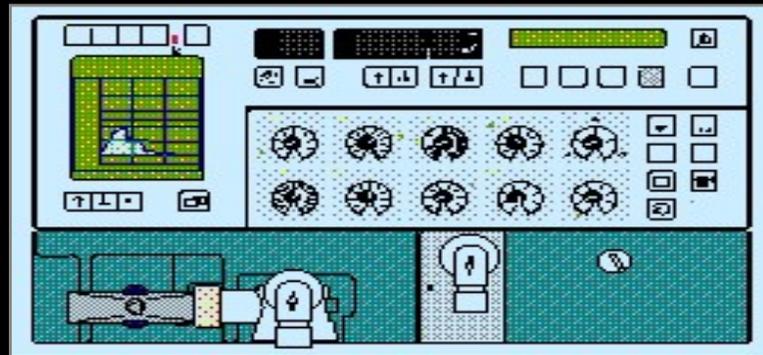


PEEP solange erhöhen
bis **P_{tpexp} positiv**
(≥ 1 mbar) wird

„best PEEP“
= $P_{transpulmonal}$ positiv

Augmentierende Atemhilfen

BIPAP versus PSV

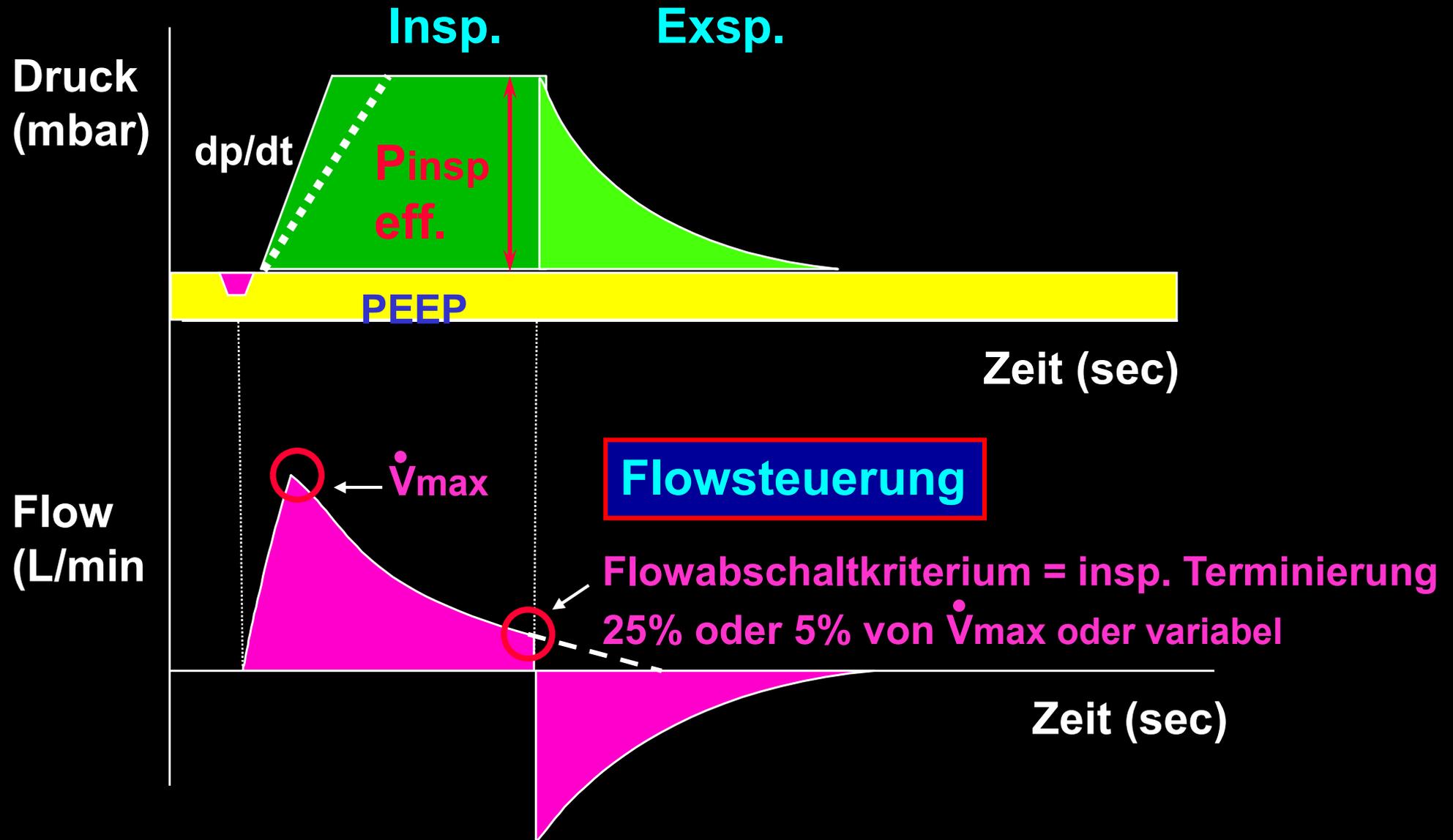


Pressure Support Ventilation (PSV)

Definition

- Druckunterstützte, **flowgesteuerte** augmentierende Atemhilfe
- „**Breath to breath Support**“

Pressure Support Ventilation (PSV)

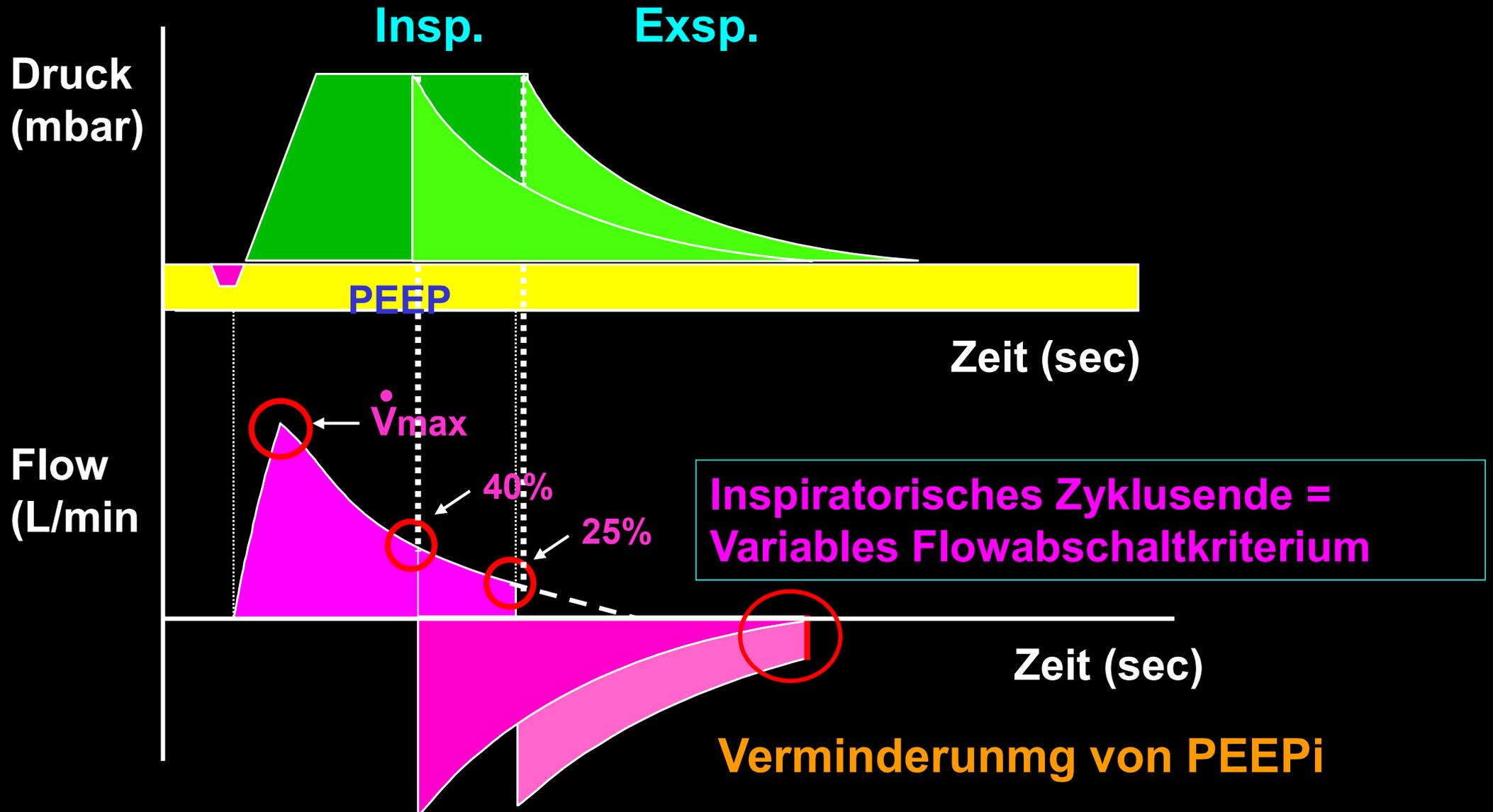


Pressure Support Ventilation (PSV)

Initiale Respiratoreinstellung

- **P_{insp}:** 10-12 mbar *über PEEP*
- **Tidalvolumen (Freiheitsgrad):** 6-8 ml/kg
- **PEEP:** 5-8 mbar
- **“Rampe”:** $\leq 0,2$ sec
- **FIO₂:** 40-50% bzw. nach PaO₂/SaO₂
- **Triggerschwelle:** 3 l/min bzw. < 1 mbar

Pressure Support Ventilation (PSV)



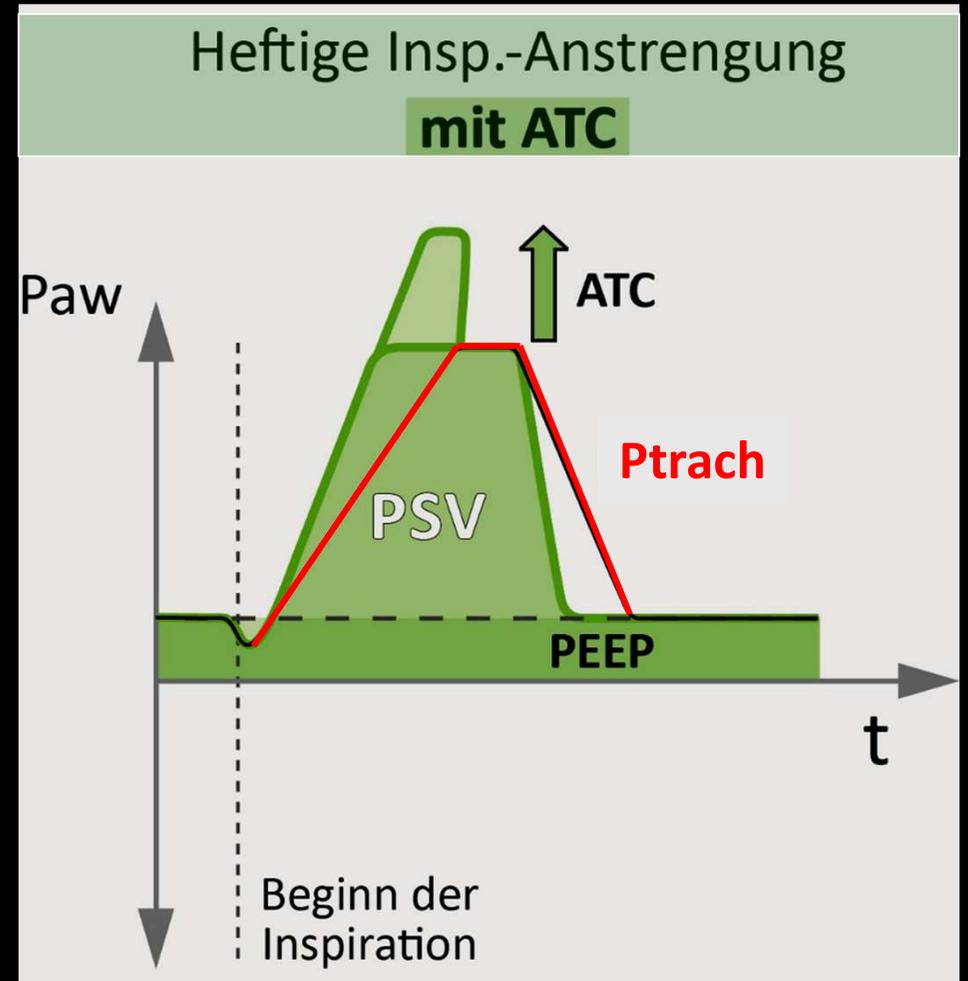
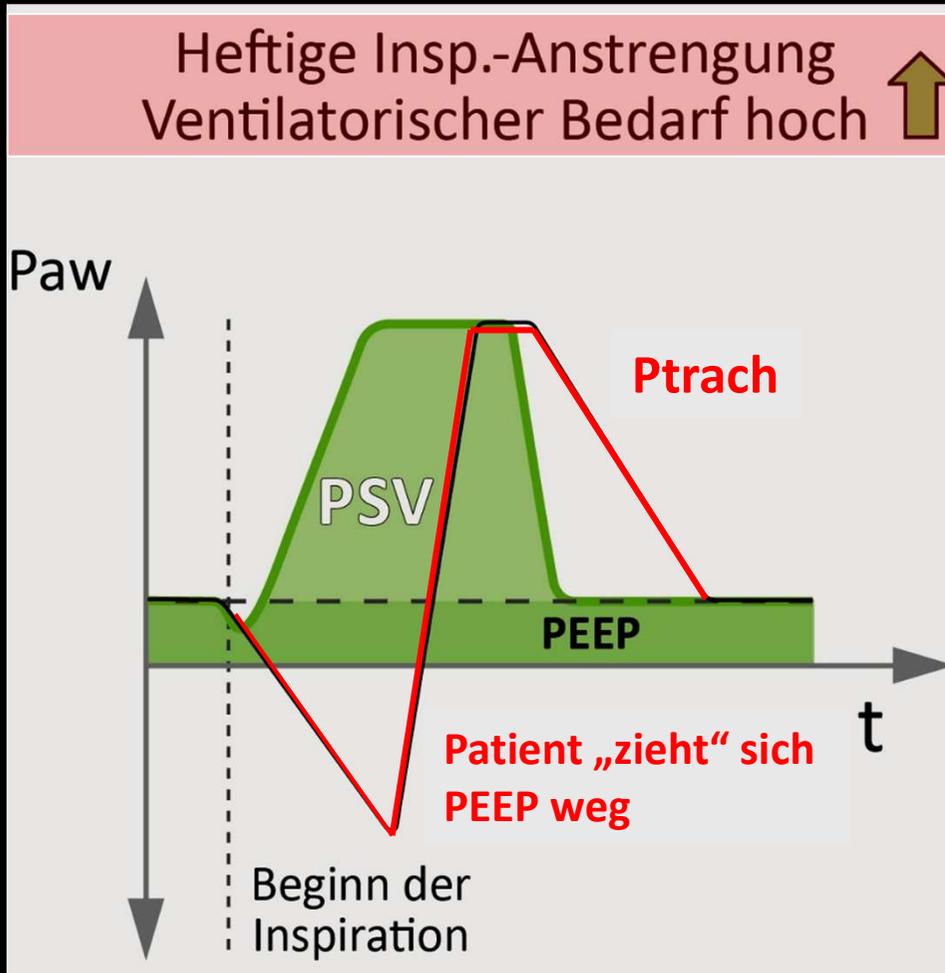
Augmentierende Atemhilfen

Automatische Tubuskompensation (ATC)



Automatische Tubuskompensation

Funktionsprinzip



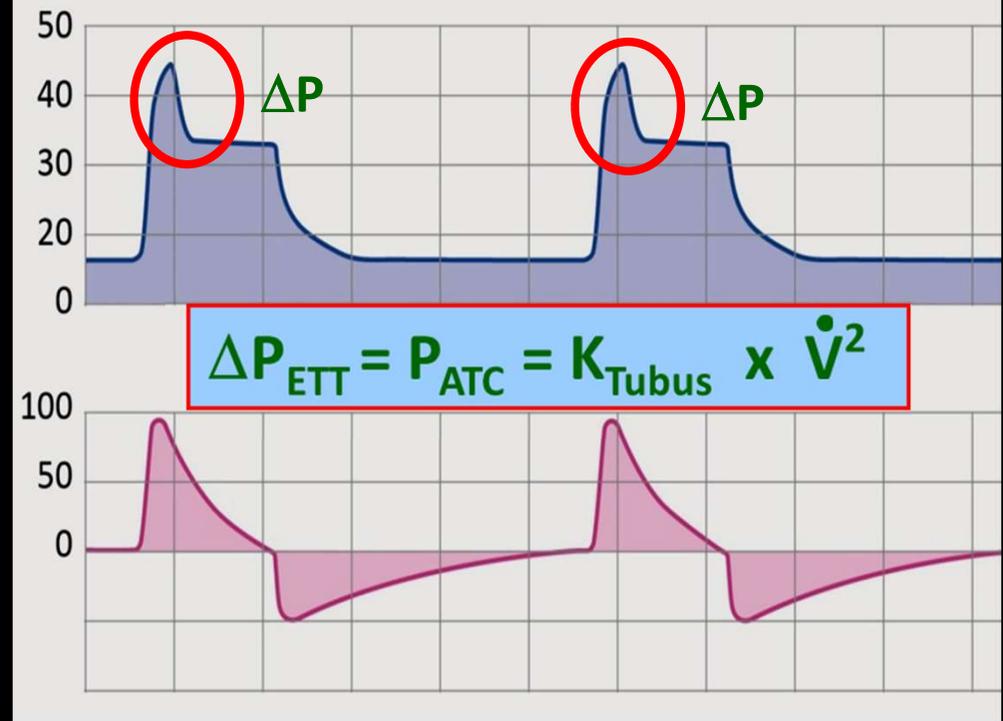
Beatmungstherapie des COVID-19-ARDS

Automatische Tubuskompensation - Funktionsprinzip

Look at the Curves !!

- Hoher Flow – hohes ΔP
„Überschwinger“ →
hoher Druckabfall über Tubus
- Indikator für hohe dynamische
flowabhängige Strömungs-
widerstände

Patient mit aktivierter Tubuskompensation



Druckspitze ist ein vor dem Tubus gemessener Druck,
der intrapulmonal nicht wirksam ist!!

Danke für Ihre Aufmerksamkeit

