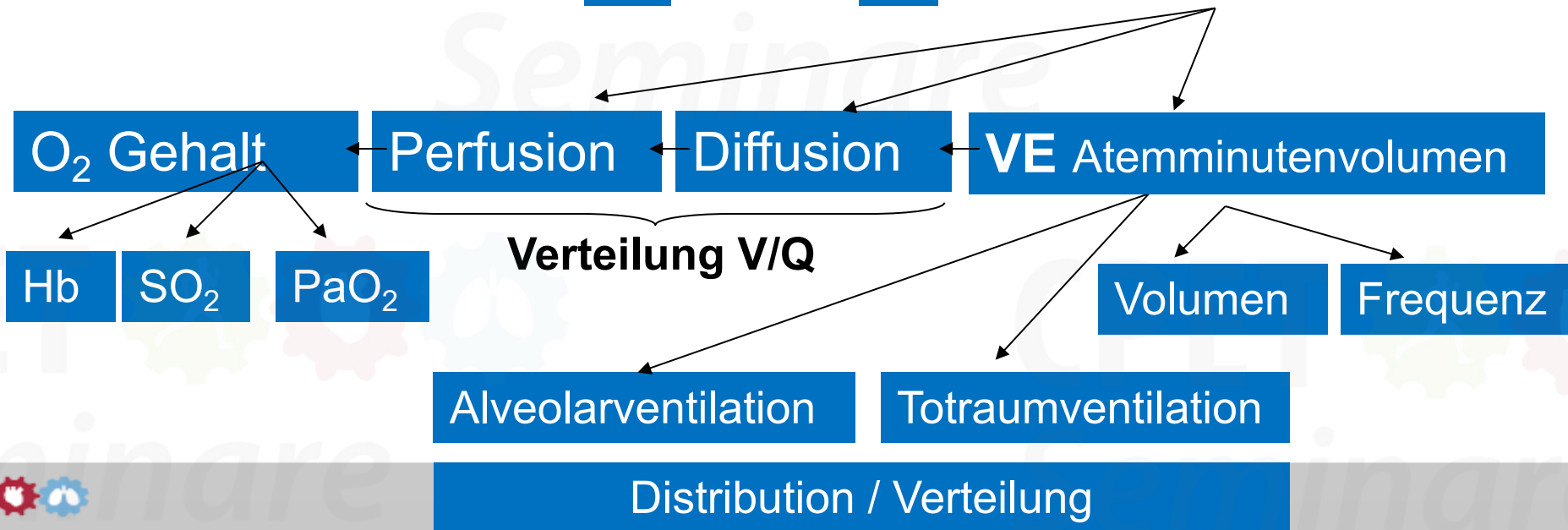
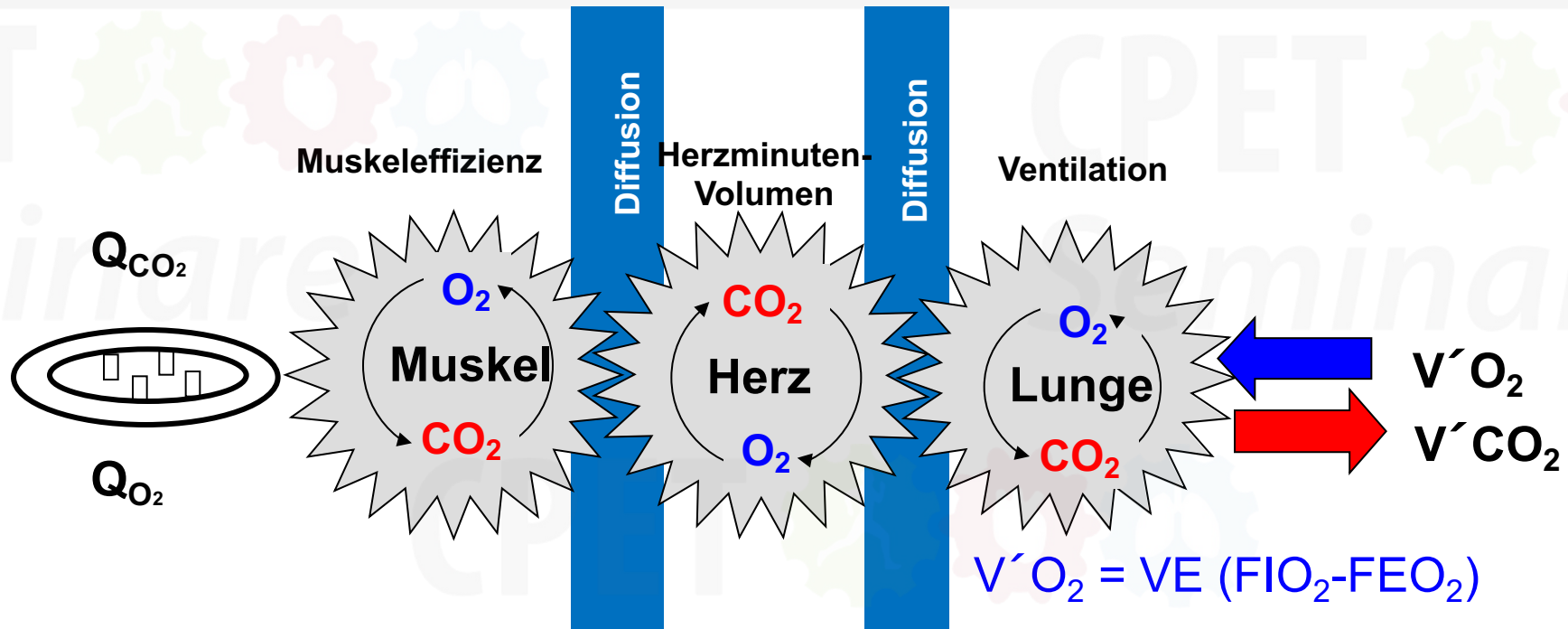
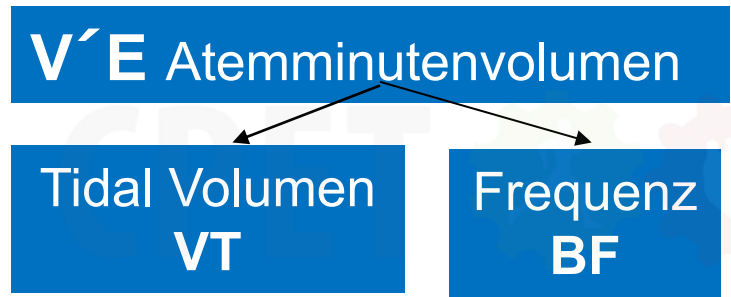
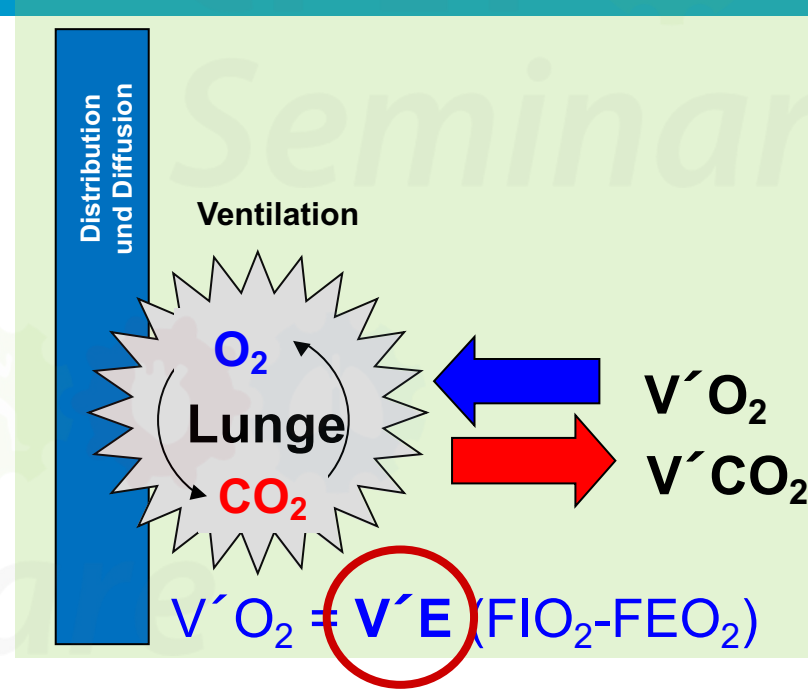



(Patho-) Physiologie der pulmonalen Adaptation an Belastung

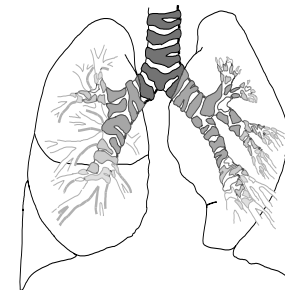
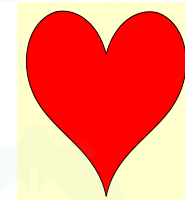


Ventilation



Anpassung Ventilation und Zirkulation an Belastung

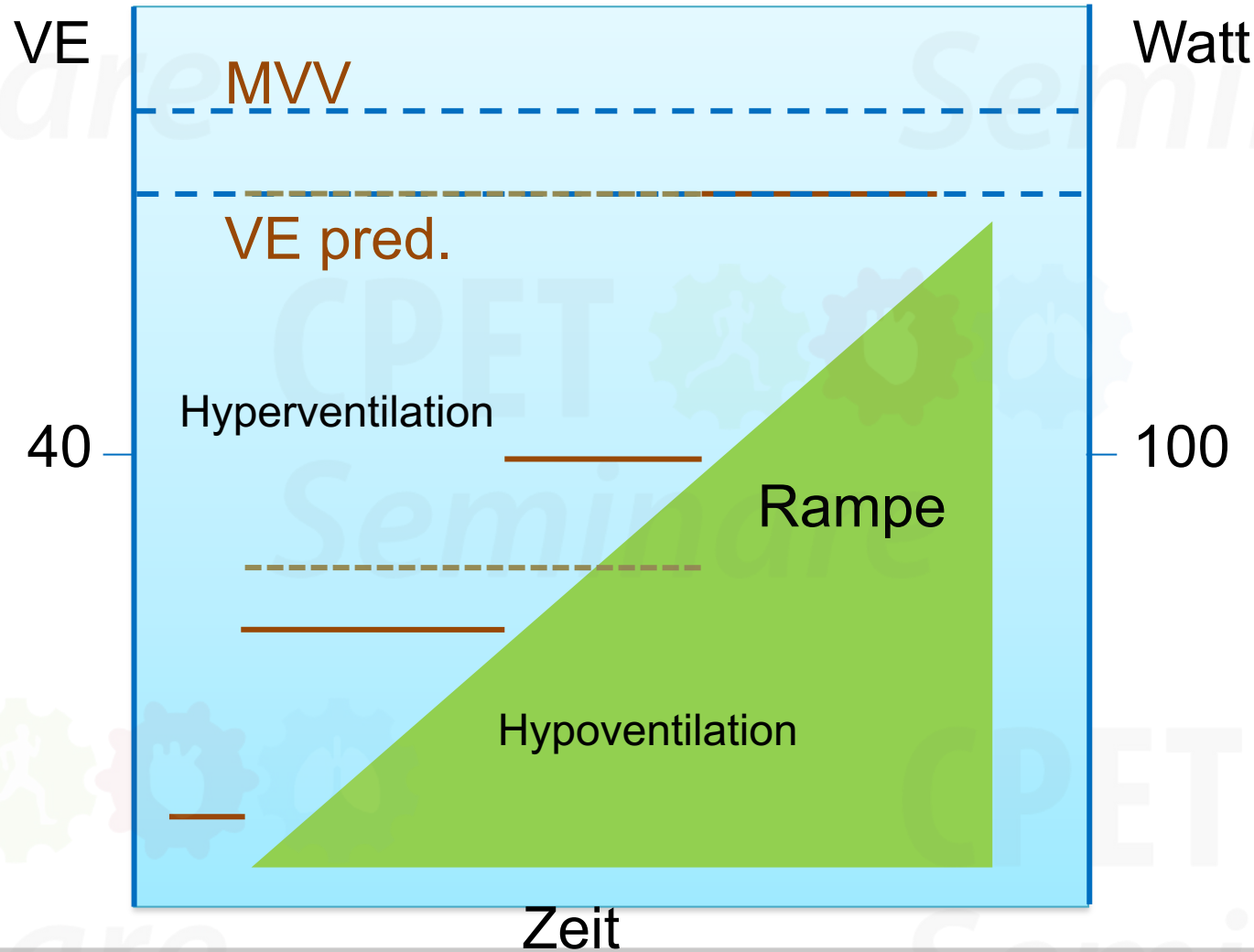
Parameter	Ruhe	Ausbelastung
SV (L)	0,08	0,12 - 0,2
HR (1/min)	70	200
HZV (L/min)	5 - 6 	30 - 40
VT (L)	0,8	3
BF (1/min)	12	50
V'E (L/min)	10	150



Steigerung **HZV um Faktor ≈ 6** , Steigerung **V'E um Faktor 15**

Bei Gesunden: Die **Ventilation** hat die **größeren Reserven**

Ventilatorische Anpassung

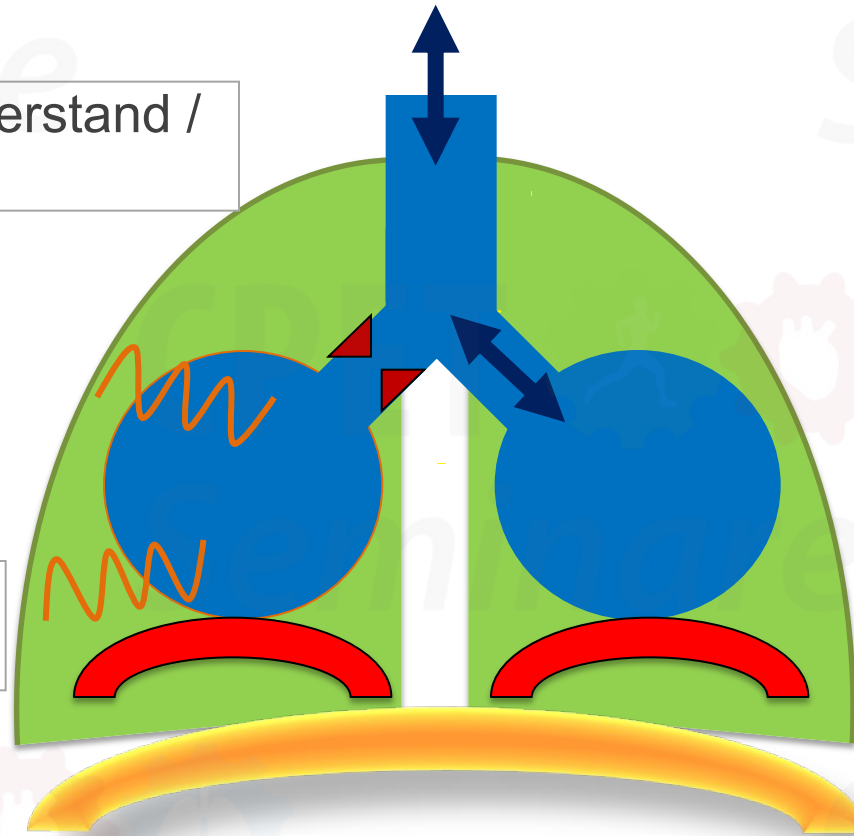


Panel 1 (9 FG)

Atemwegswiderstand & Dehnbarkeit

Atemwegswiderstand /
Resistance

Dehnbarkeit /
Compliance



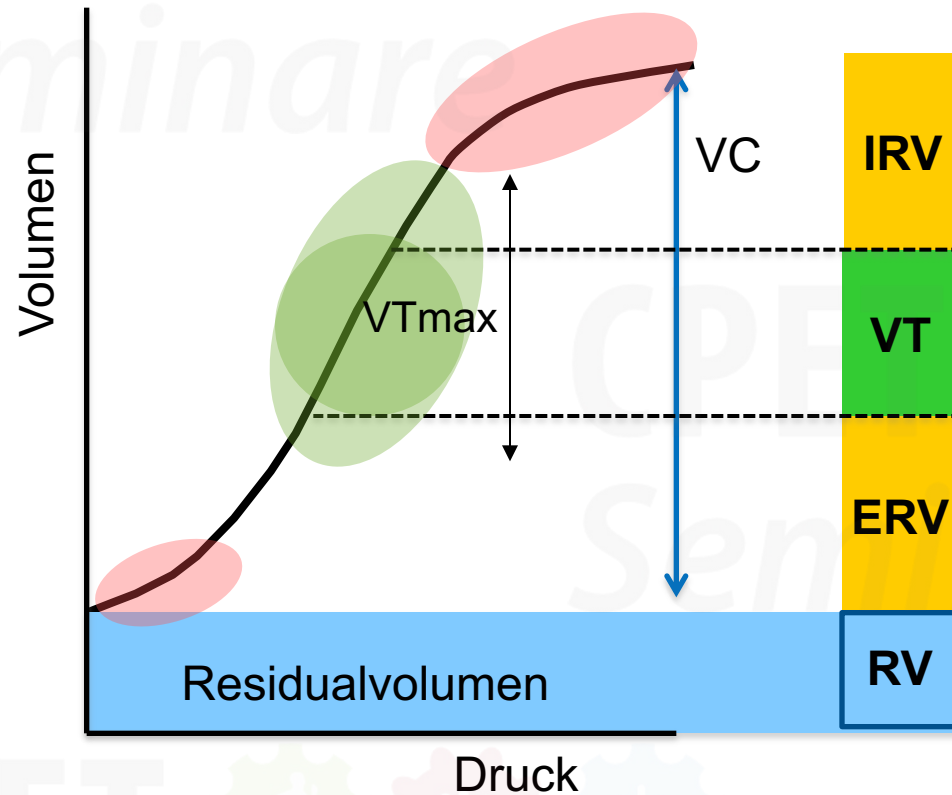
Die Ventilation wird durch den
Atemwegswiderstand und die
Dehnbarkeit beeinflusst.

Ventilation

Perfusion

Atempumpe

Determinanten der Ventilation

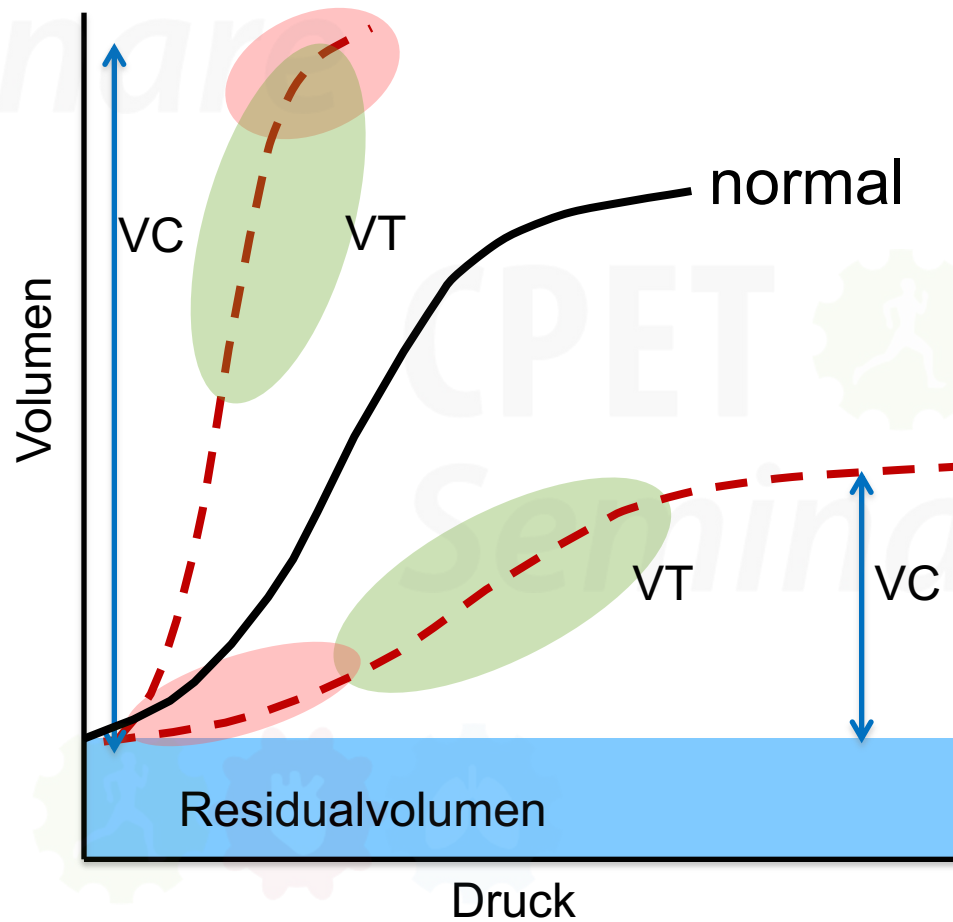


Im Bereich der Ruheatmung ist die Beziehung von Druck und Volumen linear

Die Volumen-Druck-Beziehung wird im Bereich maximaler In- und Expiration alinear

IRV= Inspiratorisches Reservevolumen, VT = Atemzugvolumen,
ERV = Expiratorisches Reservevolumen

Determinanten der Ventilation

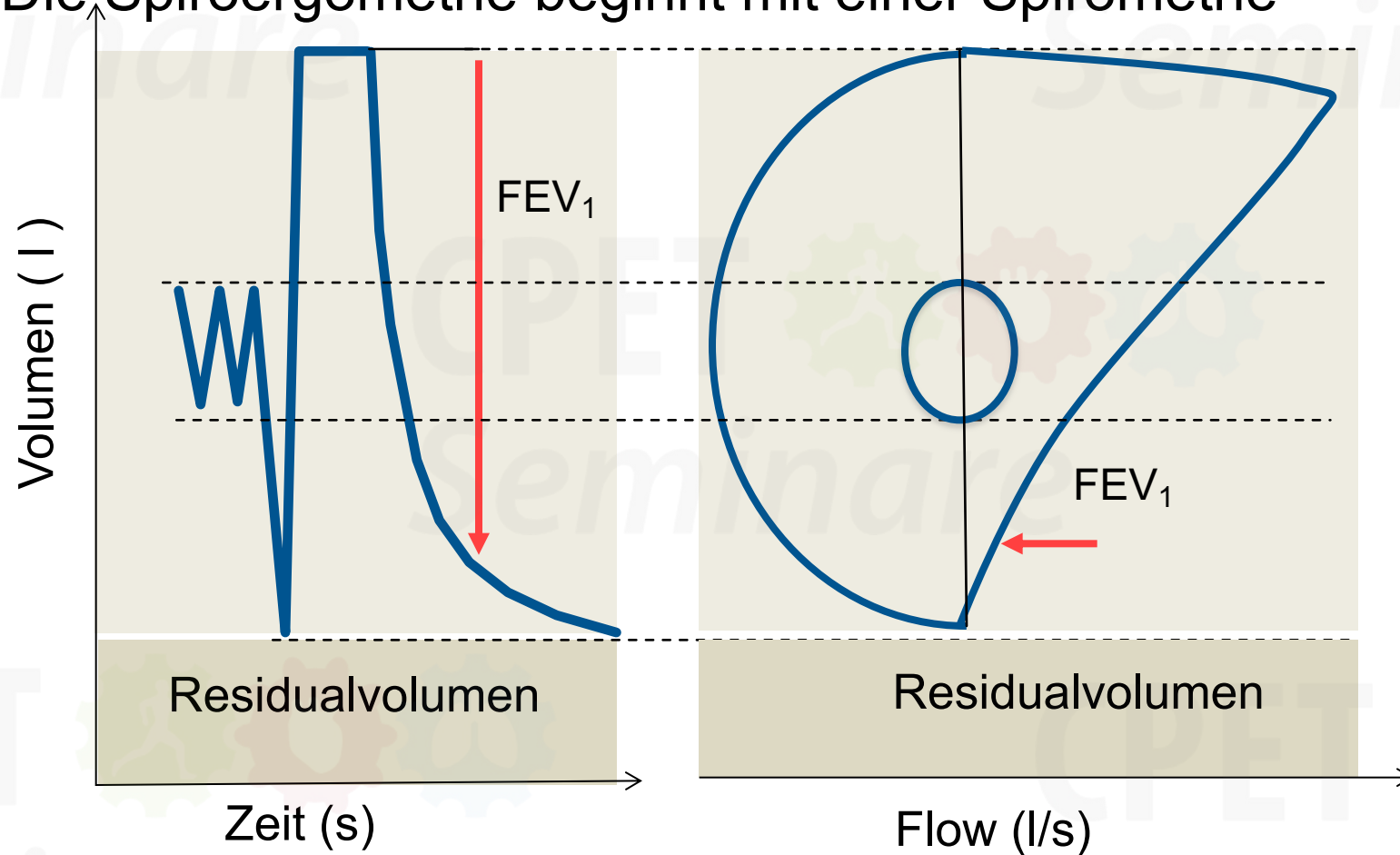


Emphysem: geringer Druckgradient für das generierte Volumen, aber Verschiebung in den alinearen Bereich bei TLC

Fibrose: erhöhter Druckgradient für das generierte Volumen V

Bestimmung der ventilatorischen Reserve

Die Spiroergometrie beginnt mit einer Spirometrie



Abschätzung der ventilatorischen Reserve

1. Atemreserve = **BR (Breathing Reserve)**

$MVV - V'E$ (MVV = maximal voluntary ventilation)

MVV = a) maximale Ventilation 12 Sekunden mal 5

b) $FEV_1 \times 35$

*MVV früher auch als
AGW (Atemgrenzwert
bezeichnet)*

2. Sollwert für $V'E$ max

3. Neuner - Regel nach Rühle (grober Schätzwert)

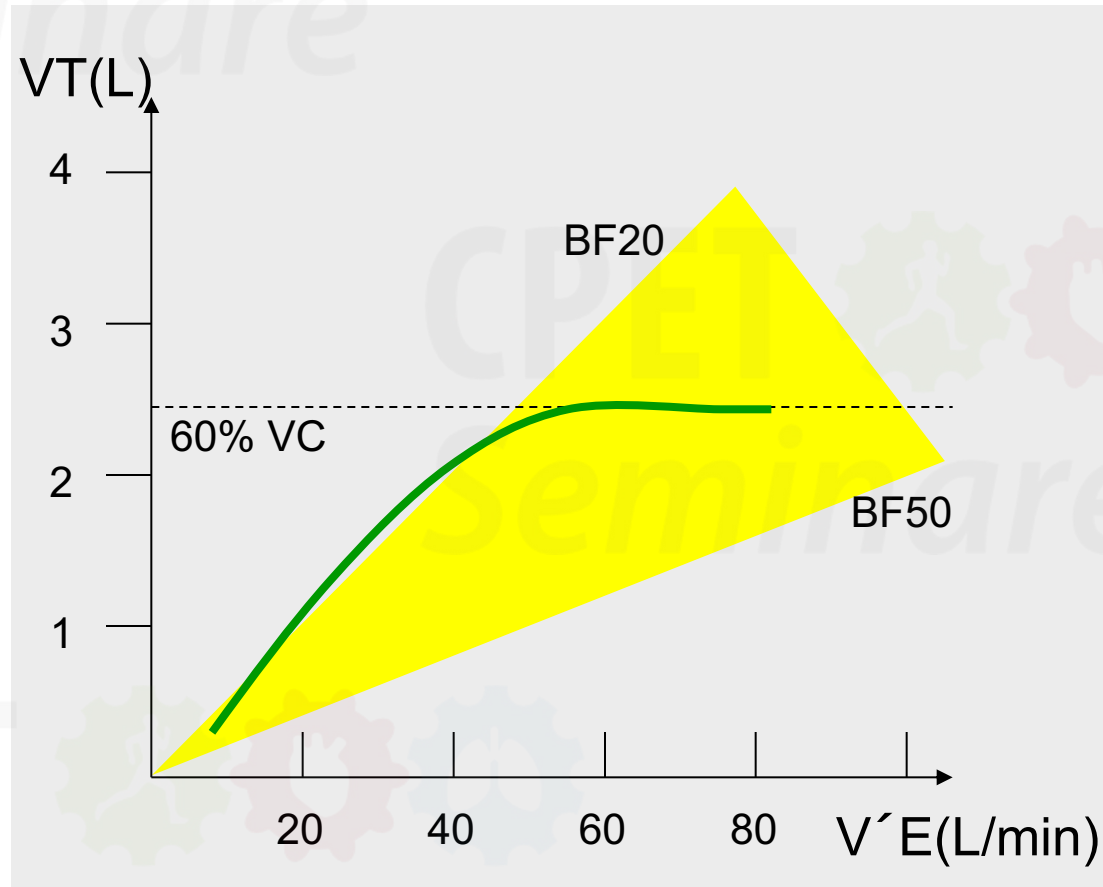
Ruheventilation = 9 Liter

je 25 Watt 9 Liter Ventilationssteigerung

VE 100 Watt = $9 + (4 \times 9) = 45$ Liter

Ventilatorische Anpassung

Verhältnis von VT zu BF



Normal: vorrangige Steigerung der Ventilation über **Zunahme VT** bis ca. **60% der VC**, dann **↑ BF**

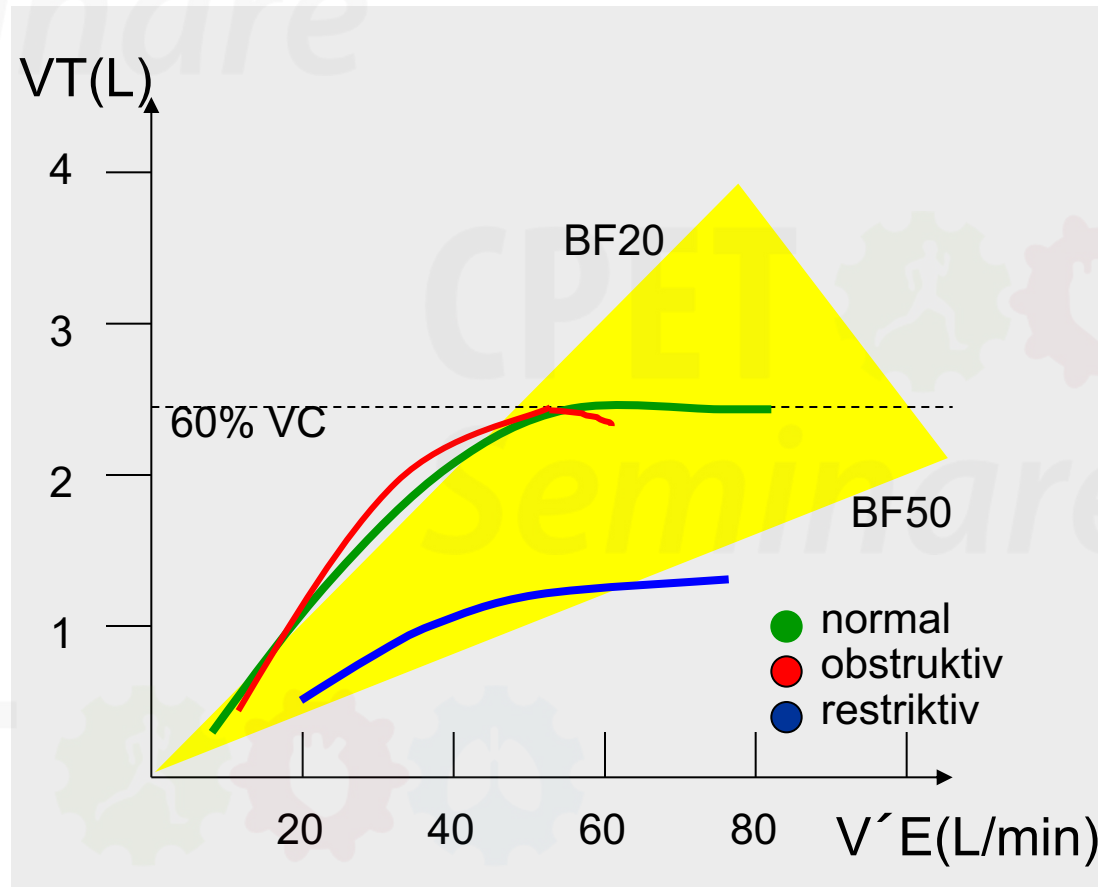
Zunahme VT bis etwa zur VT_1

Bei Zunahme von BF nimmt Totraumventilation proportional zu, daher weniger ökonomisch

Panel 7 (9FG)

Ventilatorische Anpassung

Verhältnis von VT zu BF



Normal: vorrangige Steigerung der Ventilation über **Zunahme VT** bis ca. **60% der VC**, dann **↑ BF**

Obstruktiv: Steigerung über VT möglichst bei BF weniger als 20. Bei höherer BF kommt es zu VT Abnahme

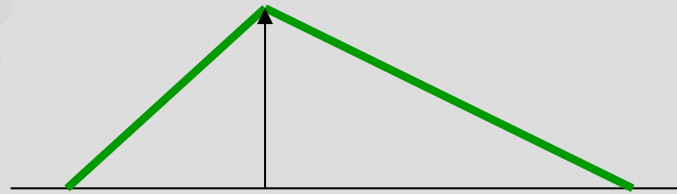
Restriktiv: Steigerung über BF, nur geringer VT Anstieg („**Ceiling Phänomen**“)

Panel 7 (9FG)

Ventilation

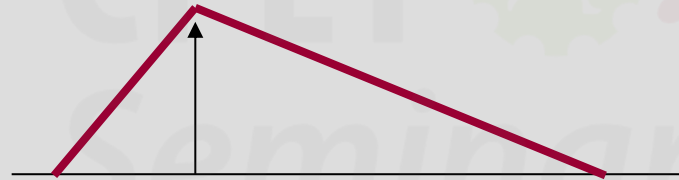
Atemmuster :

$t(i) / t(\text{tot})$



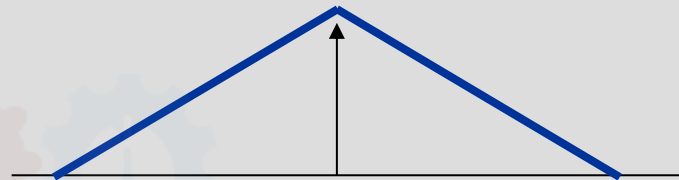
Für die **Ex**spiration verbleibt an Zeit **60%**

normal: $t(i) / t(\text{tot})$
40%



Für die **Ex**spiration verbleibt an Zeit **70%**

obstruktiv: $t(i) / t(\text{tot})$
30%



Für die **Ex**spiration verbleibt an Zeit **50%**

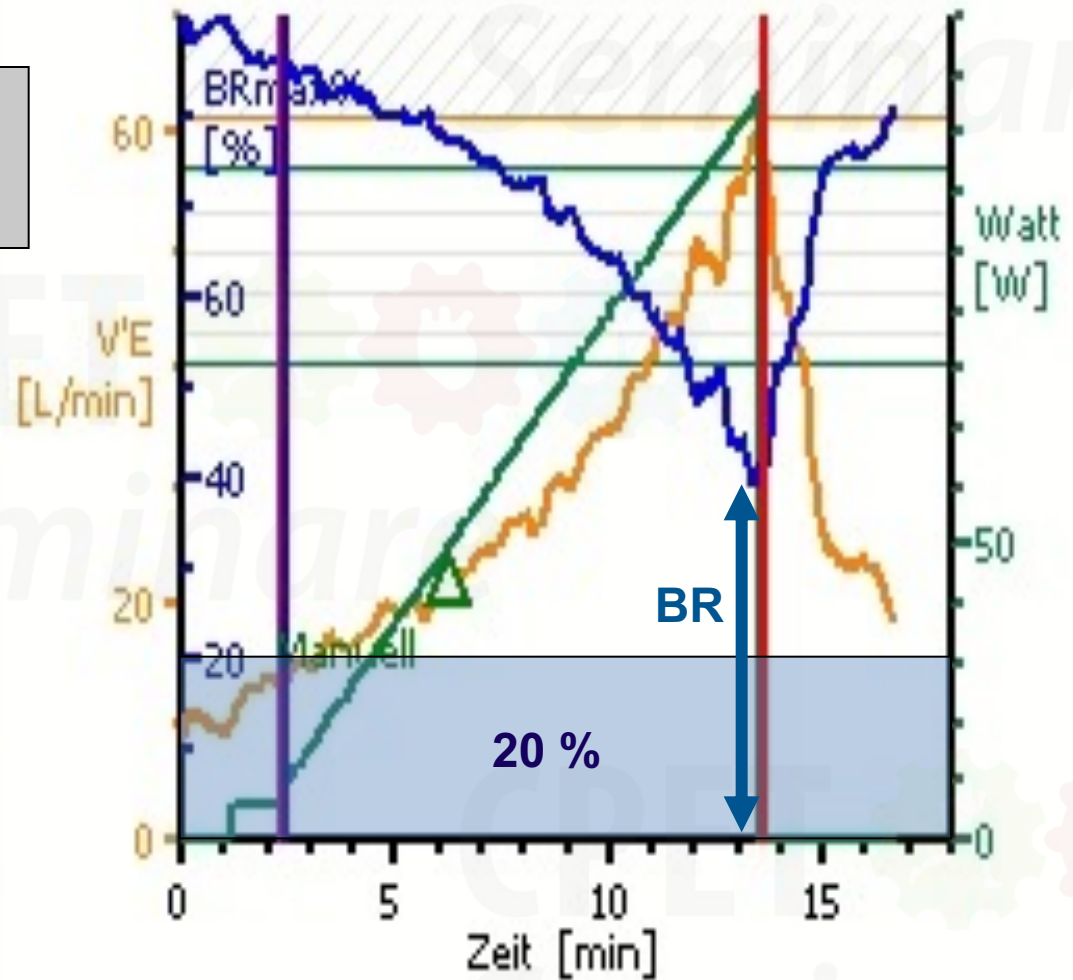
restriktiv: $t(i) / t(\text{tot})$
50%
auch extrathorakale
Stenose

Zeichen der ventilatorischen Begrenzung

1. BR ausgeschöpft (<20%)
2. Strömungsbegrenzung VT Intrabreath
3. dynamische Überblähung
4. BF > 50 AZ/min *wichtig bei restriktiver Störung*

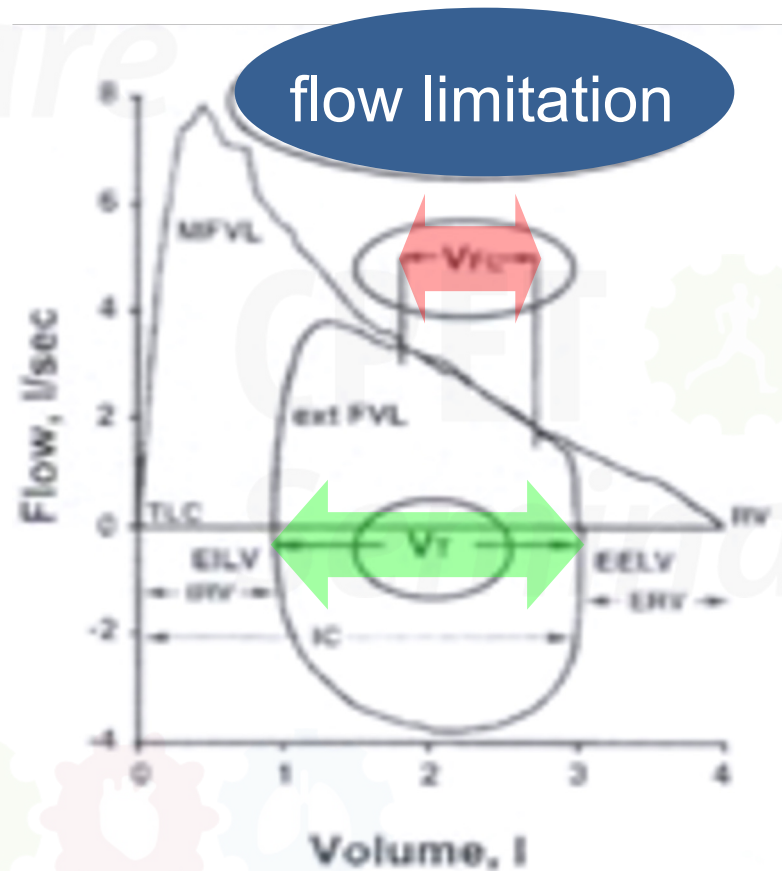
1. BR ausgeschöpft (BR <20% oder < 15L)

$$\text{BR}(\%) = \frac{\text{MVV} - \text{VE}_{\text{max}}}{\text{MVV}} \cdot 100$$



Panel 1 (9FG)

2. Strömungsbegrenzung VT Intrabreath



V_{FL} % von V_T

normal

0 %

leicht

< 30 %

mittel

30-50 %

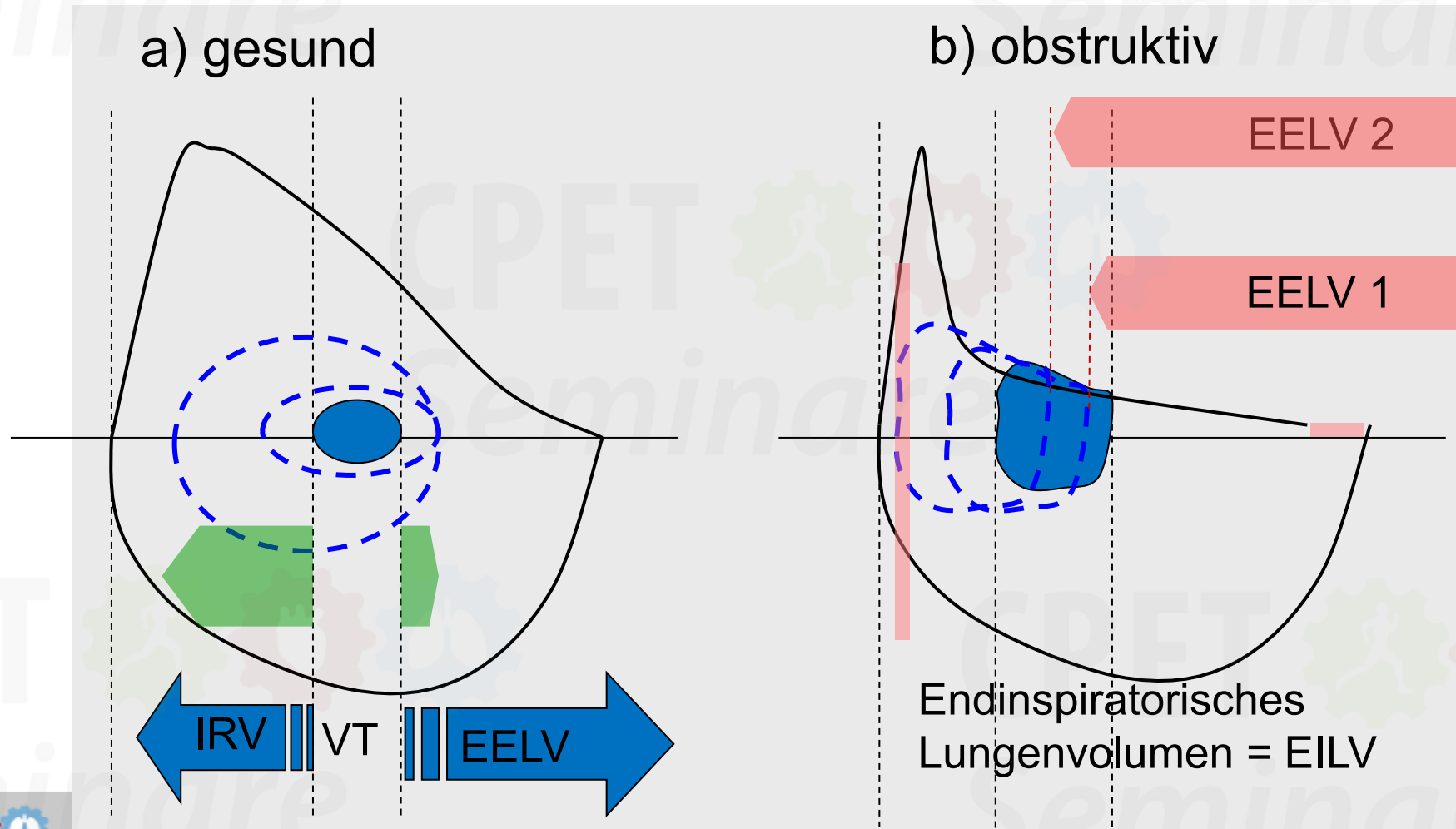
schwer

> 50 %

Johnson BD. Et al Chest 1999

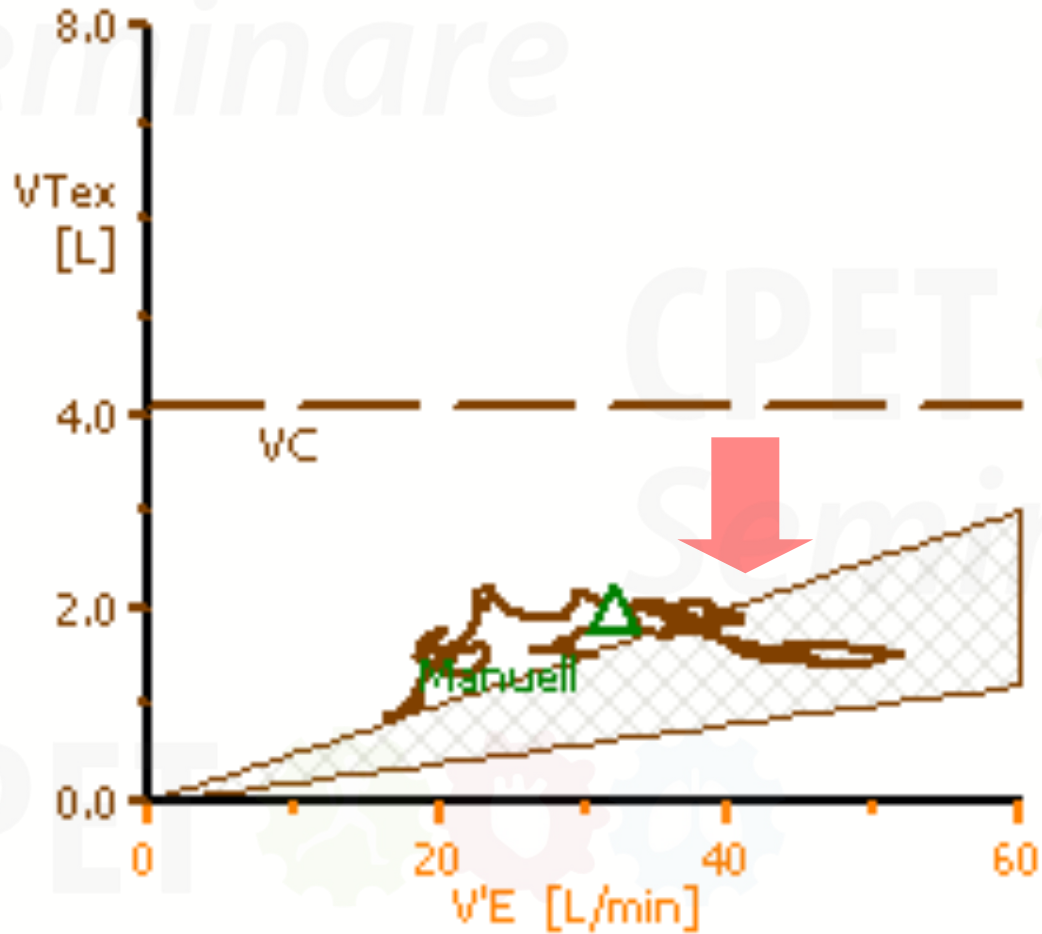
3. Dynamische Überblähung

Steigerung **VT** im verfügbaren Ventilationsraum



Endexpiratorisches Lungenvolumen = EELV „entspricht“ ITGV

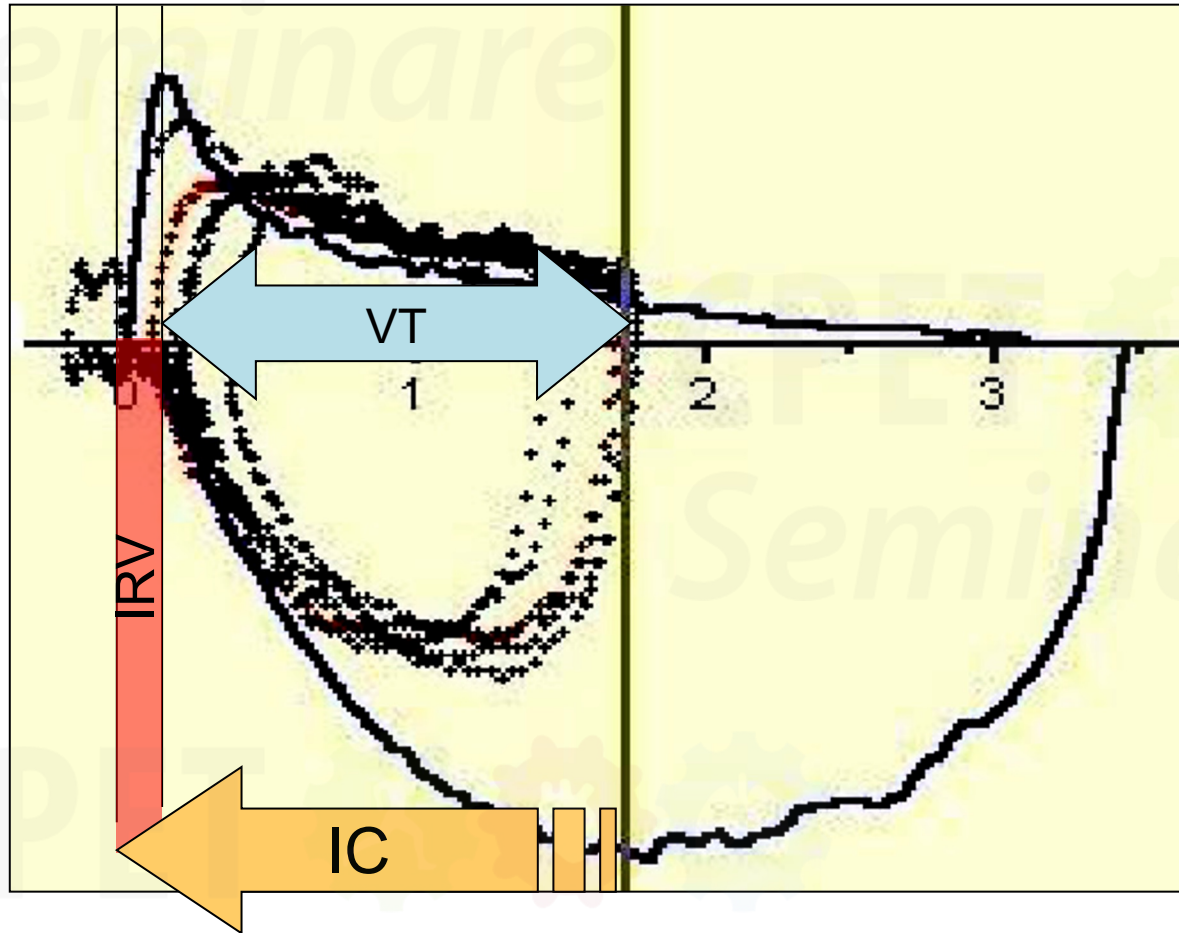
3. Dynamische Überblähung



Abnahme des Atemzugvolumens als Folge der dynamischen Überblähung

Panel 7 (9FG)

4. ventilatorische Begrenzung VT/IC



$VT/IC > 0,8$
(Vogiatzis2005)

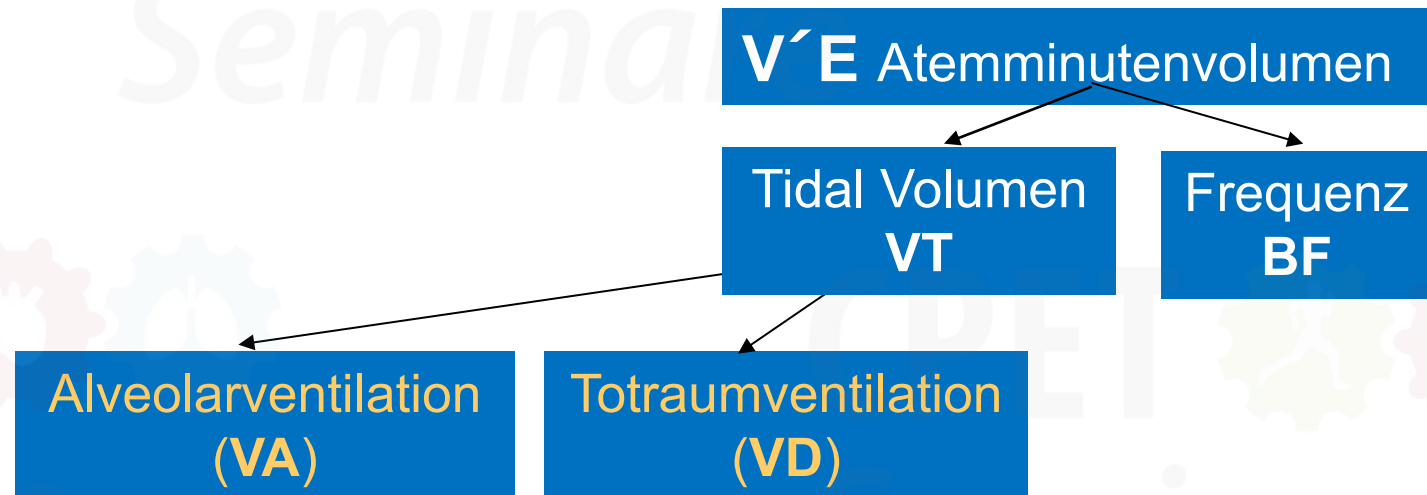
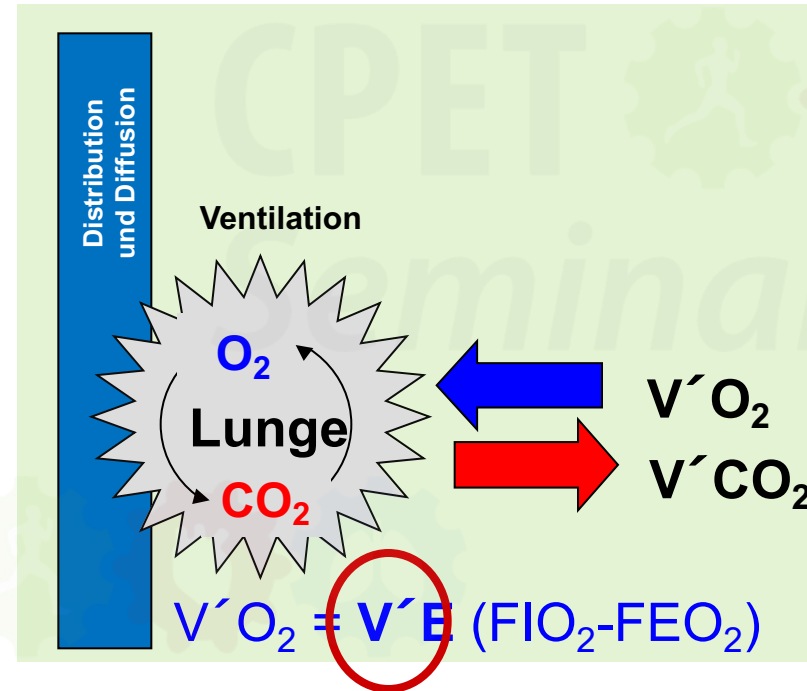
IRV: Inspiratorisches Reservevolumen

IC: Inspiratorische Kapazität

VT/IC: Tidalvolumen / Inspiratorische Kapazität

Totraum-Ventilation

BGA unverzichtbar



Totraumventilation (VD)

- **Anatomischer - (VD a)**

Mund (*Maske / Mundstück !!*), Nase, Pharynx, Larynx, Trachea, Bronchien und Bronchiolen (also Atemwege)

- **Funktioneller - (VD f)**

Der Anteil des Luftraumes, der nicht am Gasaustausch teilnimmt

Bei gesunden Jugendlichen

VD a etwa gleich VD f \approx 150 ml (in Ruhe) = 20-30% von VT

Alveolarventilation (VA)

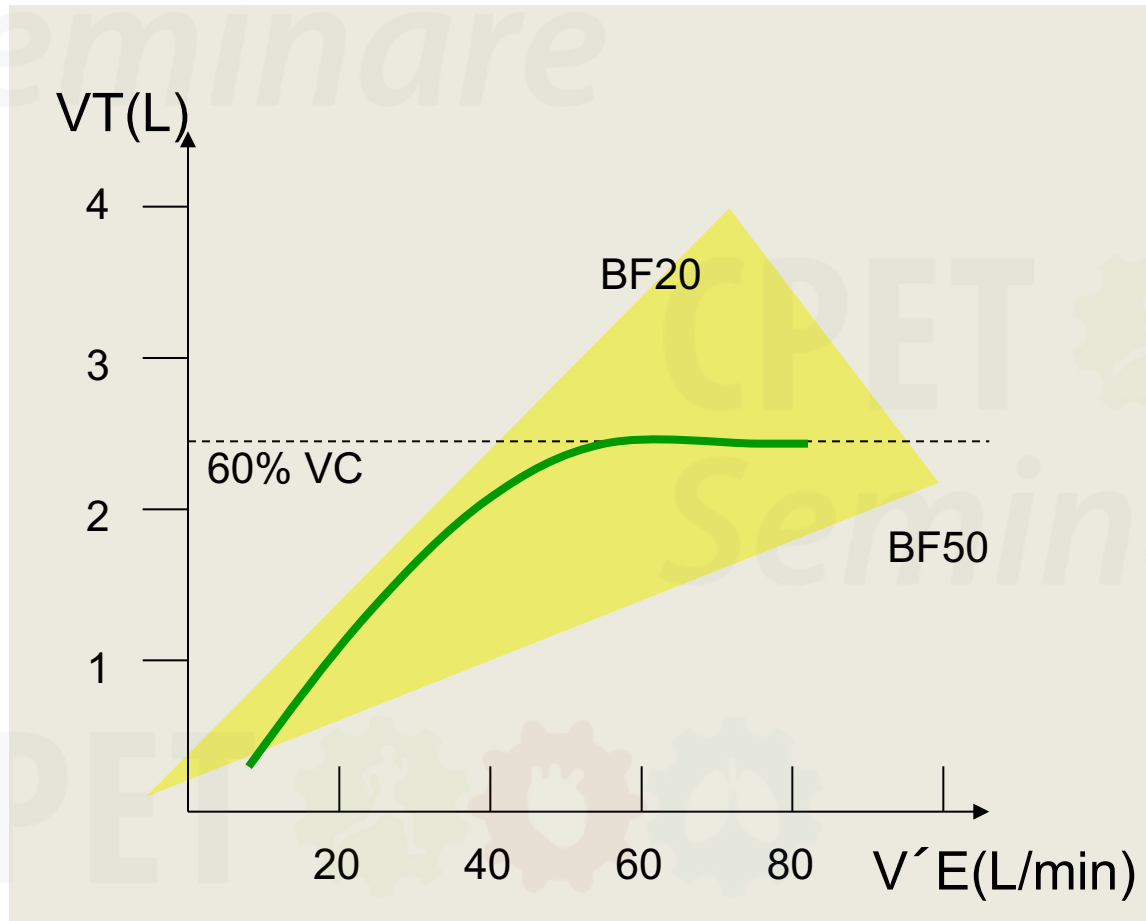
VA = Anteil der Gesamtventilation, die für den Gasaustausch wirksam ist, daher

PaCO₂ proportional zu VA

Berechnung $VA = \dot{V}'_{CO_2} * k / PaCO_2$

Blutgasanalyse
unverzichtbar!

Atemmuster und Totraumanteil



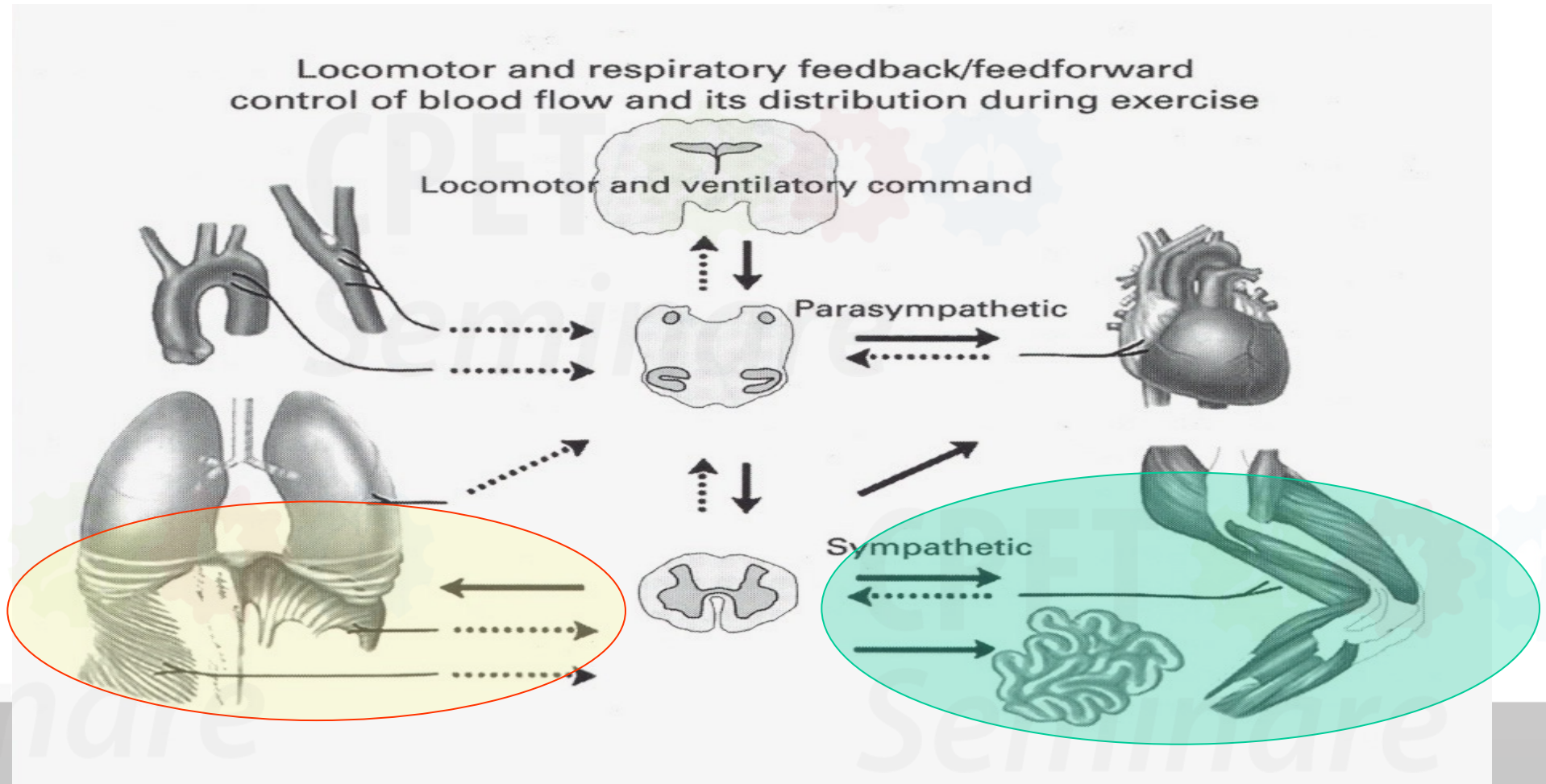
Langsame tiefe Atmung
(VT groß, BF niedrig) hoher Anteil
Alveolarventilation, geringer Anteil
Totraumventilation

Flache schnelle Atmung
(VT klein, BF hoch)
Geringe Alveolarventilation, hoher
Anteil Totraumventilation

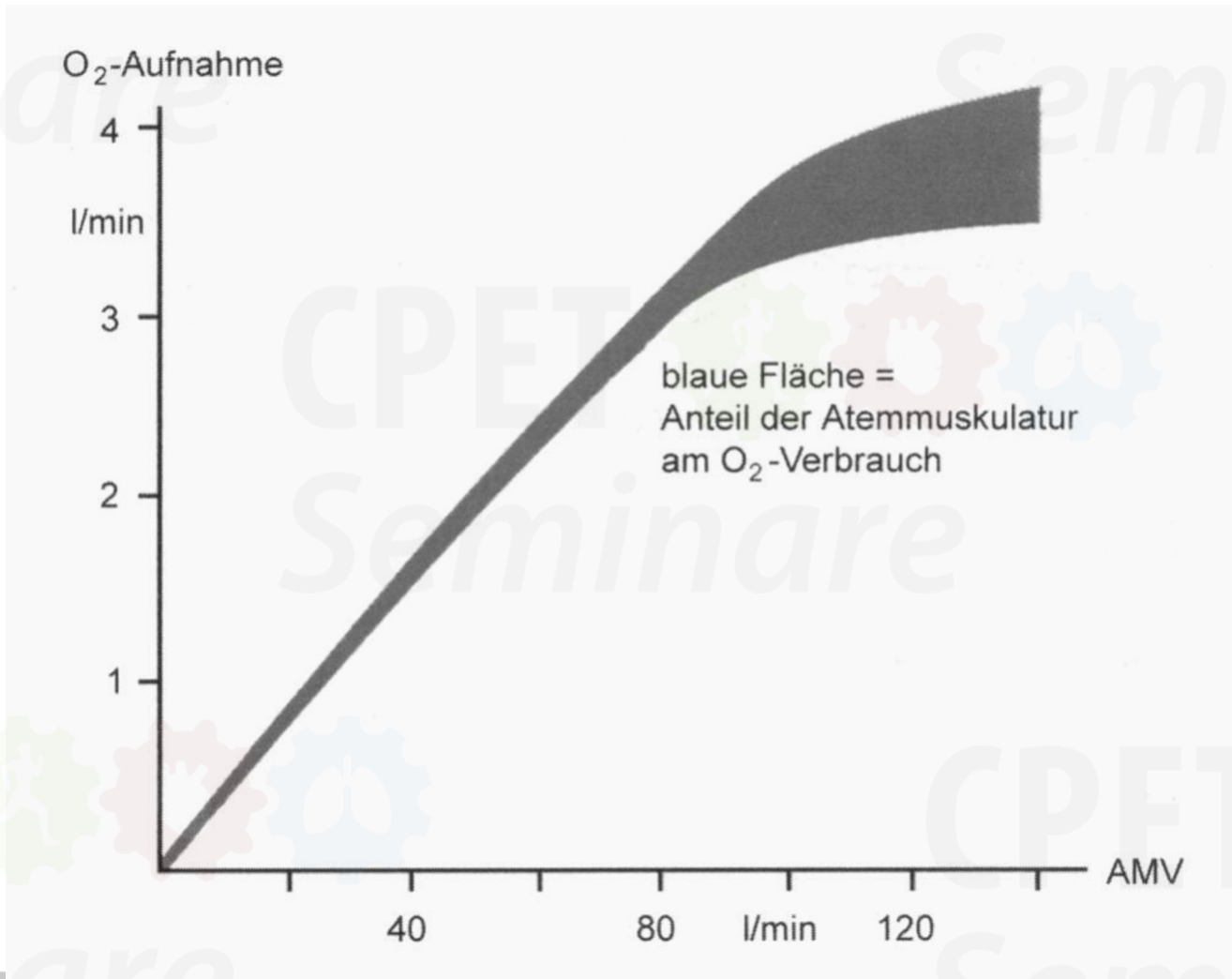
CPET und Muskulatur

Atemmuskulatur

periphere Muskulatur



Anteil Atemmuskulatur an $\dot{V}O_2\text{max}$



Anteil Atemmuskulatur am Umsatz / $\dot{V}O_2$

Ruhe:

normal

ca. **4%** Anteil an $\dot{V}O_2$

schwere COPD

ca. **30%** Anteil an $\dot{V}O_2$

Belastung:

untrainiert:

ca. **10 %** Anteil an $\dot{V}O_{2\text{peak/max}}$

hochtrainiert:

ca. **15 %** Anteil an $\dot{V}O_{2\text{peak/max}}$

COPD:

bis **50 %** Anteil an $\dot{V}O_{2\text{peak/max}}$

Atem- versus Arbeitsmuskulatur

Blut-Umverteilung:

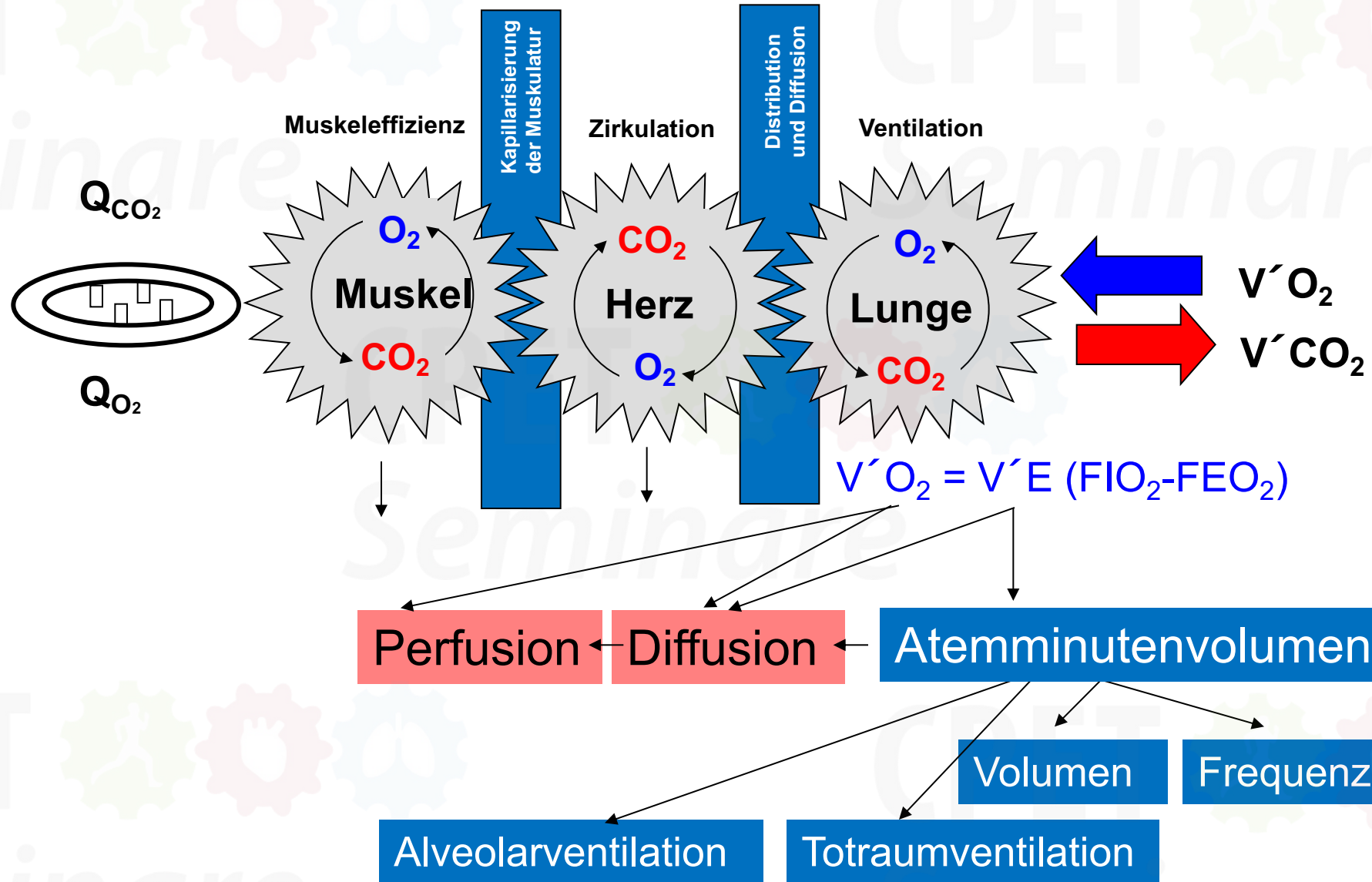
Beine → *Atemmuskel*

vice versa ??

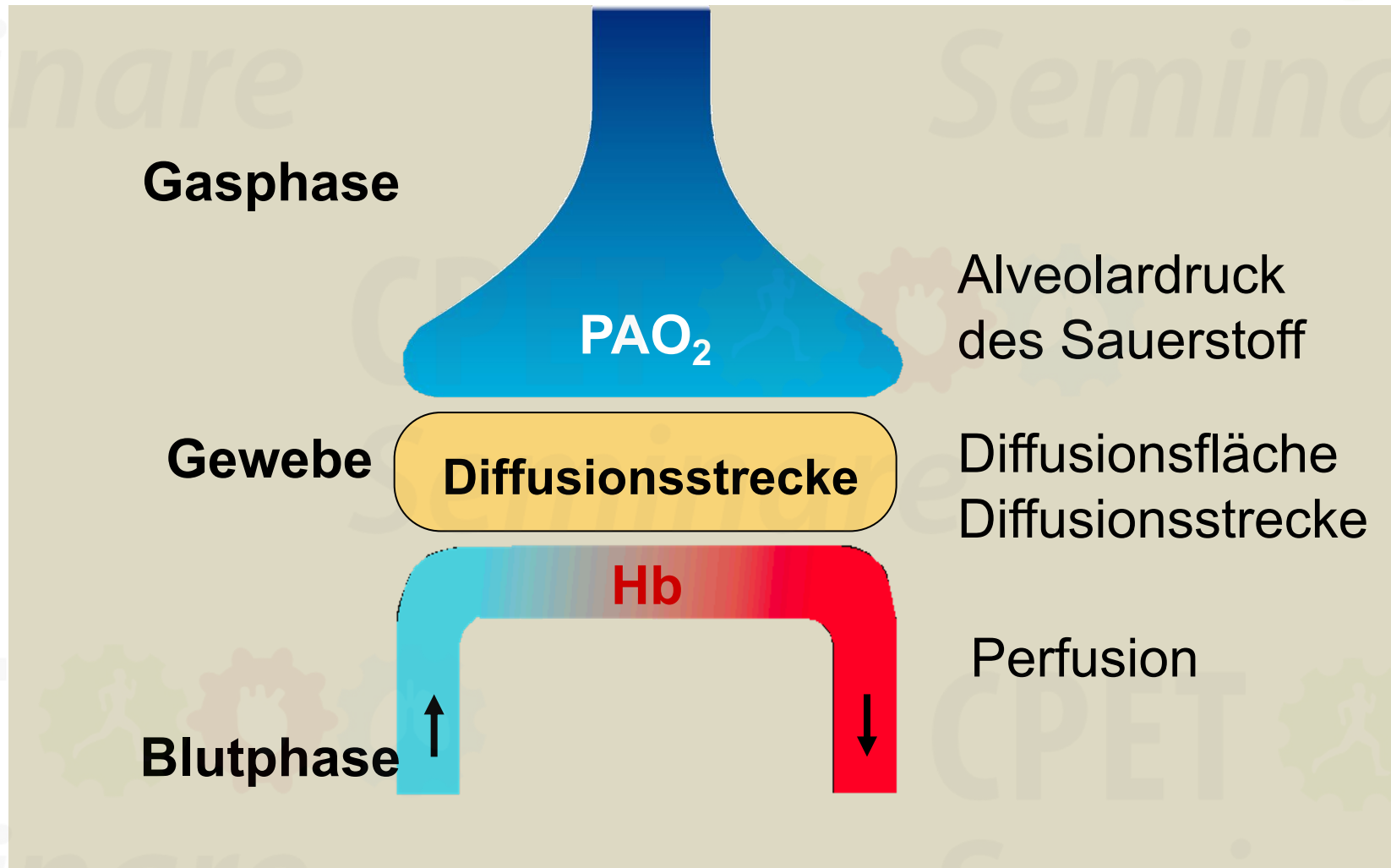
Atemmuskulatur und periphere Muskulatur sind Konkurrenten um Durchblutung und damit Anteil an $\dot{V} O_2$ peak/max bei Ausbelastung

- Steigerung der Belastungsdauer im *constant work test* mit 80-90% $\dot{V} O_2$ max bei Leistungssportlern (Radsport) *(Harms et al, Bouttelier et al)*
- bei COPD durch hohen Anteil der Atemmuskulatur an $\dot{V} O_2$ Belastung durch höheren tension time Index des Zwerchfells bei gleicher Ventilation *(Wanke, Th et al, Formanek D et al)*
- bei CHF auch durch sekundäre Beanspruchung Atemmuskulatur *(Meyer FJ et al Circulation 2001, Mancini DM et al Circulation 1995, Hughes PD et al Am J Respir Crit Care Med 1999)*

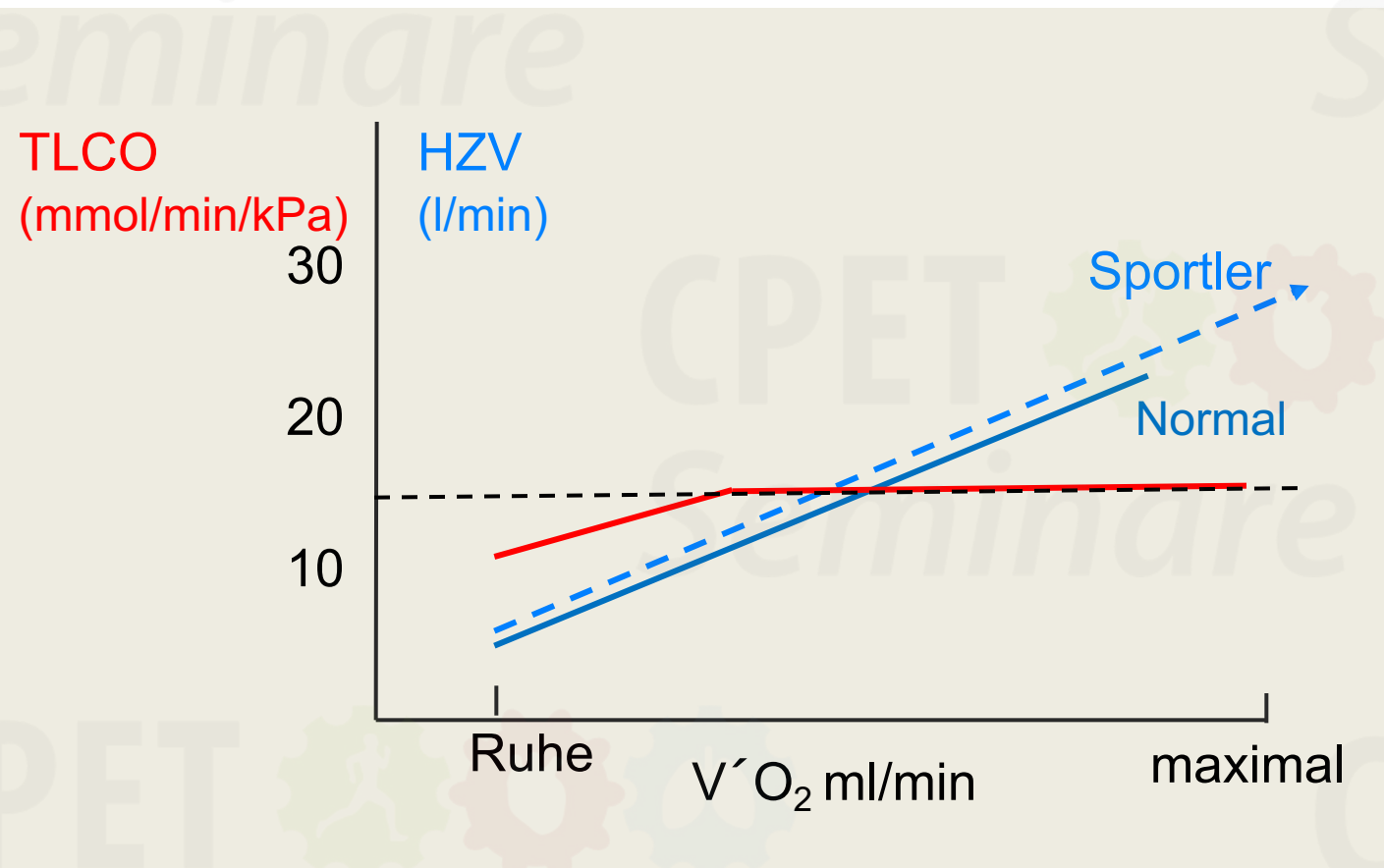
Perfusion und Diffusion



Diffusion (Transferfaktor)



Anpassung der Diffusion an Belastung

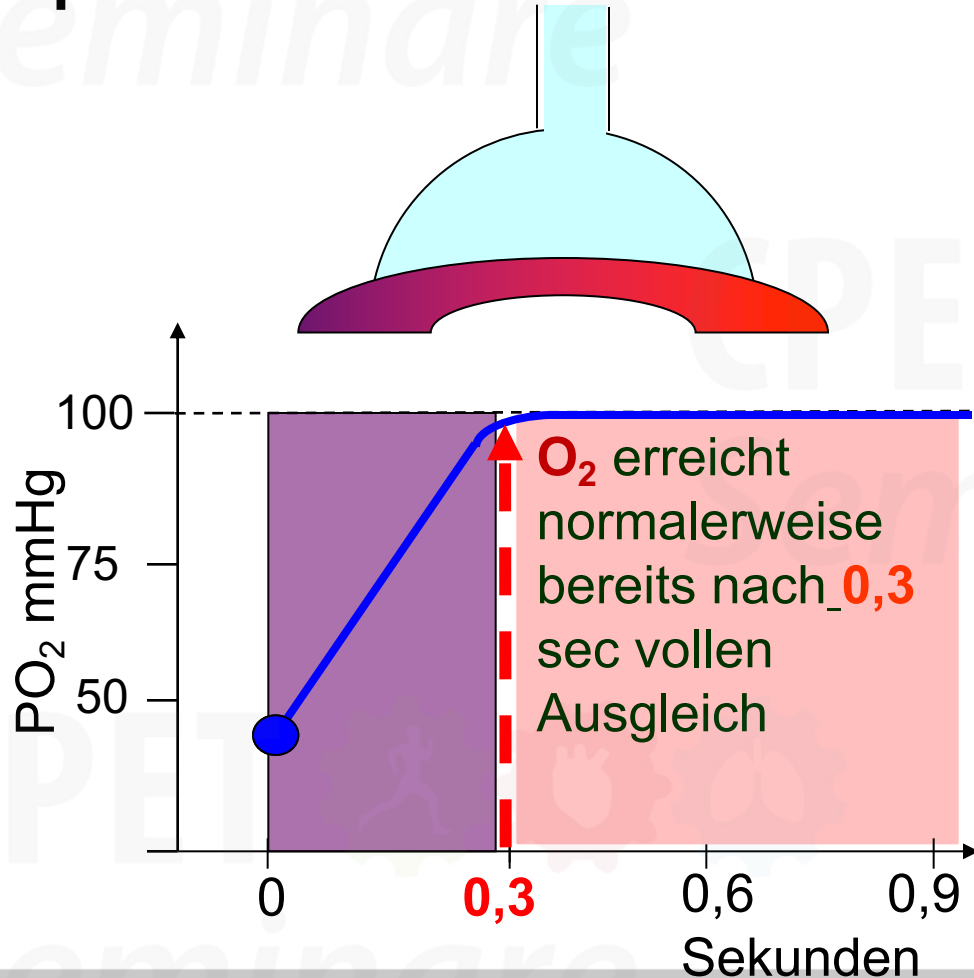


Zunahme TLCO nur bis etwa 60% $\dot{V}O_2\text{max}$

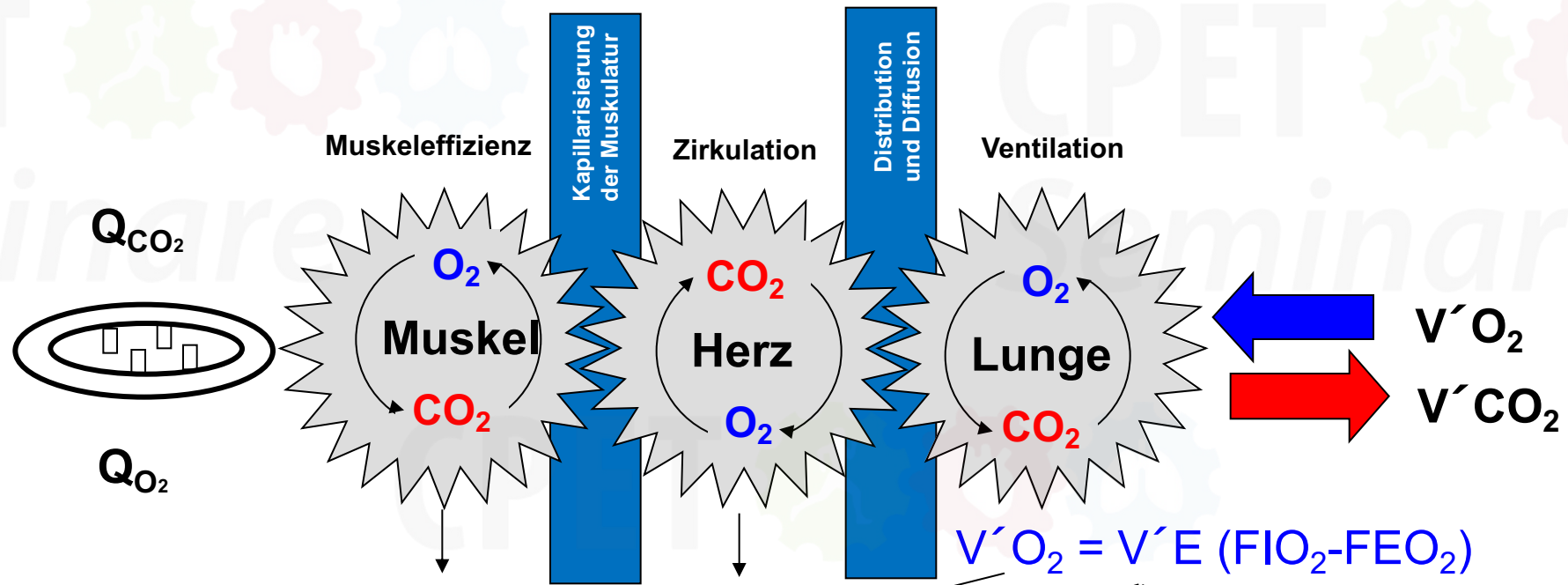
Wesentlicher Faktor ist die Begrenzung der Lungenperfusion

Anpassung der Diffusion an Belastung

Kapillarkontaktzeit



Kontaktzeit verkürzt sich mit
Zunahme der HR,
wird ab 180 b/min grenzwertig klein



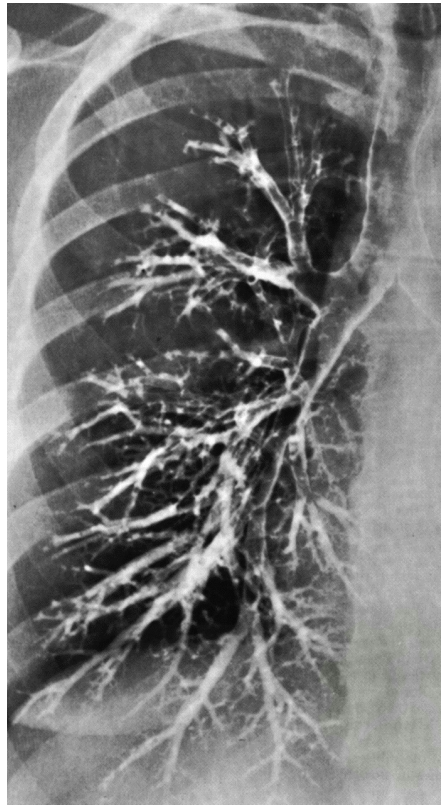
Perfusion ← Diffusion ← Atemminutenvolumen

Alveolarventilation ← Totraumventilation ← Volumen ← Frequenz

Distributionsstörungen

BGA unverzichtbar

Distribution



Ventilation > Perfusion



VA / Q_c 1.2

Ventilation \approx Perfusion

VA / Q_c 1.0

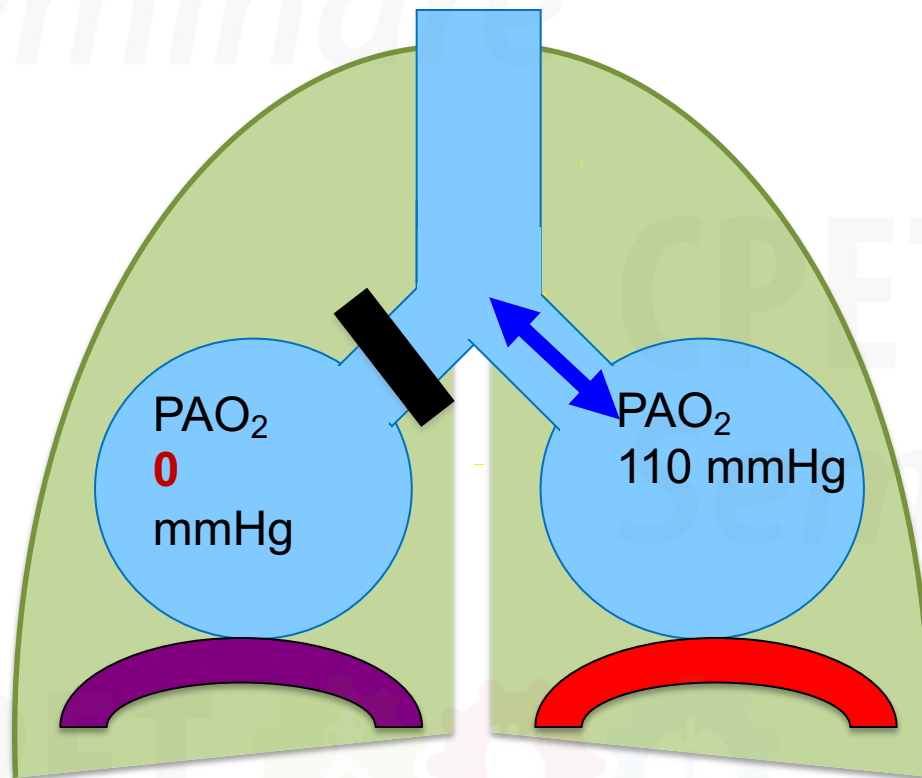
Ventilation < Perfusion



VA / Q_c 0.8

Wird durch Zunahme von Q_c und VA unter Belastung homogener

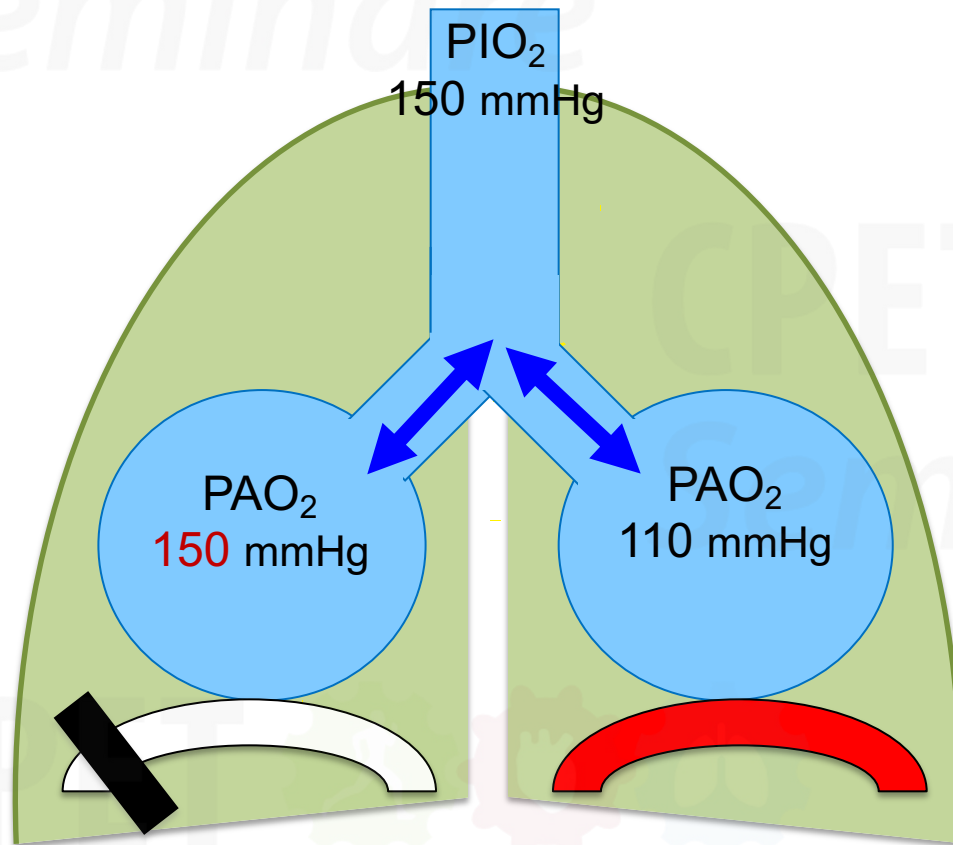
Distributionsstörung - Shunt



Zufuhr von 100% O₂ kann Hypoxämie nicht voll ausgleichen

CPET zeigt unspezifische Veränderungen

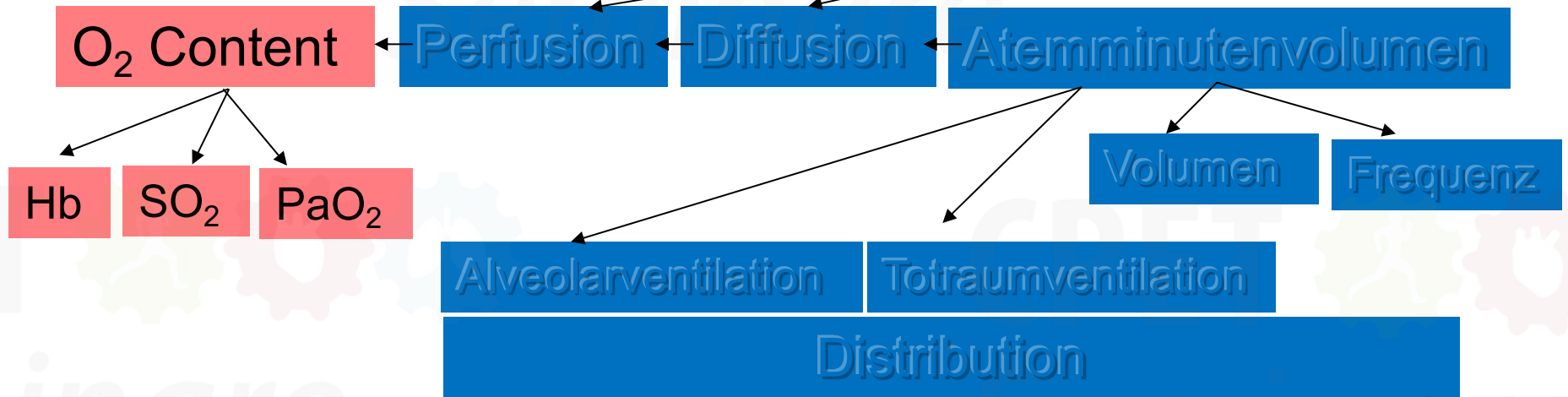
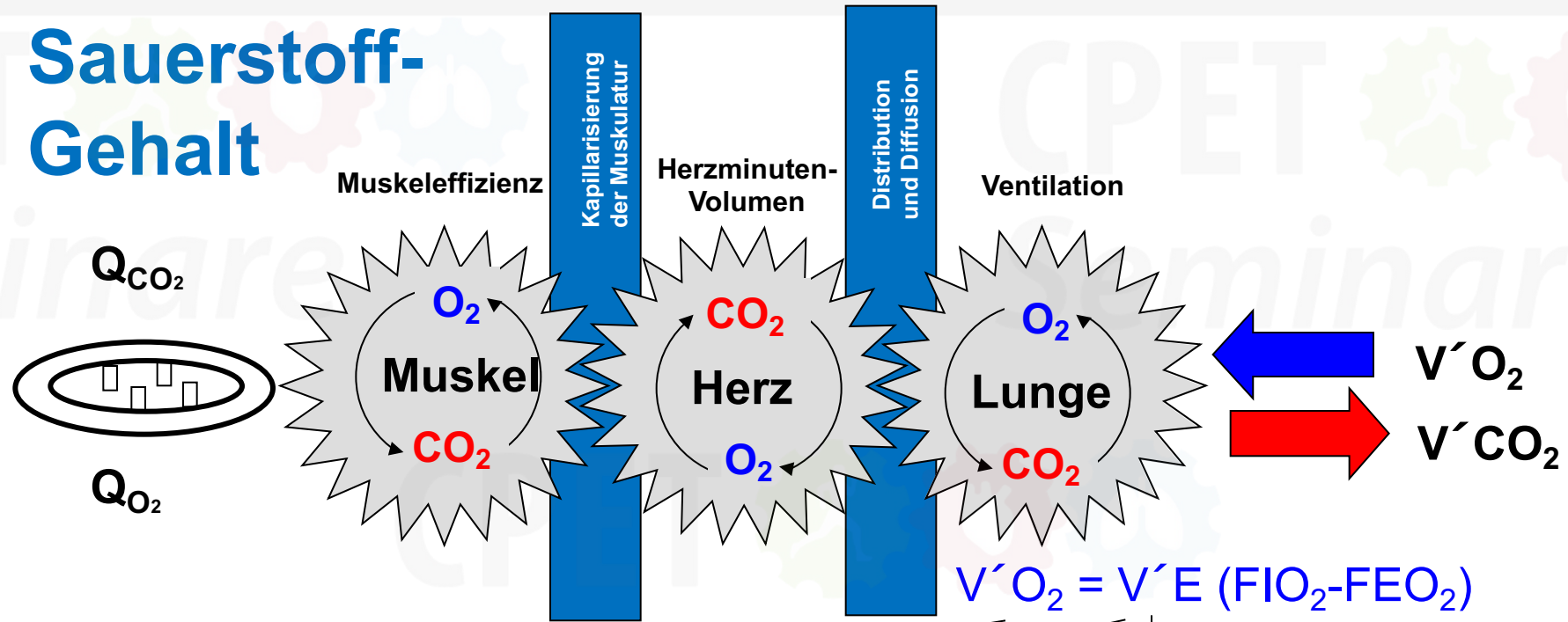
Distributionsstörung - Totraumventilation



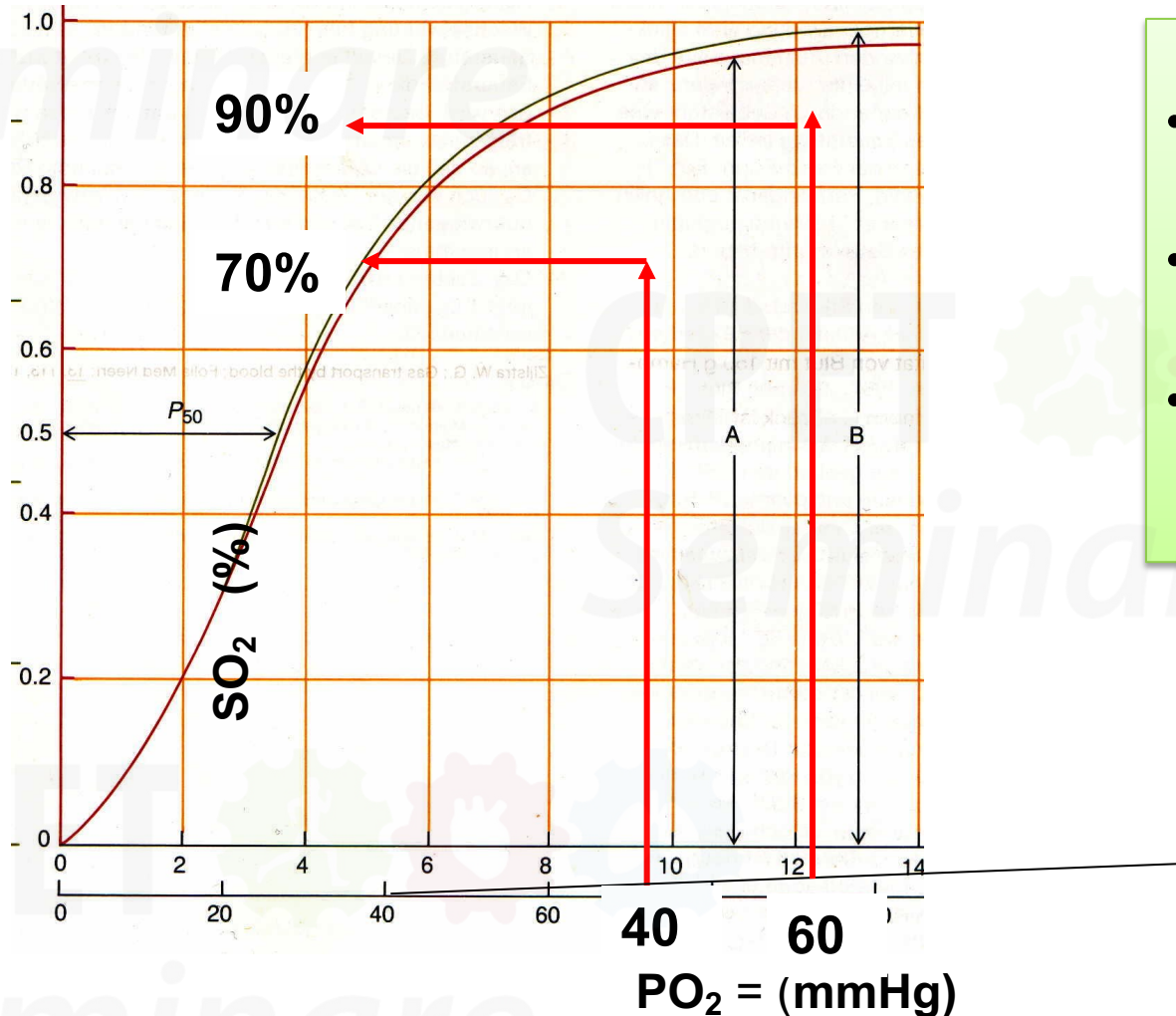
Massiv erhöhte
Totraumventilation, da kein
Gastransfer stattfindet

CPET zeigt spezifische
Veränderungen

Sauerstoff-Gehalt



O2 - Bindungskurve



- Die Beziehung SO_2 und O_2 -Druck ist eine **S-förmige** Kurve
- ein hoher O_2 - Druck ist für Zunahme der Sättigung nicht relevant
- Bei niedriger Sättigung kann noch ein relevanter PO_2 generiert werden

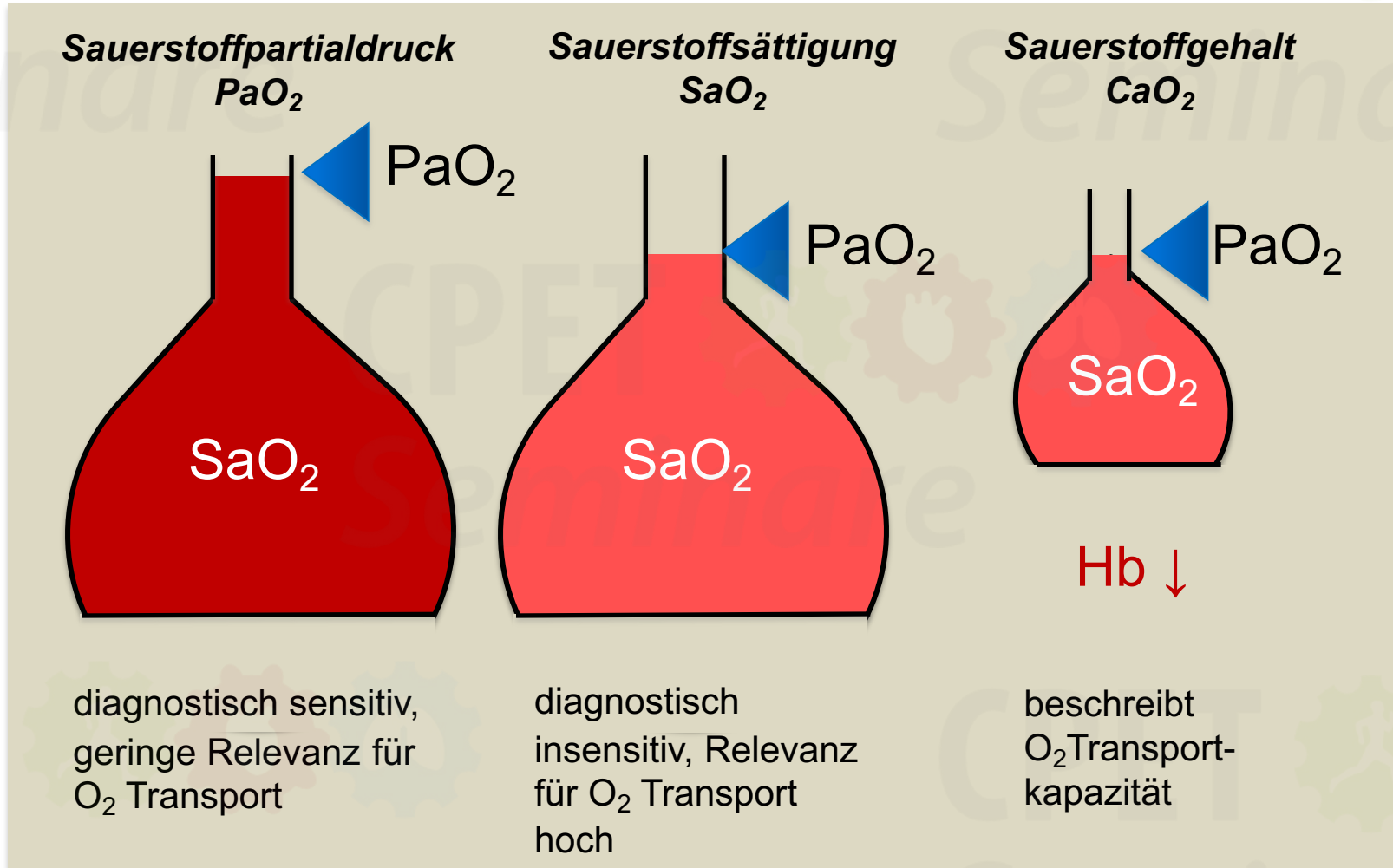
O_2 Content = O_2 -Gehalt (ml/100 ml)

- CaO_2 **C** = Content = Inhalt
- Die **Menge O_2 im arteriellen Blut** hat die Einheit
ml O_2 pro 100 ml Blut
- Content abhängig von O_2 -Sättigung und Hb

1g Hb bindet $\approx 1,34$ ml O_2
Hüfner'sche Zahl

$$\begin{aligned} CaO_2 &= SaO_2 \times Hb \times 1,34 \\ &= 96\% \times 16 \times 1,34 \\ &= 20,6 \text{ ml } O_2 / 100\text{ml} \end{aligned}$$

PaO₂ SaO₂ und CaO₂ klinische Relevanz



In einer halbvollen Magnumflasche ist mehr Champagner
als in einer vollen Piccolo Flasche !



Wie heißen die verschiedenen Flaschengrößen?

Die Piccolo fasst 0,25 Liter

Die Bouteille fasst 0,75 Liter

Die Magnum fasst 1,5 Liter

Die Jeroboam fasst 4,5 bis 5 Liter

Der Methusalem bzw. die Impériale fasst 6 Liter

Die Salmanazar fasst 9 Liter

Die Balthazar fasst 12 Liter

Die Nebukdadnezar fasst 15 Liter

Die Goliath fasst 18 Liter

Die Salomon fasst 20 Liter

Für die Allgemeinbildung (Achtung evtl. Prüfungsfrage)