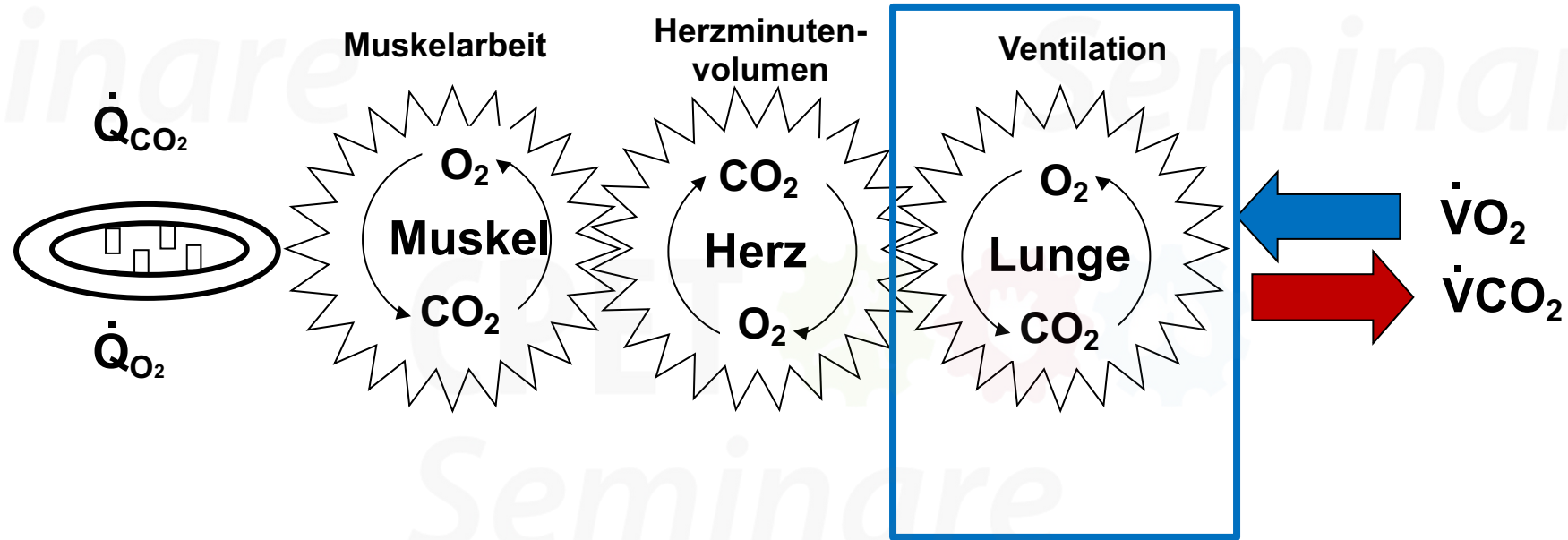


CPET
Seminare

CPET
Seminare

Physiologie - Pathophysiologie
Zirkulation

Determinanten für $\dot{V}'O_2$ - Ventilation

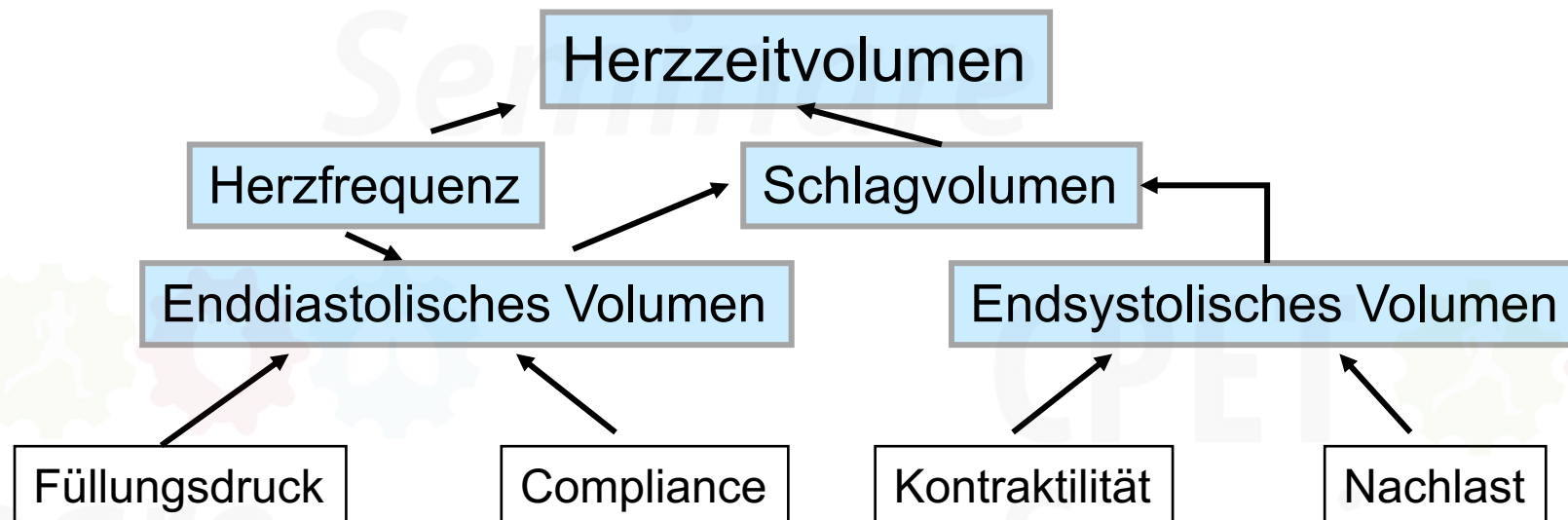
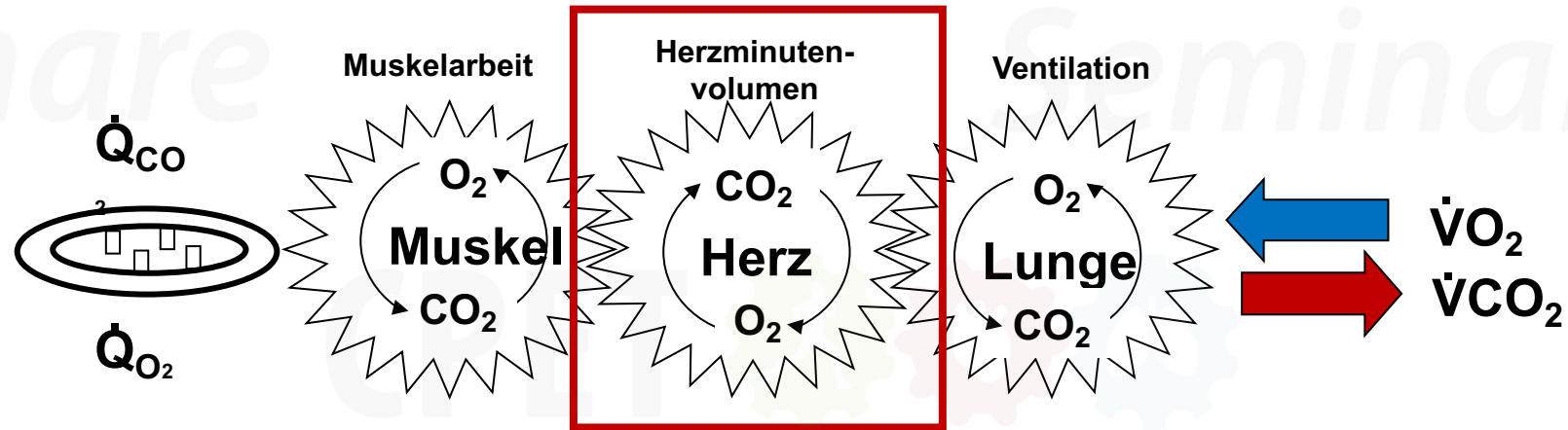


Sauerstoffaufnahme = Atemminutenvolumen x Sauerstoffextraktion

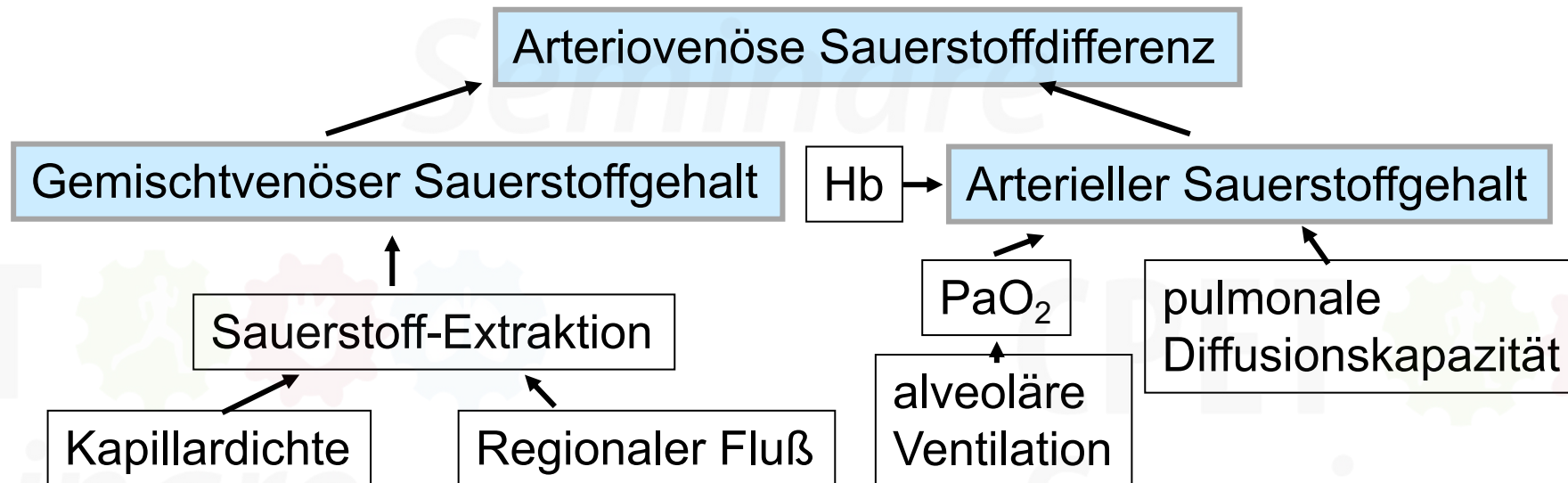
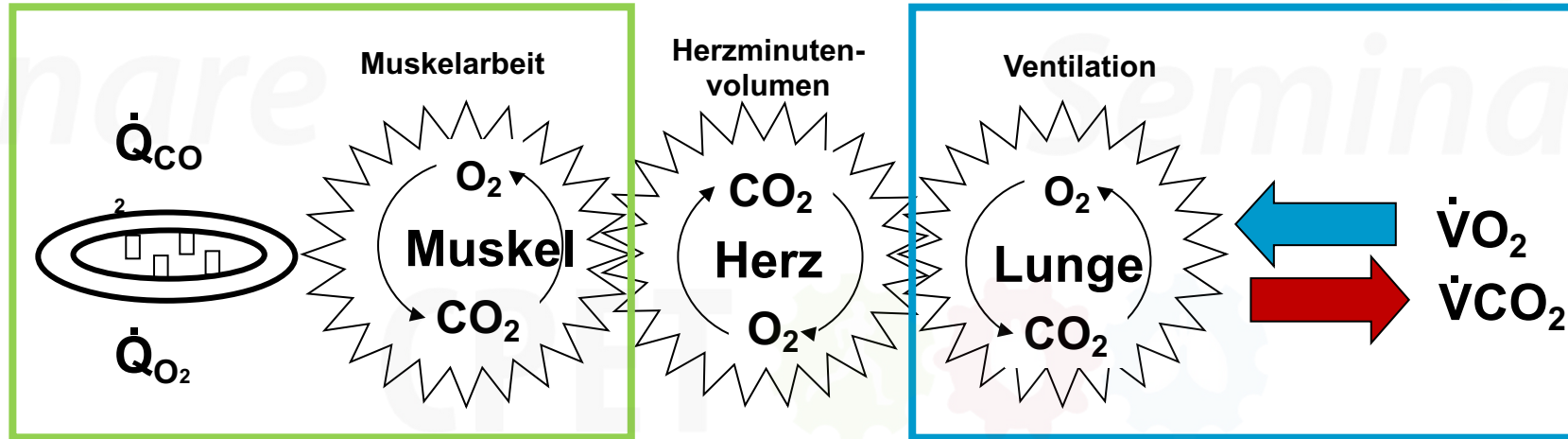
$$\dot{V}'O_2 = V_E \times (FiO_2 - FeO_2)$$

$\dot{V}'O_2$ max ist abhängig von der maximal möglichen Ventilation

Determinanten für $\dot{V}O_2$ - Zirkulation



Determinanten $\dot{V}'O_2$ - Sauerstoffangebot und - extraktion



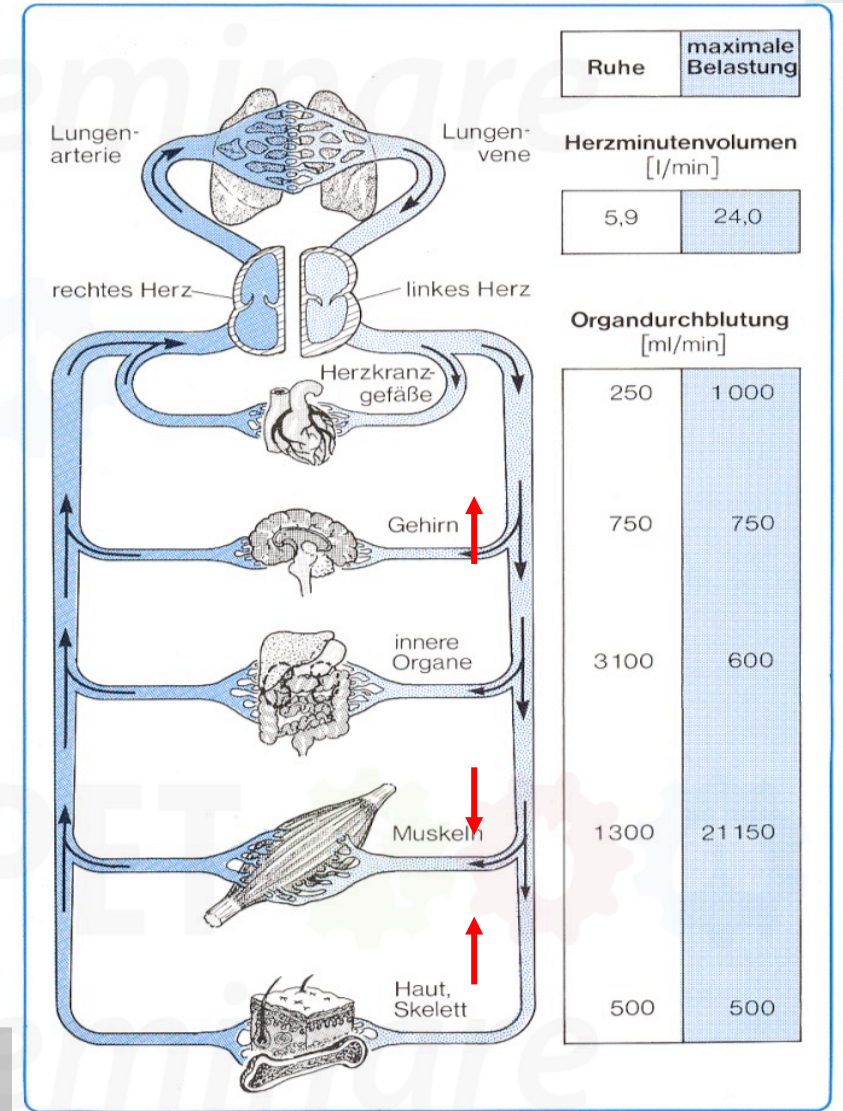
Kardiozirkulatorische Anpassung

Zunahme folgender kardialer Parameter

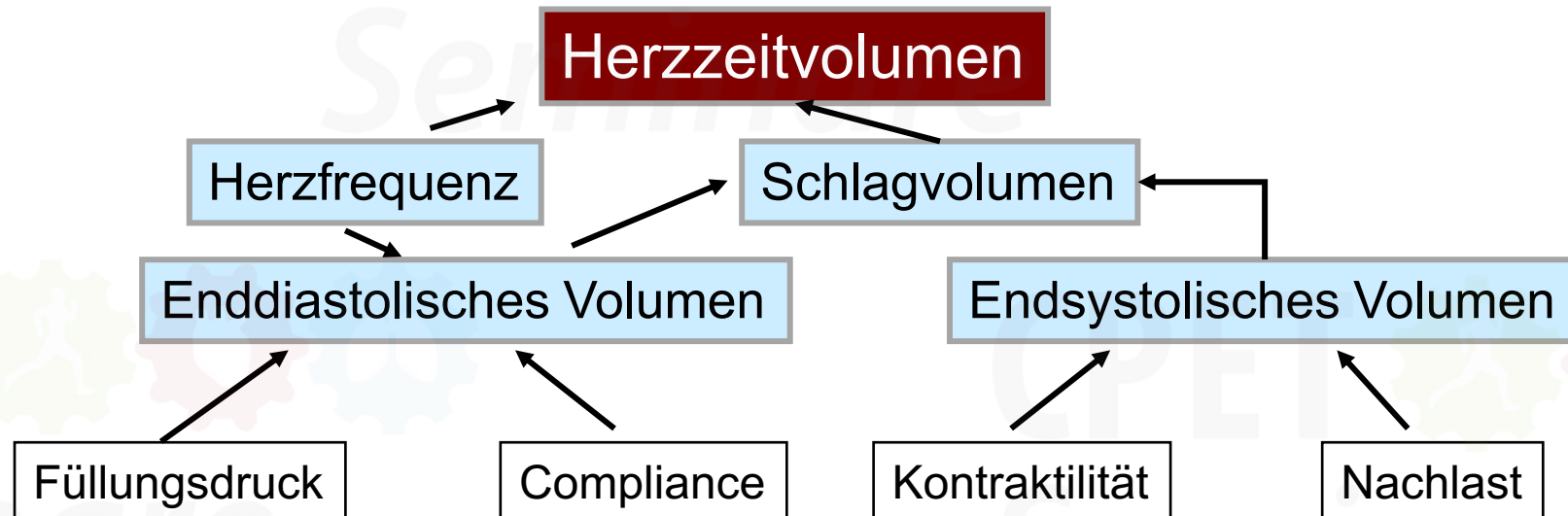
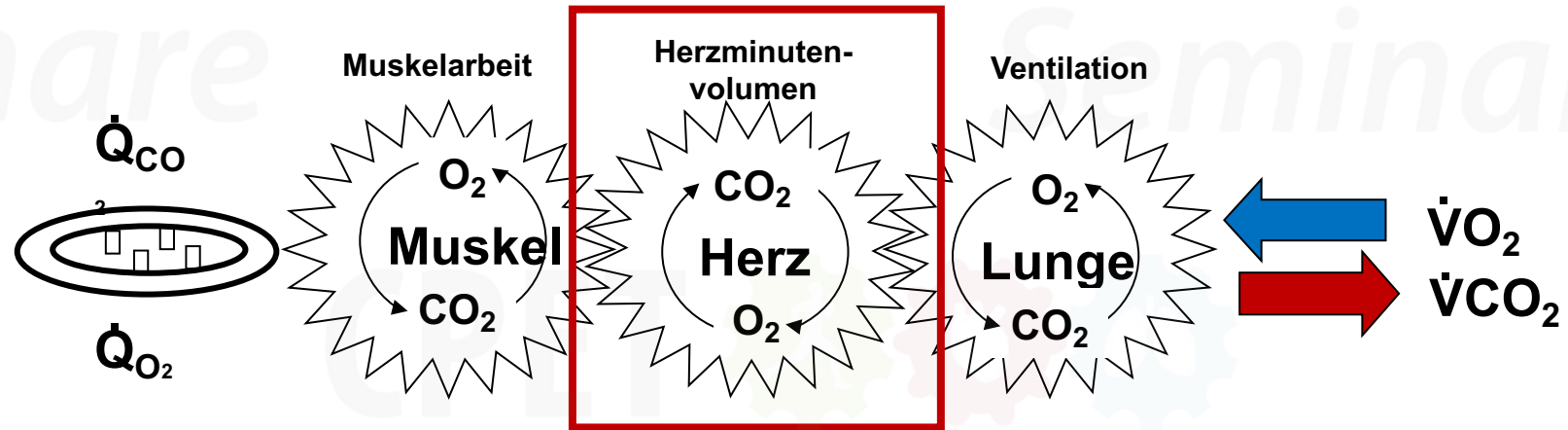
HF: 2- bis 4-fach
SV: 0,5- bis 1-fach
HZV: 4- bis 6-fach
 $V'O_2$: 8- bis 10-fach

Arteriovenöse Ausschöpfung

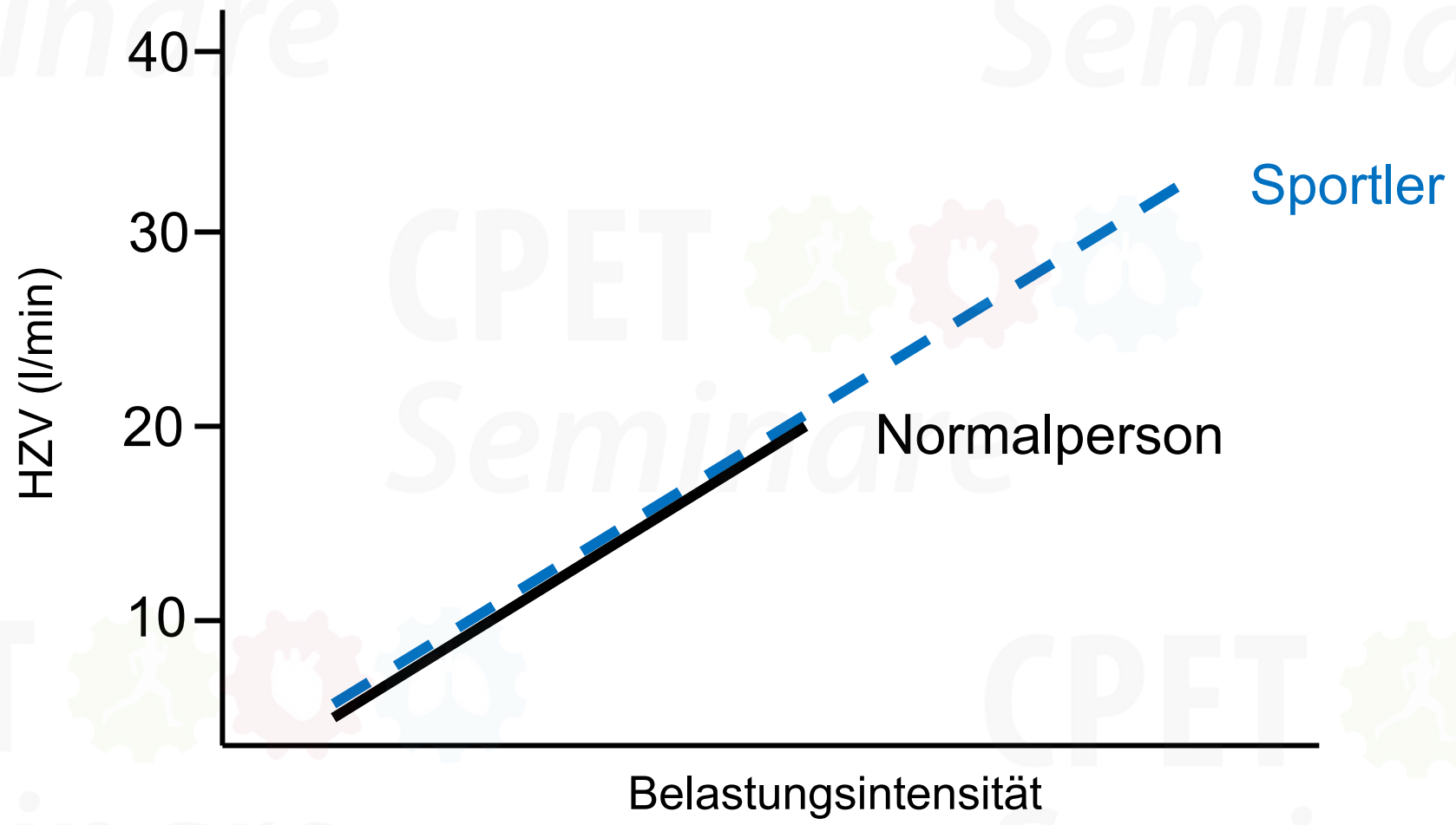
Umverteilung



Determinanten für $\dot{V}O_2$ - Zirkulation



Herzzeitvolumen unter Belastung



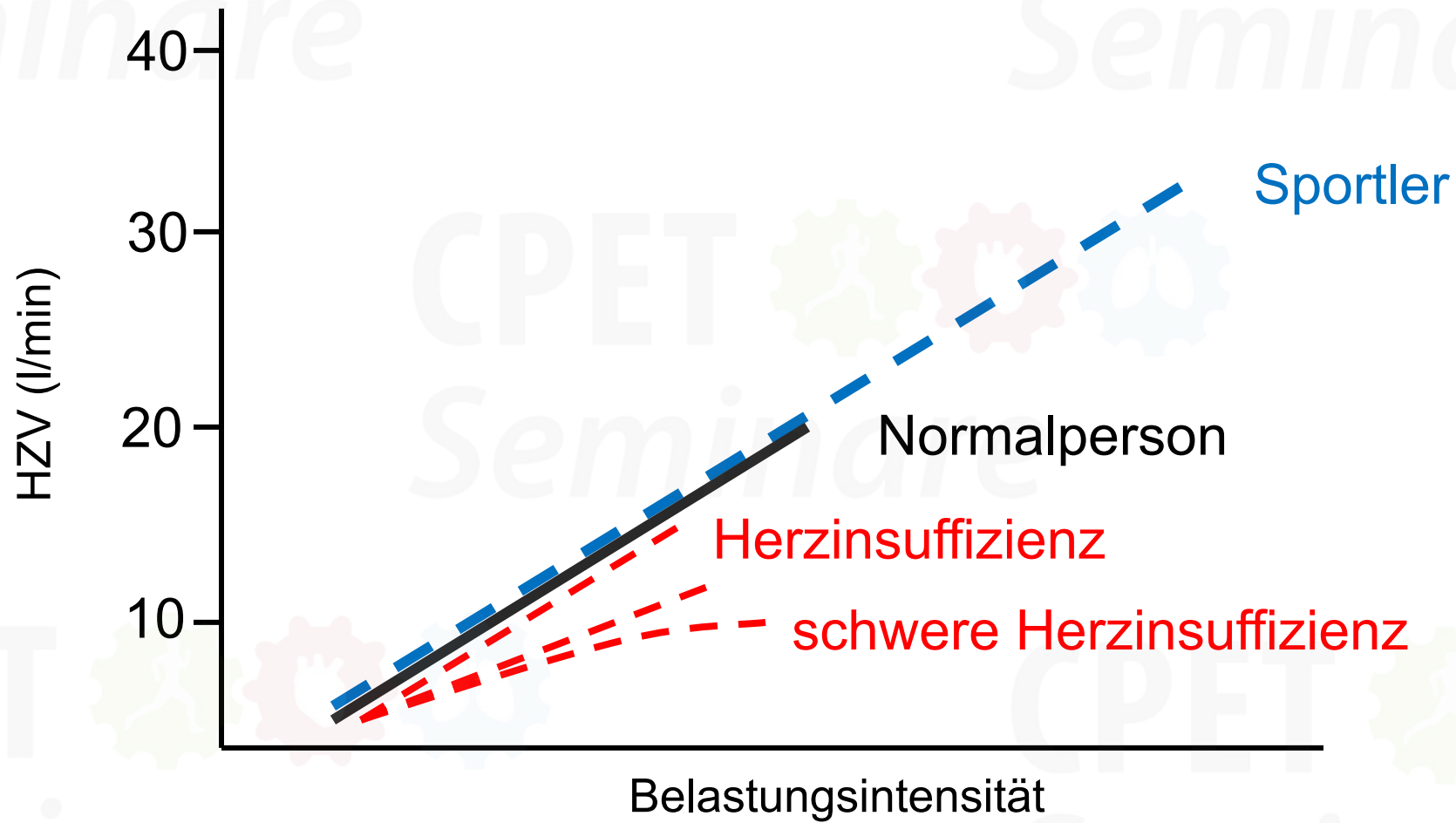
Pathophysiologische Definition der Herzinsuffizienz

„Funktionsstörung des Herzens mit der Folge,

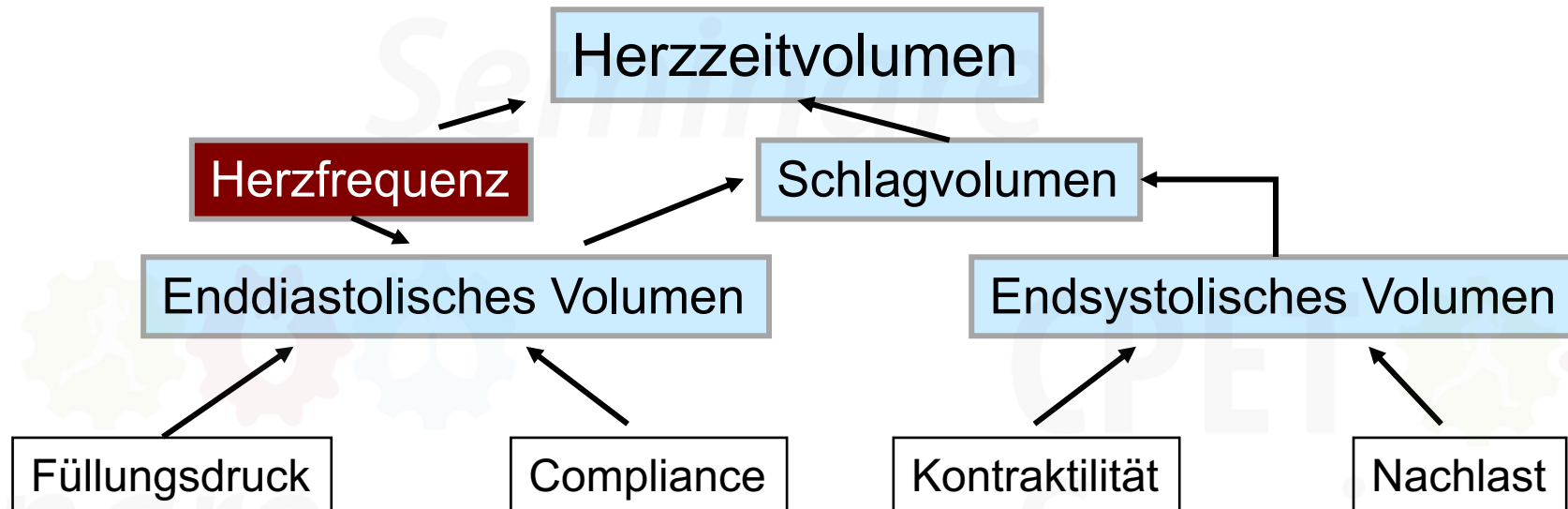
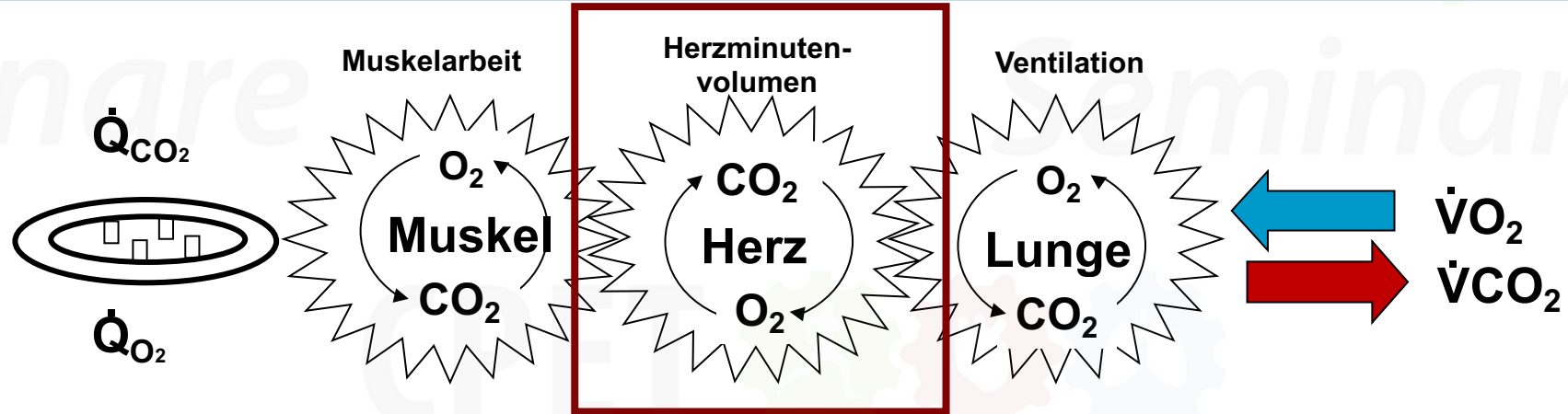
***nicht oder nur durch einen
erhöhten kardialen Füllungsdruck***

ausreichend Blut pumpen zu können,
um den metabolischen Bedürfnissen des Körpers
gerecht zu werden.“

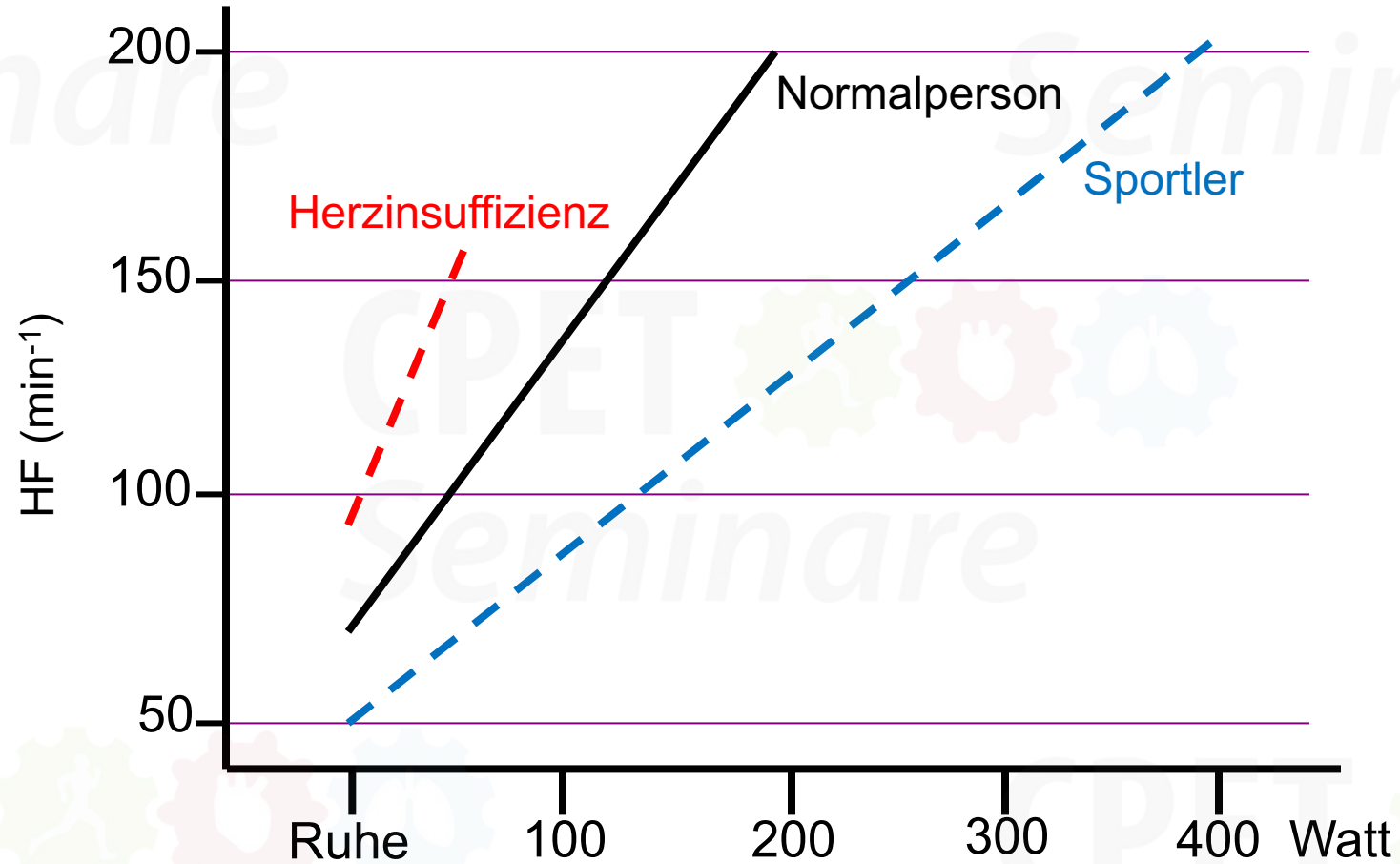
Herzzeitvolumen vs. Belastungsintensität



Pathophysiologie - Herzfrequenzverhalten



Herzfrequenz vs. Belastungsintensität



bei Herzinsuffizienz (reduziertem Schlagvolumen) resultiert erhöhte Herzfrequenz

Herzfrequenz - Einflußfaktoren

1. Alter
2. Art der Belastung (dynamisch - statisch)
3. Körperposition (sitzend - liegend)
4. Fitnesszustand
5. Anwesenheit kardialer, pulmonaler oder pulmonalvaskulärer Erkrankungen
6. Medikamente
7. Blutvolumen und Zusammensetzung
8. Umgebungsbedingungen

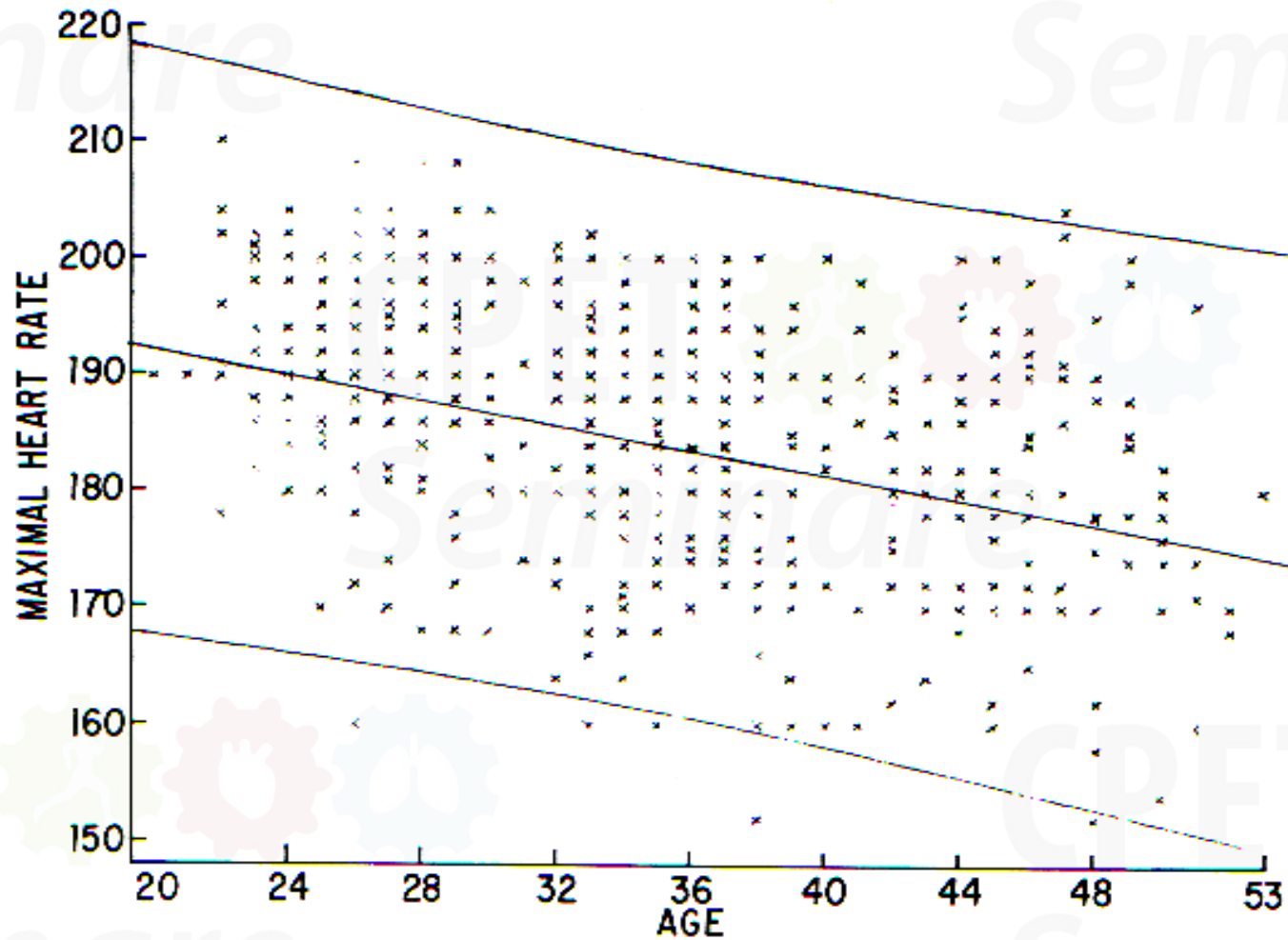
Herzfrequenz und Alter

1. häufigste Berechnungsformel

$$Hf_{\max} = 220 - \text{Alter}$$

2. Unterschätzung in höherem Alter
3. Überschätzung in jungen Lebensjahren
4. Empfehlung:
$$Hf_{\max} = 208 - (0,7 \times \text{Alter})$$
5. Streuung interindividuell $\pm 15/\text{min}$

Herzfrequenz – Streuung



Herzfrequenz Reserve (Heart Rate Reserve - HRR)

Differenz aus **erwarteter** und tatsächlich zum Zeitpunkt maximaler Belastung **erreichter** Herzfrequenz

$$\text{HRR} = \text{HR}_{\text{Soll}} - \text{HR}_{\text{Ist}}$$

Für Patient 60 Jahre: $220 - \text{Lebensalter}$
 $10 = 160 - 150$

Erhöhte HRR z. B. bei

- vorzeitigem Bel.- Abbruch
- Sick-Sinus-Syndrom
- Peripherer Limitation
- Pulmonaler Limitation

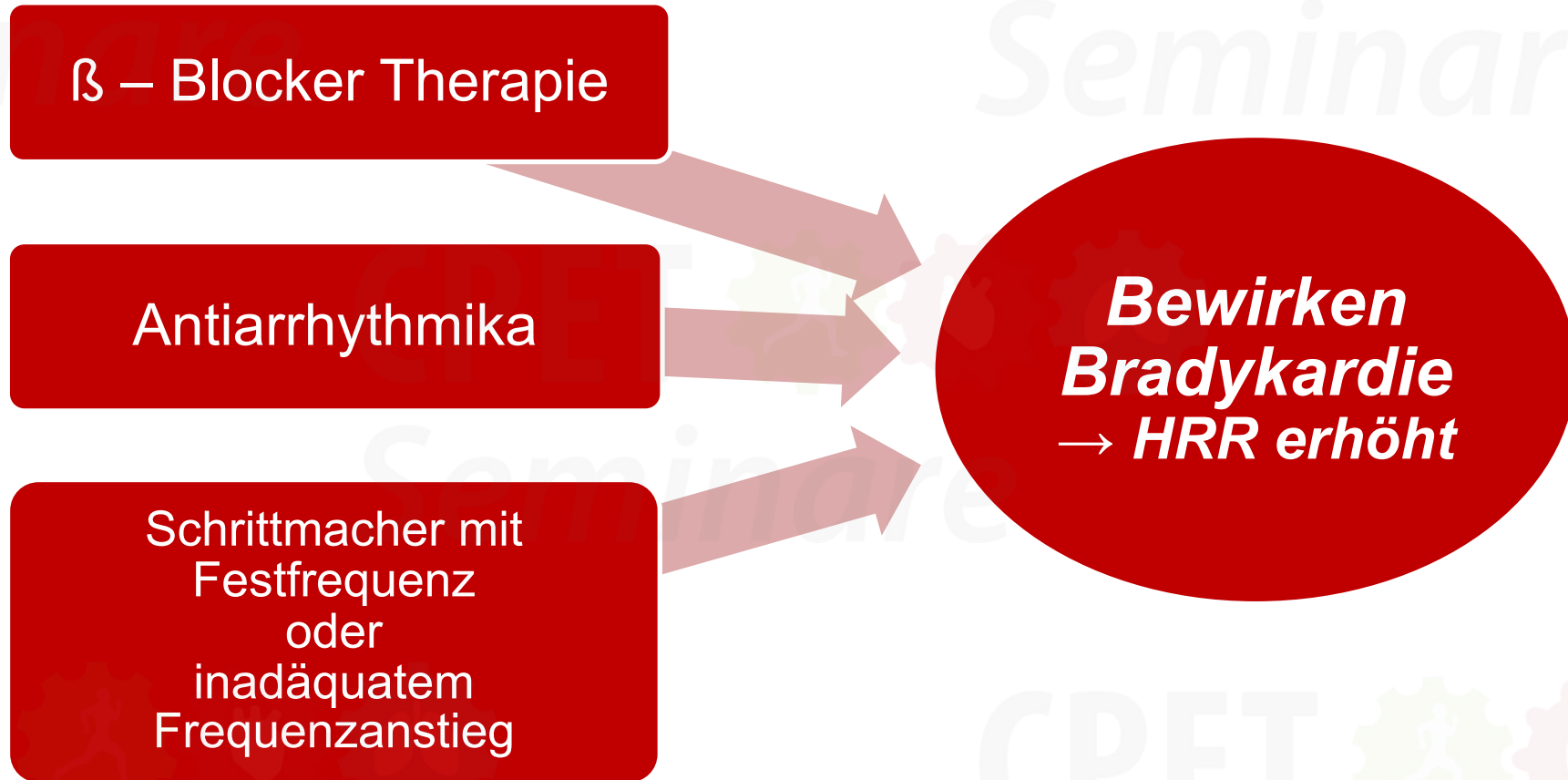
Zeichen kardialer
Ausbelastung

HRR < 10/min

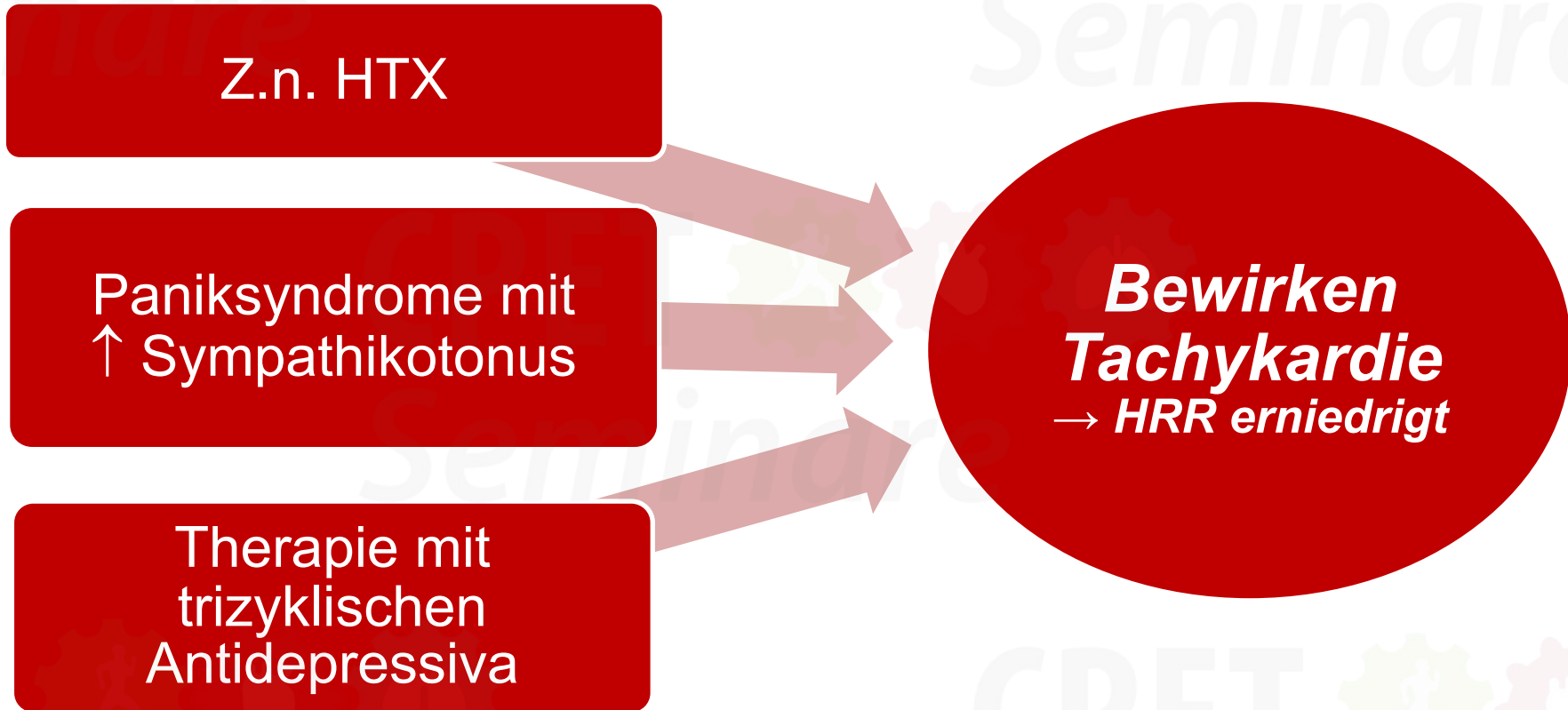
oder

Ziel-HF > 85 % Soll

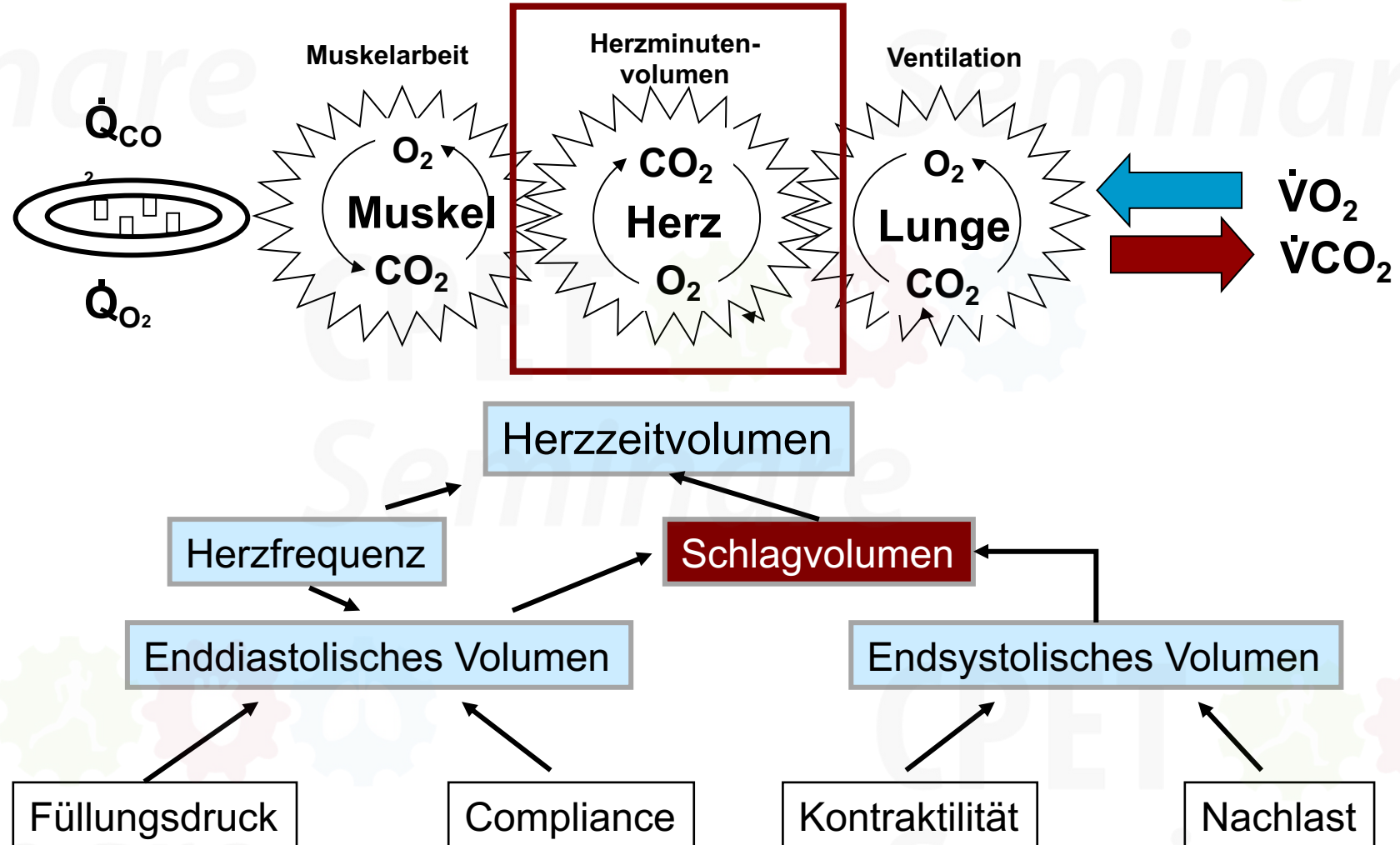
Herzfrequenz – andere Einflussfaktoren



Herzfrequenz – andere Einflussfaktoren



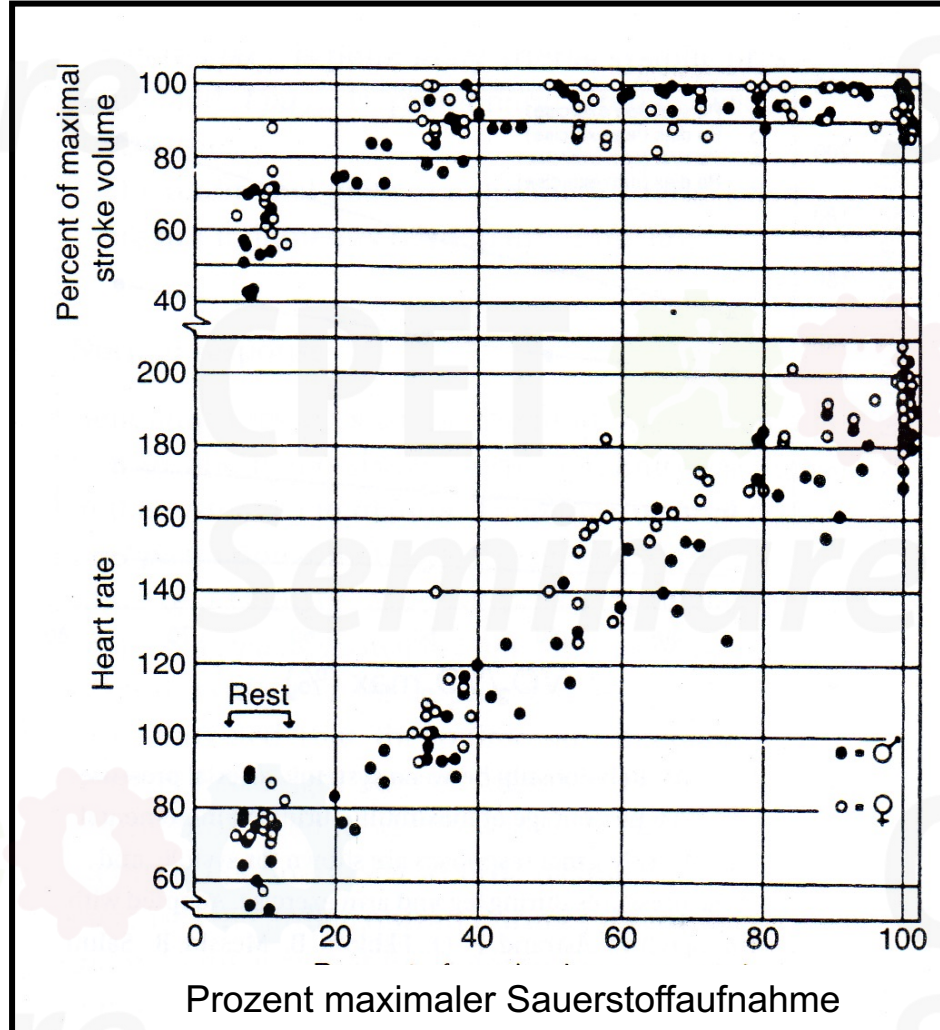
Pathophysiologie Schlagvolumen



Schlagvolumen vs. Belastungsintensität

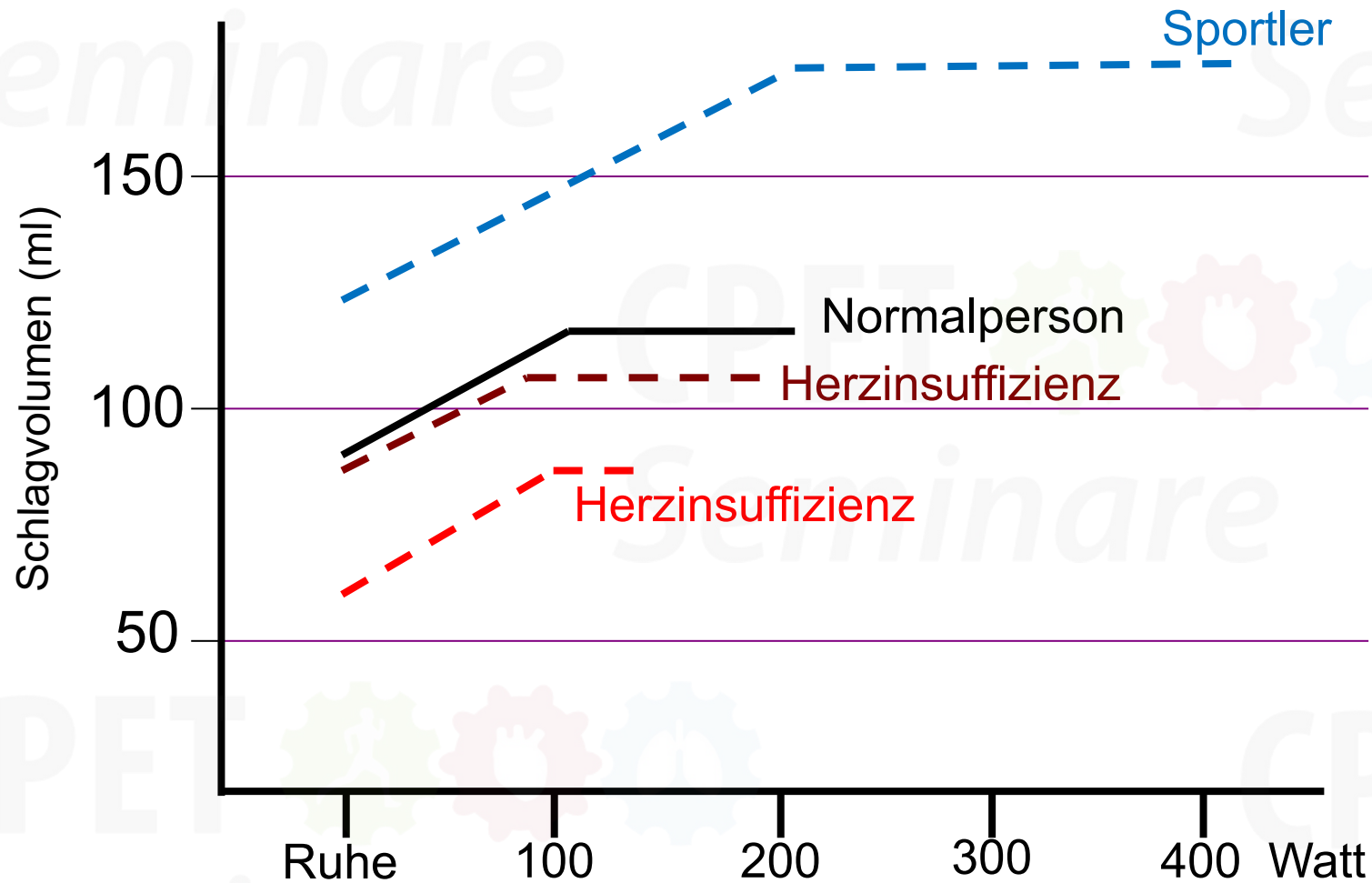
Prozent vom
maximalen
Schlagvolumen

Herzfrequenz



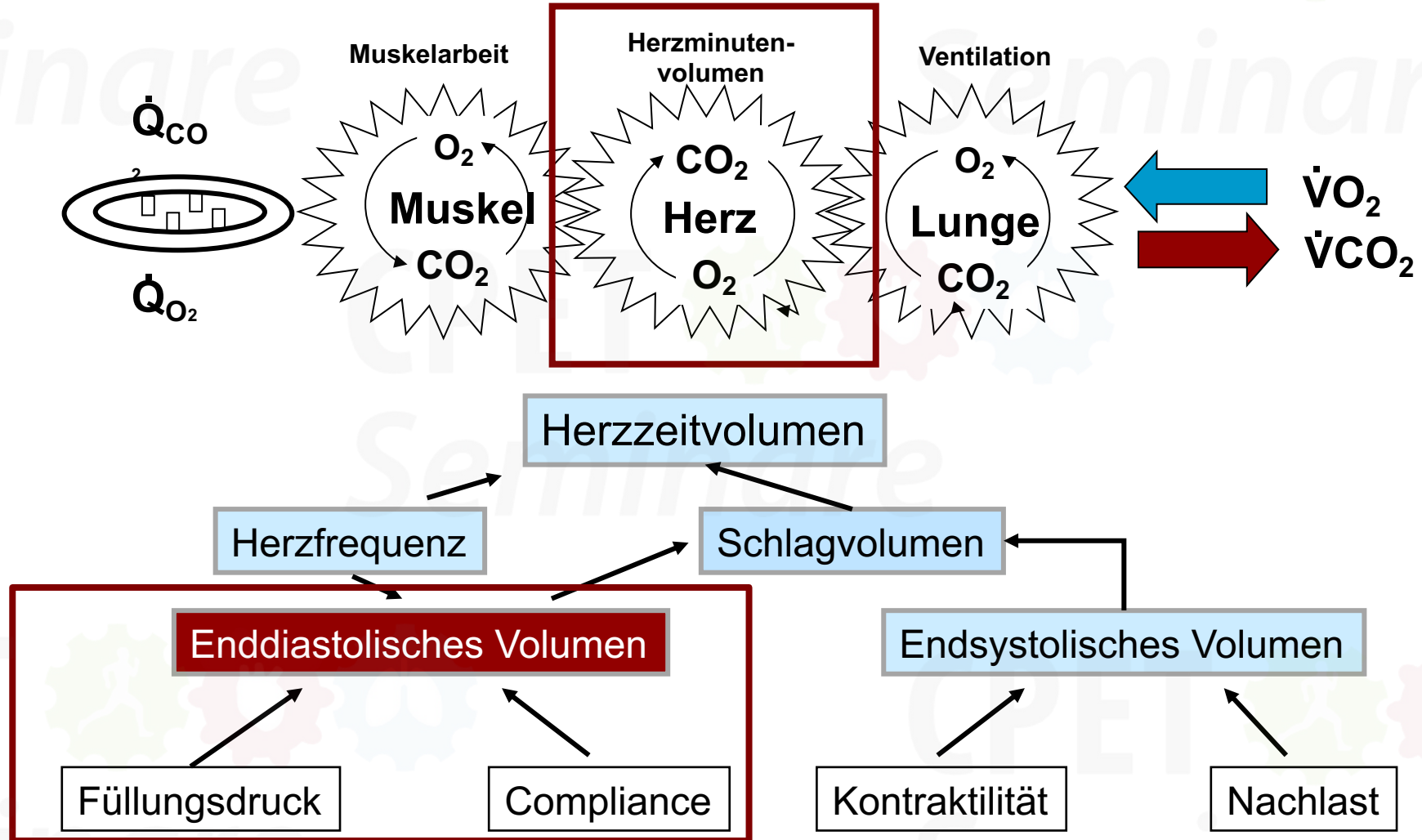
**Steigerung des
Schlagvolumens erfolgt bis
ca. 50% der individuellen
peak $\dot{V}O_2$**

Schlagvolumen vs. Belastungsintensität

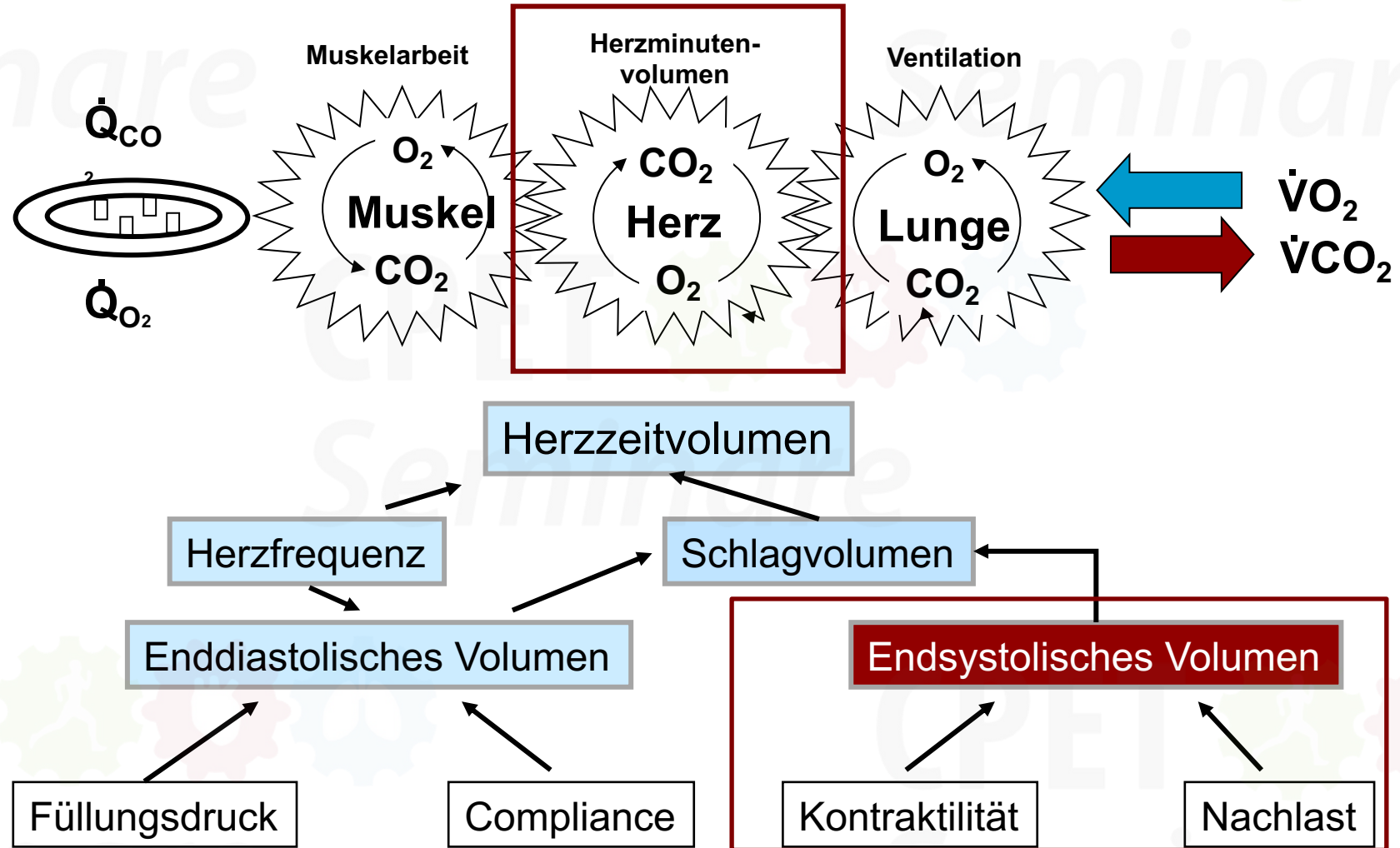


maximal erreichbares Schlagvolumen ist individuell unterschiedlich

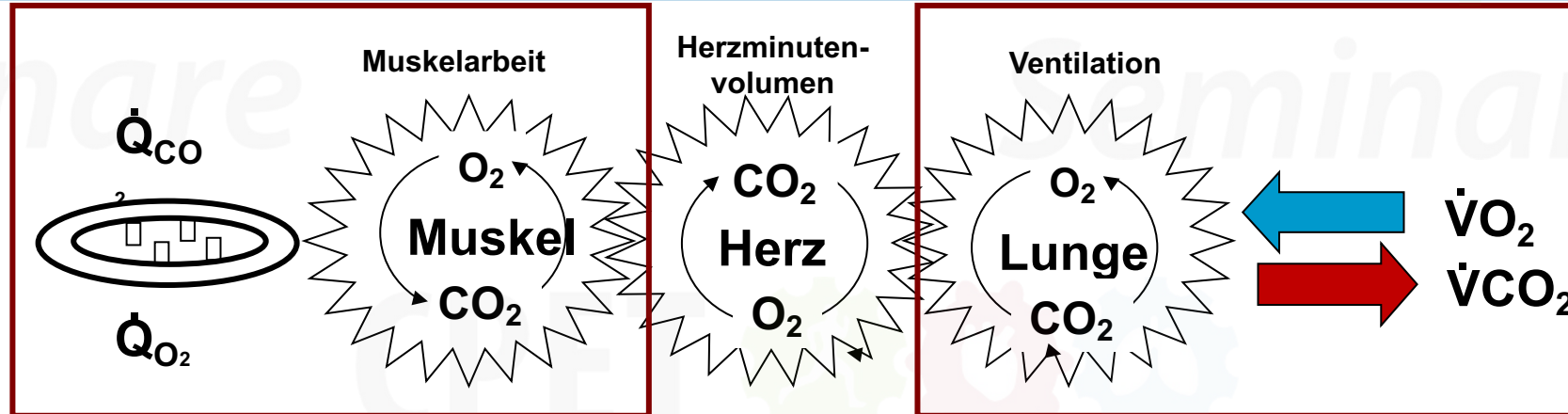
Pathophysiologie Enddiastolisches Volumen



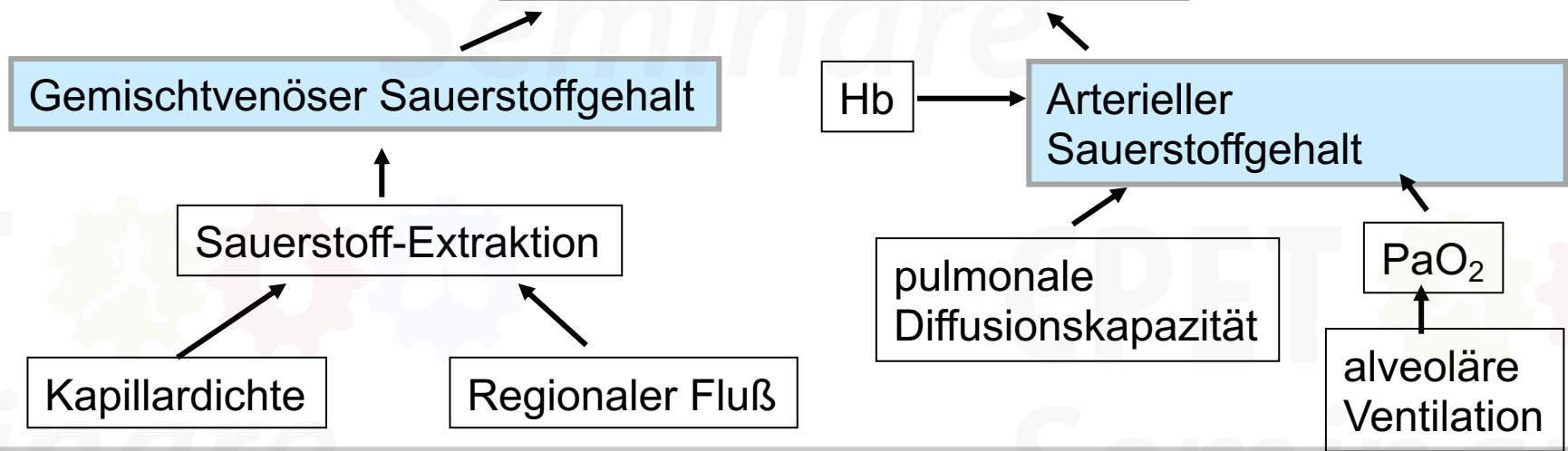
Pathophysiologie Endsystolisches Volumen



Pathophysiologie Arteriovenöse Sauerstoffdifferenz



Arteriovenöse Sauerstoffdifferenz



Sauerstoffgehalt und Ausschöpfung

Ruhe:

Sauerstoffgehalt	arteriell	18 – 20 mlO ₂ /100 ml
	venös	13 – 15 mlO ₂ /100 ml

Ausschöpfung: ≈ 23 %

Belastung:

	venös	2 – 4 mlO ₂ /100 ml
--	-------	--------------------------------

Ausschöpfung: ≈ 85 %

Sauerstoffgehalt und **zentralvenöse** Ausschöpfung

Ruhe:

Sauerstoffgehalt	arteriell	18 – 20 mlO ₂ /100 ml
	zentralvenös	13 – 15 mlO ₂ /100 ml

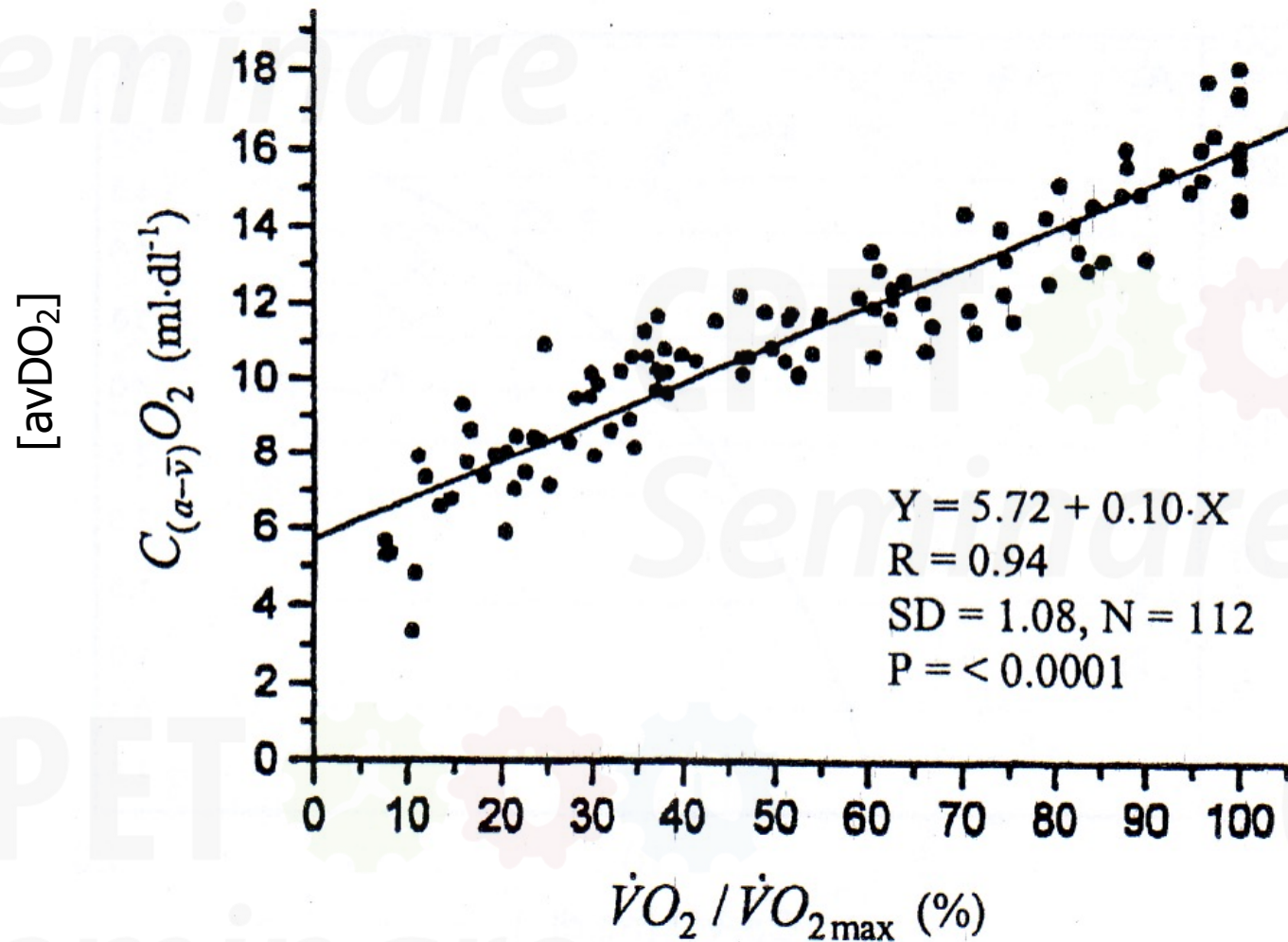
Ausschöpfung: ≈ 23 %

Belastung:

	zentralvenös	2 – 4 mlO ₂ /100 ml
--	---------------------	--------------------------------

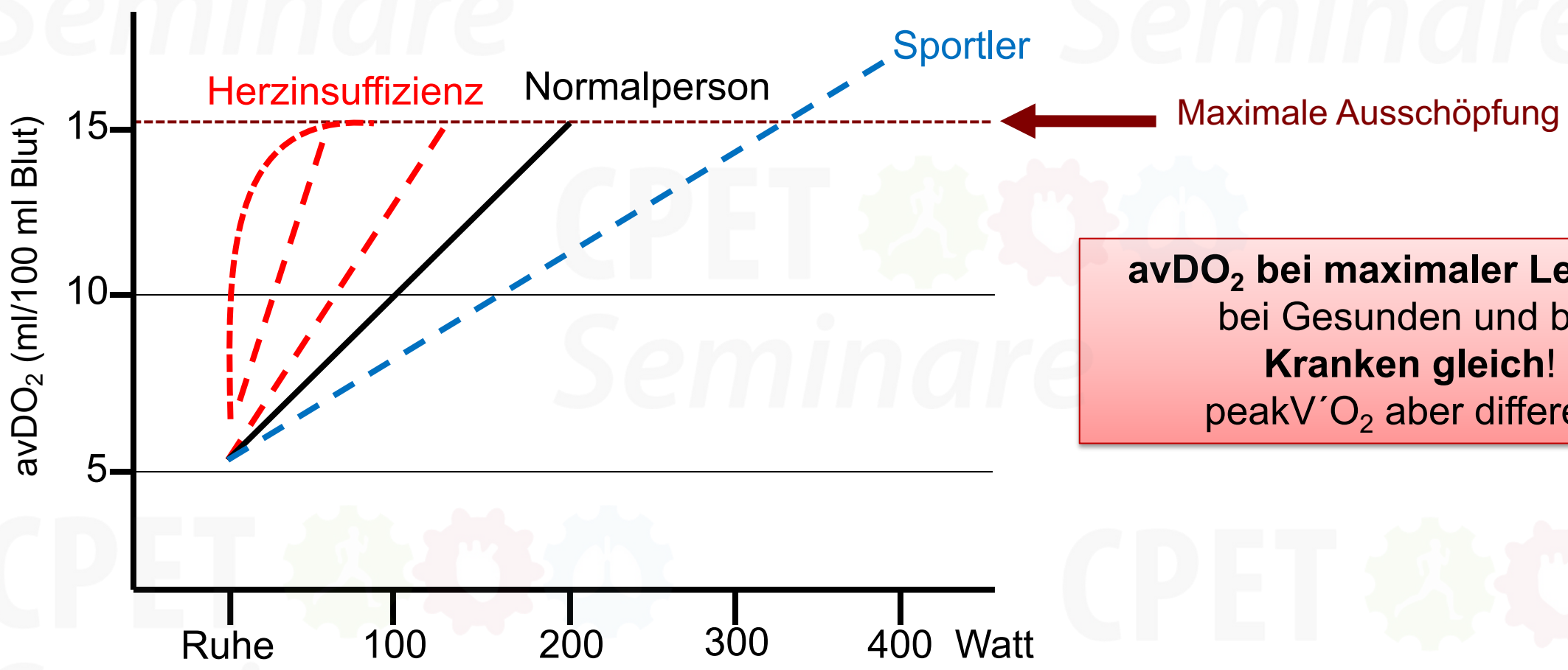
Ausschöpfung: ≈ 85 %

avDO₂ vs. Belastungsintensität



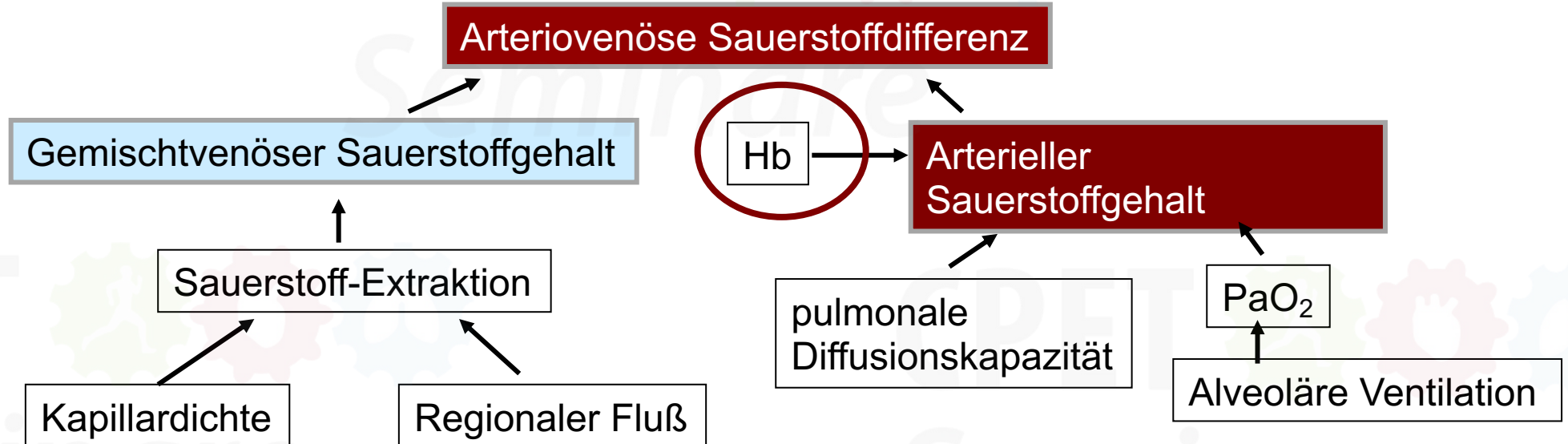
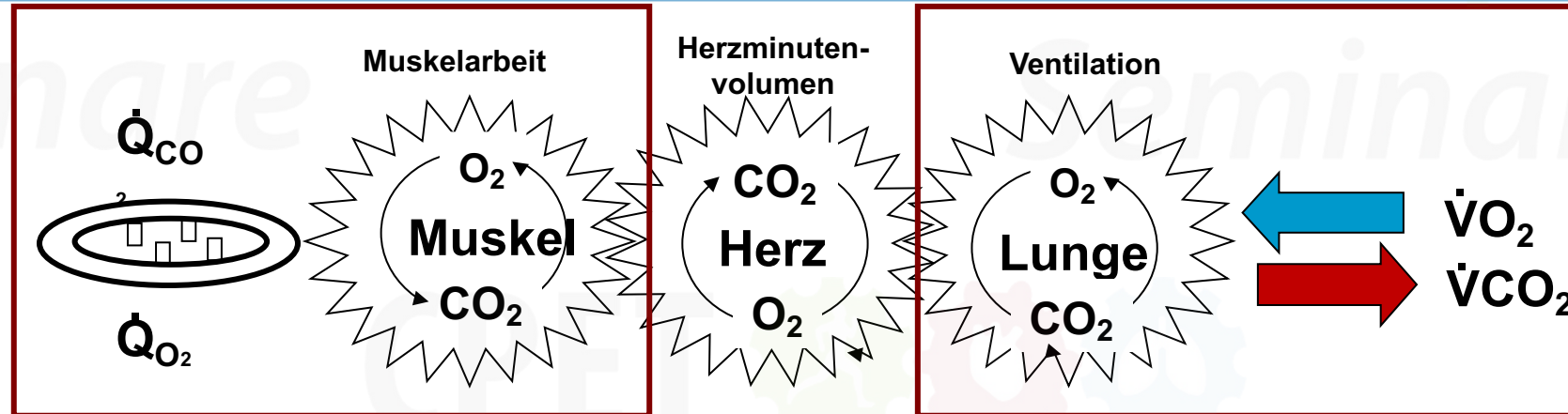
Sauerstoffausschöpfung [avDO₂] steigt linear mit Belastungsintensität

avDO₂ vs. Belastungsintensität



avDO₂ bei maximaler Leistung bei Gesunden und bei Kranken gleich!
peakV'O₂ aber different

Pathophysiologie Bedeutung des Hämoglobingehaltes



Effekt von Blutdoping

1 g Hb bindet 1,34 ml O₂ (Hüfner'sche Zahl)

+ **2g/dl Hb x 10** (=entspricht) 20g/l)
x 20 L Herzzeitvolumen
x 1,34 ml O₂ (Transportkapazität)

= **536 mlO₂ Mehrangebot** (≈ 10 %)



CPET 
Seminare

CPET 
Seminare

CPET 
Seminare

Sauerstoffaufnahme

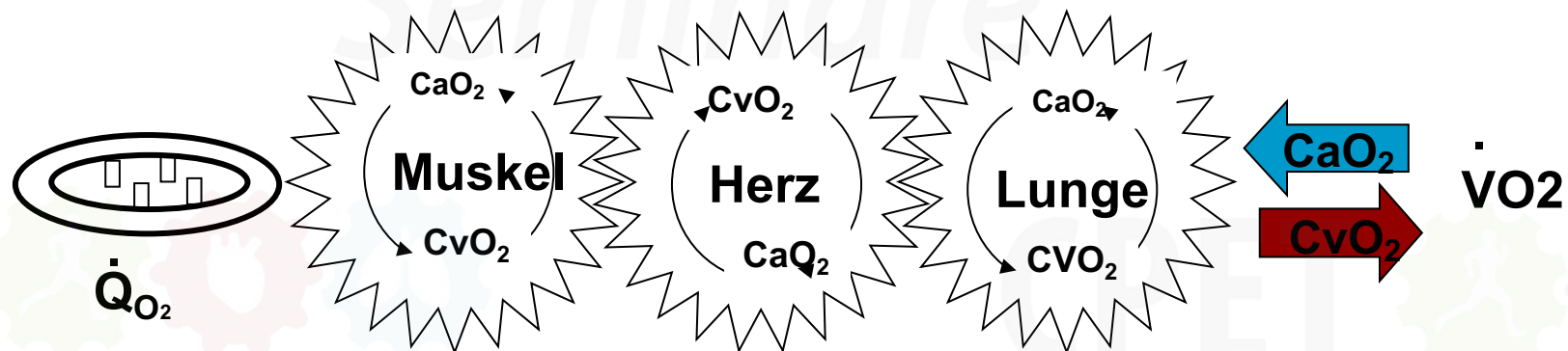
CPET 
Seminare

CPET 
Seminare

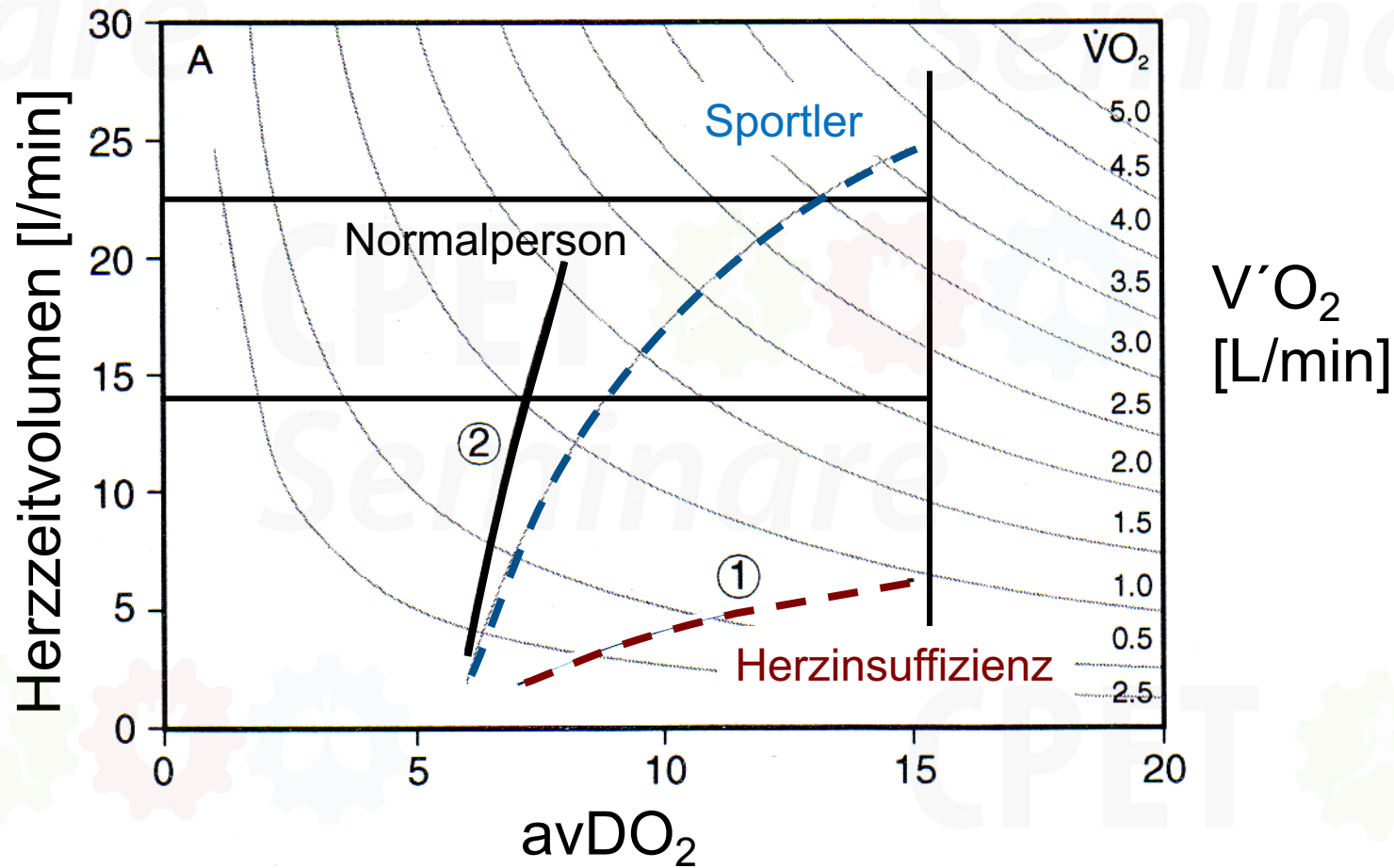
Pathophysiologie Fick'sches Prinzip

$$\text{HZV} \times \text{CaO}_2 - \text{CvO}_2 \text{ (mlO}_2\text{/dl)} \times 10 = \dot{V}'\text{O}_2\text{-Aufnahme (ml/min)}$$

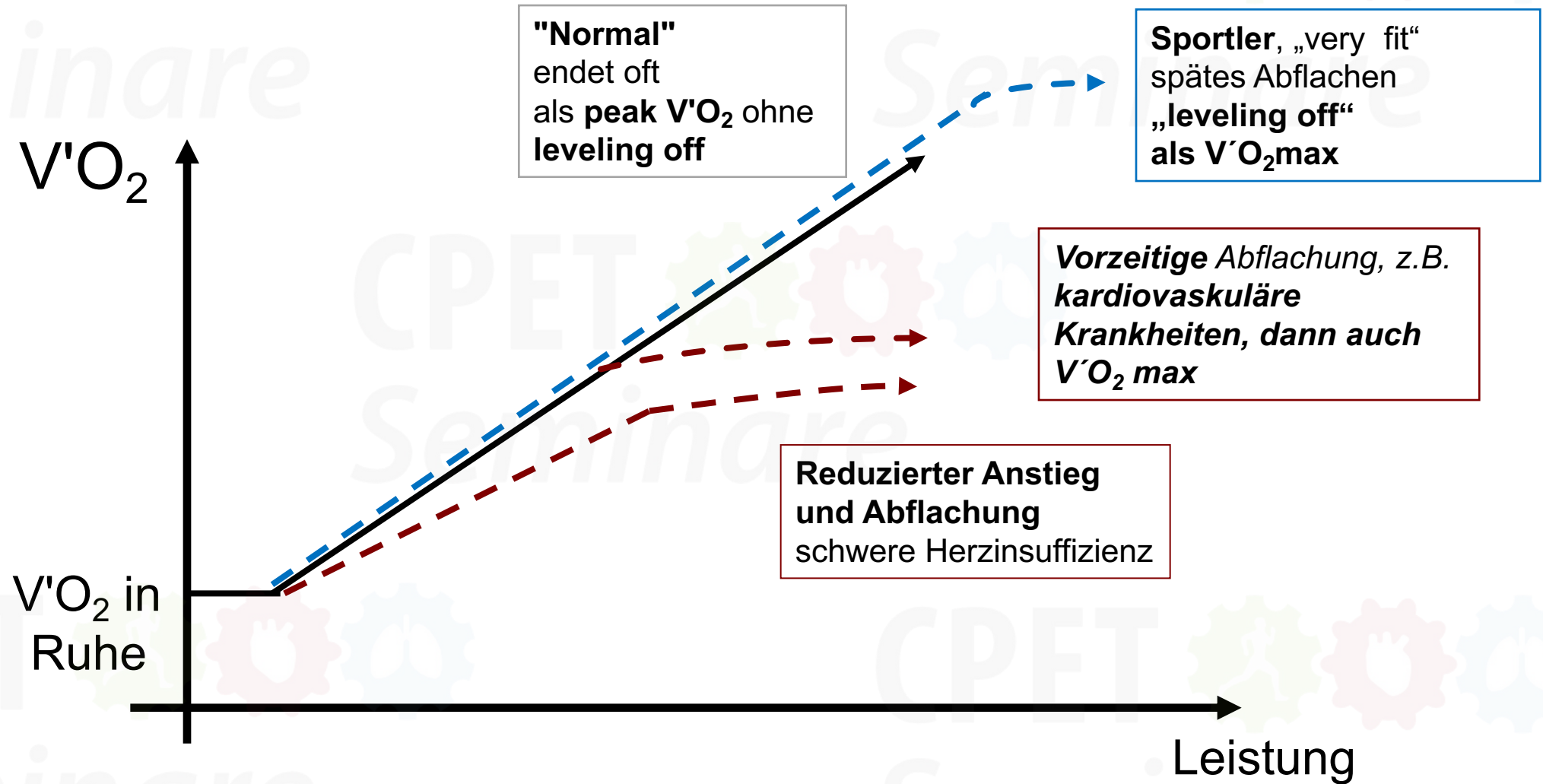
Herzzeitvolumen x Arterieller O₂-Gehalt – Zentralvenöser O₂-Gehalt x 10 = O₂-Aufnahme



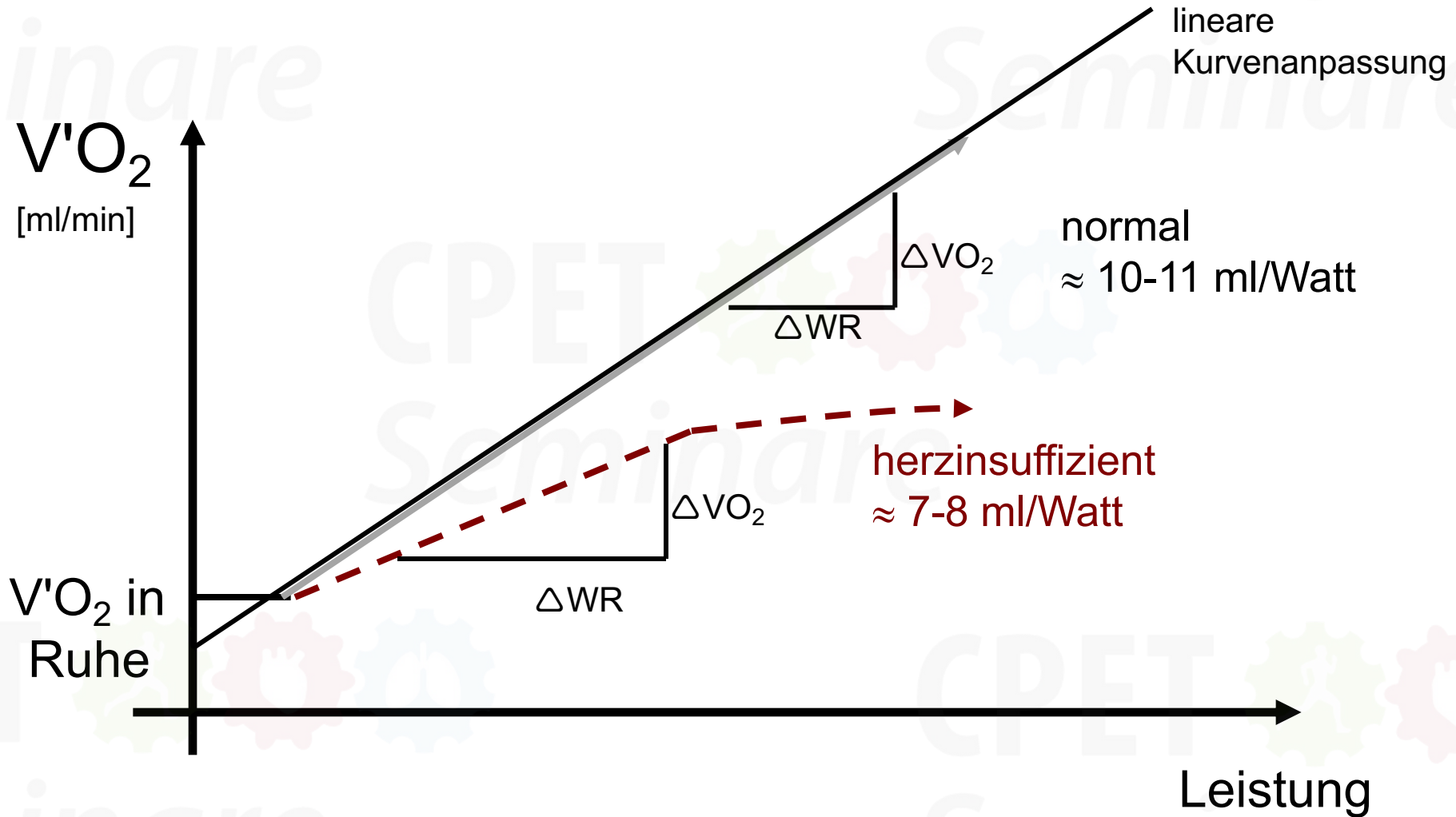
Beziehung $\dot{V}O_2$ – HZV – $avDO_2$



Sauerstoffaufnahme (peak $\dot{V}O_2$, $\dot{V}O_{2max}$)



aerobe Kapazität ($\Delta V'O_2/\Delta WR$)



aerobe Kapazität ($\Delta V'O_2/\Delta WR$)

1. Normwert 10-11 ml O₂ / Watt

→ Gilt für Sportler und Normalpersonen!

→ **Kranken u. U. um 7-8**

*(geringere Effizienz der Muskelarbeit
bei raschen Erreichen von AT)*

→ Gilt nur für **Fahrradbelastung**
(Wirkungsgrad)

Die **Abflachung** der Geraden

$$(\Delta V'O_2/\Delta WR)$$

findet sich bei allen Bedingungen, die die

→ **O₂- Aufnahme oder Utilisation** behindern,

z.B. **Herzkrankheiten oder Gefäßleiden**

aerobe Kapazität ($\Delta V'O_2/\Delta WR$)

Gilt nur für **Fahrradbelastung**

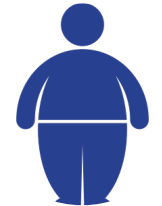


Normalpersonen 10-11 ml O₂ / Watt



Sportler 9 ml O₂ / Watt

besserer Wirkungsgrad der Bewegung



Untrainierte >10 ml O₂ / Watt


schlechtere Wirkungsgrad der Bewegung, früher anaerober Stoffwechsel



Kranke
z.B. Herzinsuffizienz,
Long-Covid

geringere Effizienz der Muskelarbeit bei raschen Erreichen von VT

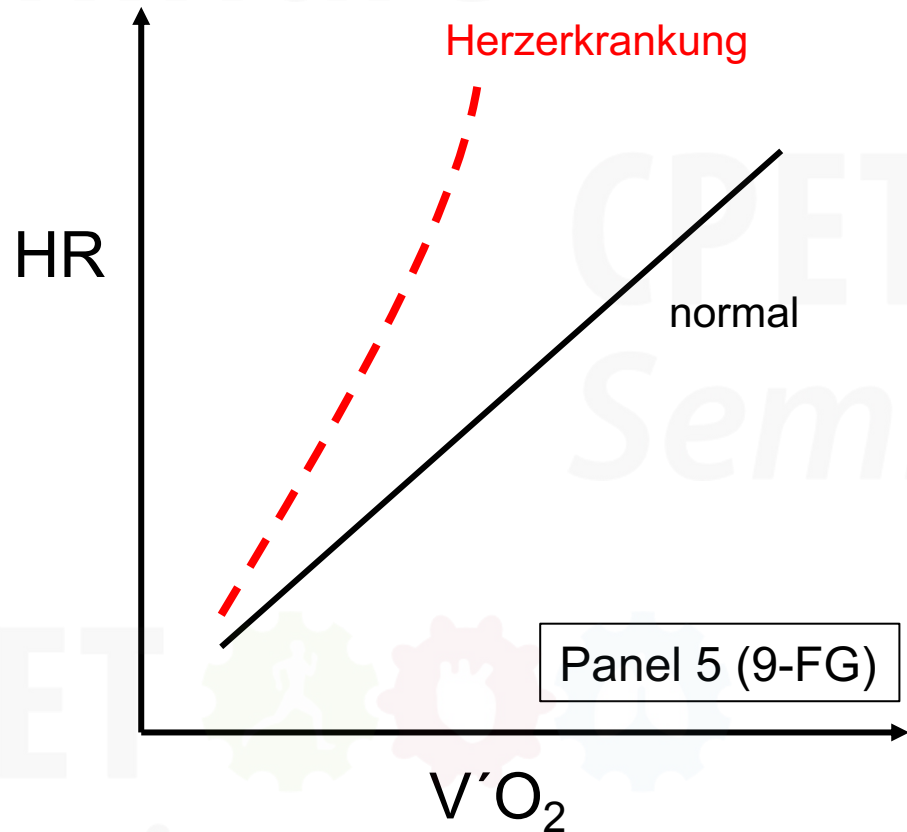
- Abflachung der Steigung mit Einsetzen anaeroben Stoffwechsels
- Bei sehr steilen Rampenprotokoll ggf. niedrigere Werte

CPET 
Seminare

Sauerstoffpuls
($\text{O}_2\text{-Puls} = \dot{V}\text{O}_2 / \text{HR}$)

Sauerstoffpuls (O_2 -Puls) - Panel 5

Verhältnis $V'O_2/HR$ (Sauerstoffpuls):



Verhältnis HR zu $V'O_2$ ist steiler, da HZV stärker abhängig von HR, wenn SV eingeschränkt
Ausnahme: Betablocker, Sick-Sinus-Syndrom, SM

Panel 5 (9-FG)

Sauerstoffpuls (O₂-Puls) - Sollwert

Menge an O₂, die pro Herzschlag vom Körper aufgenommen wird
(≈ Schlag Vol.)

$$\begin{aligned} \text{O}_2\text{-Puls-Sollwert} &= \text{V}'\text{O}_2 \text{ Soll} & / & \text{HR Soll} \\ [\text{ml/Schlag}] &= [\text{ml/min}] & / & [\text{Schläge/min}] \end{aligned}$$

Fick'sches Prinzip

$$\text{HZV} = \text{V}'\text{O}_2\text{-Aufnahme} / \text{avDO}_2$$

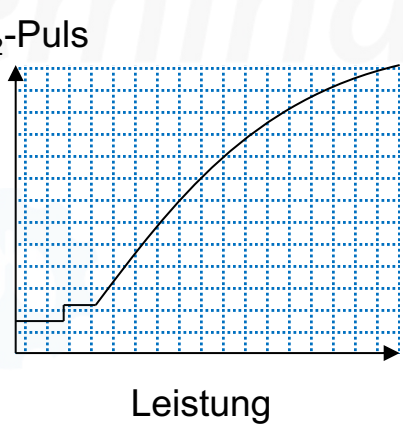
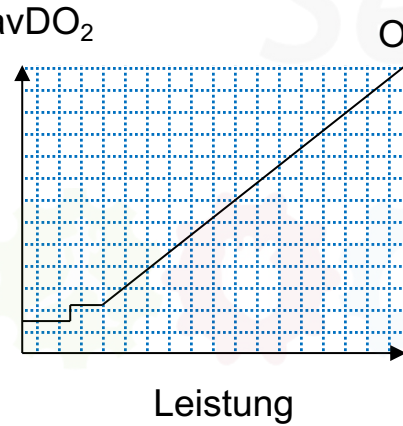
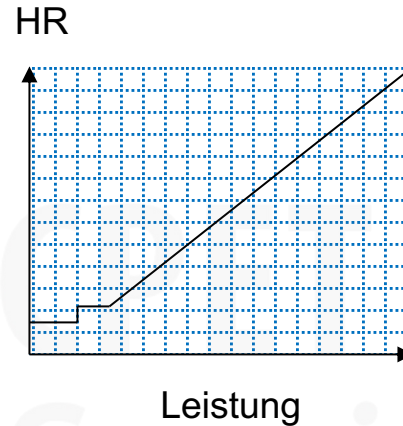
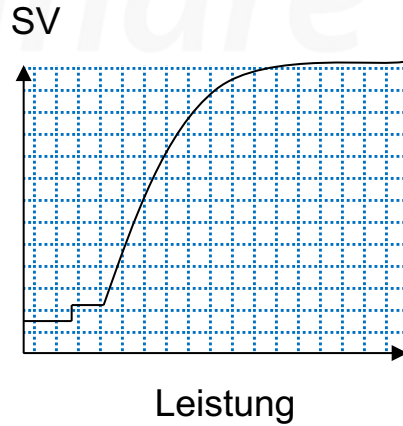
$$\text{HR} \times \text{SV} = \text{V}'\text{O}_2\text{-Aufnahme} / \text{avDO}_2$$

$$\mathbf{V}'\text{O}_2/\text{HR} = \mathbf{SV} \times \mathbf{avDO}_2$$

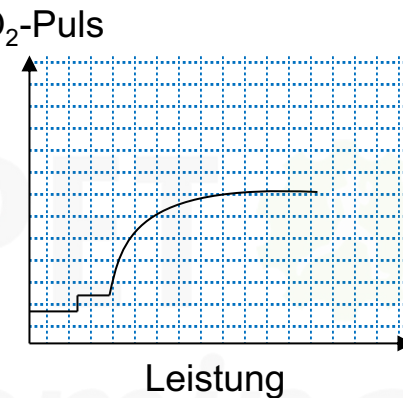
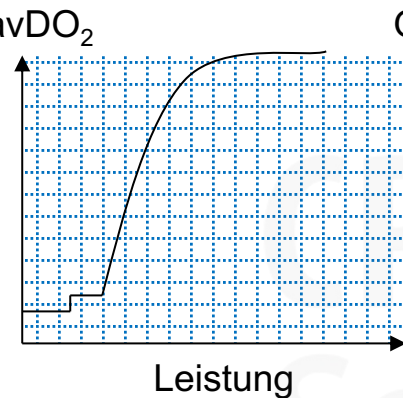
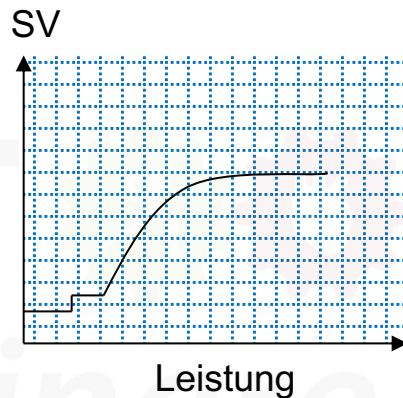
Sauerstoffpuls (O₂-Puls)

$$\text{O}_2\text{-Puls} = \text{SV} \times \text{avDO}_2$$

normal

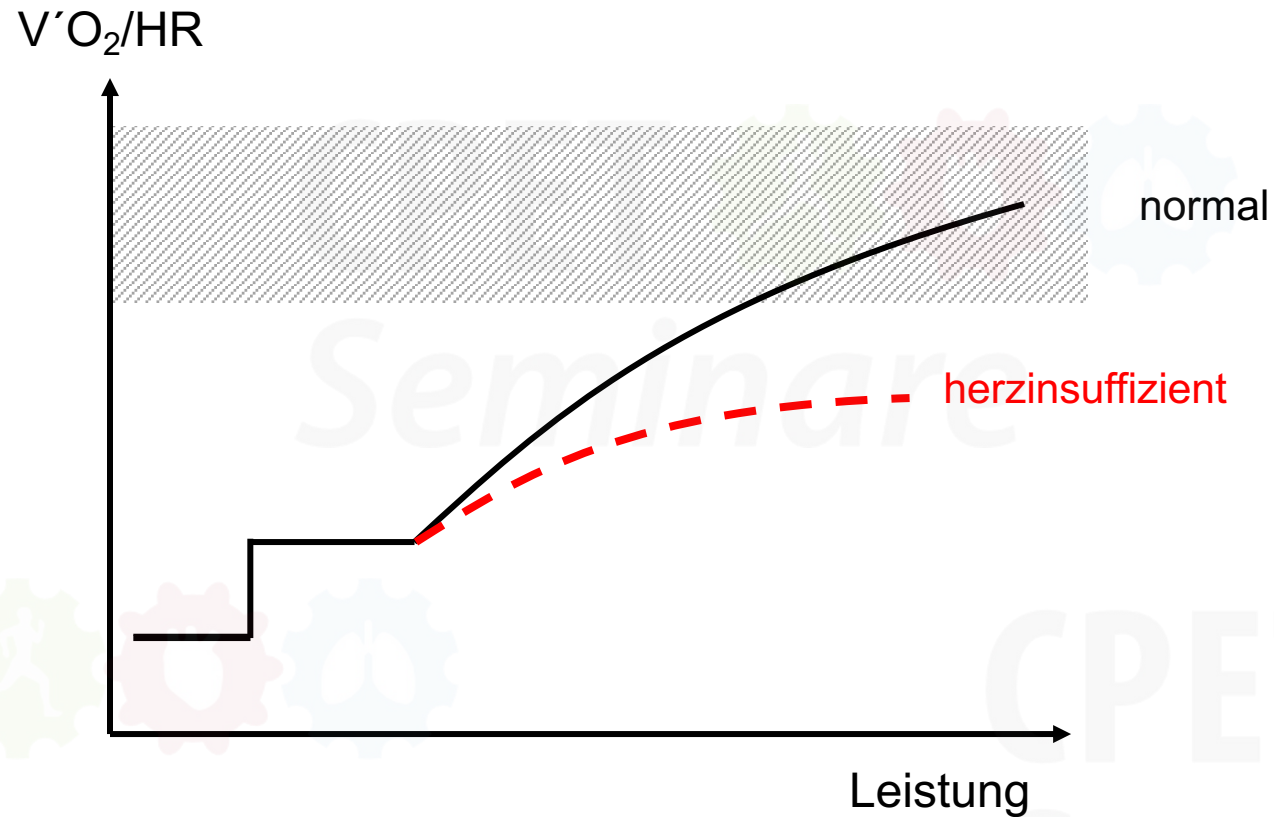


herzinsuffizient

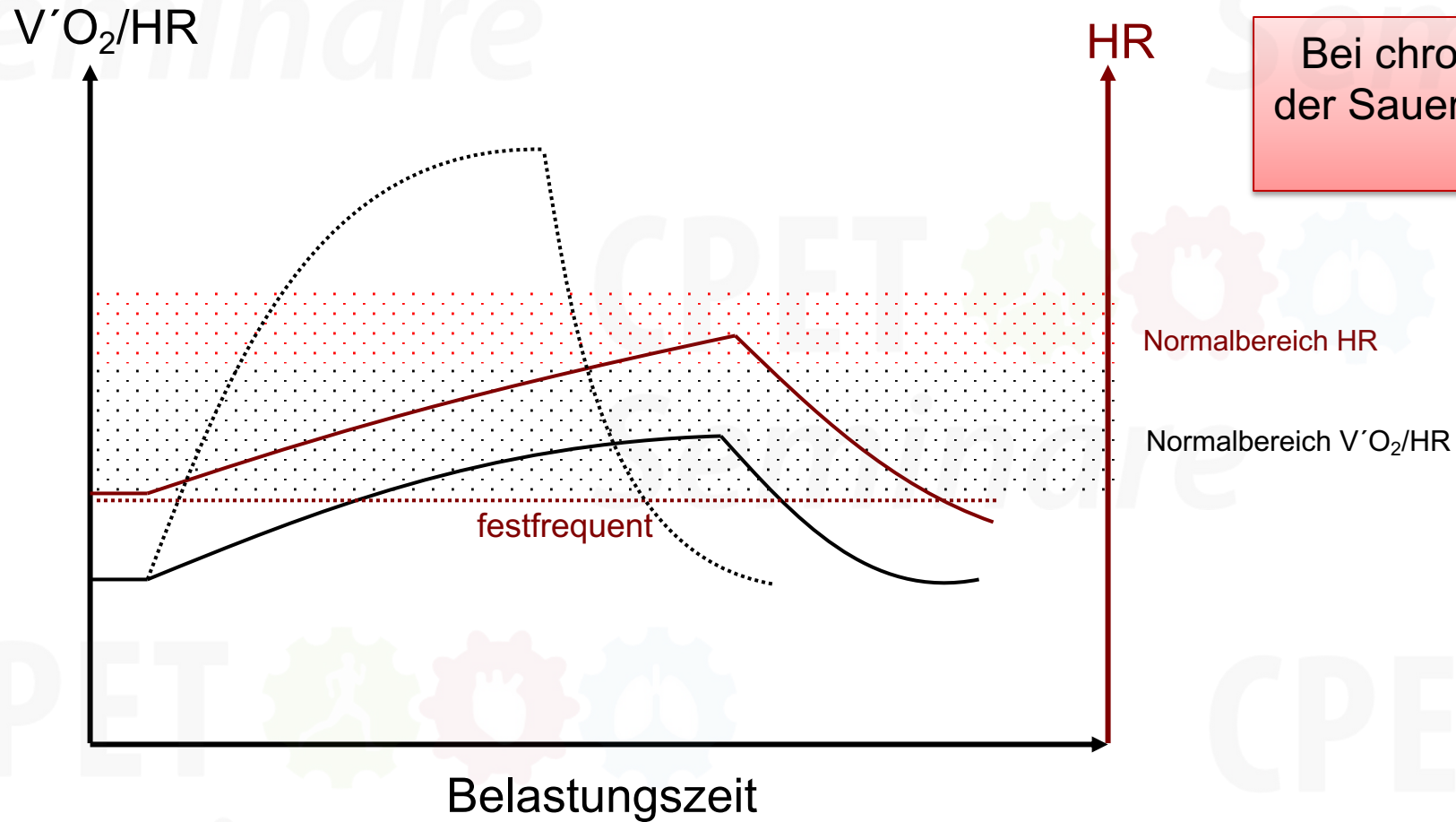


Sauerstoffpuls (O_2 -Puls = $V'\text{O}_2/\text{HR}$)

reduziertes HZV \rightarrow frühe maximale Ausschöpfung der avDO_2



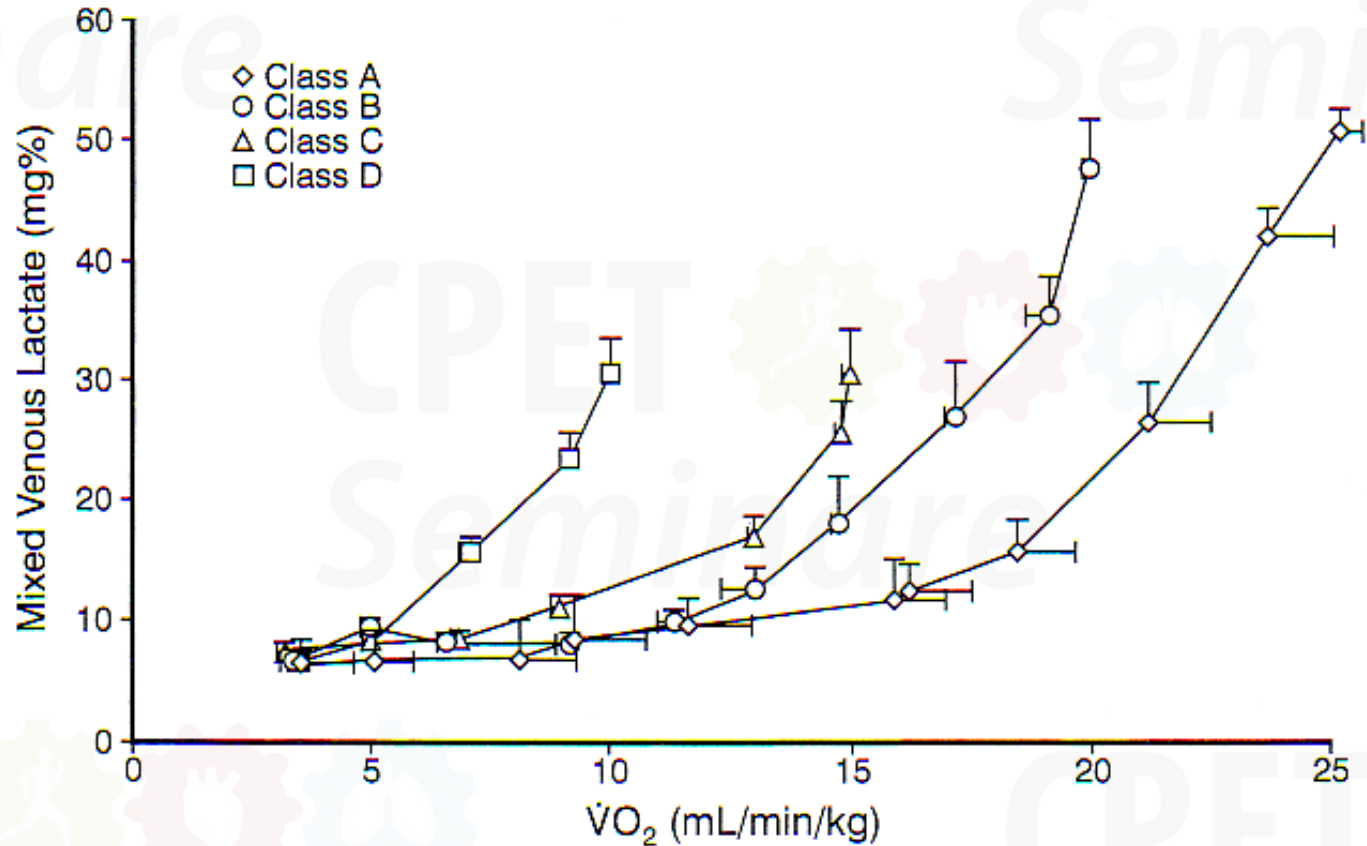
O₂-Puls bei chronotroper Inkompetenz



Bei chronotroper Inkompetenz ist der Sauerstoffpuls kompensatorisch erhöht

**Ventilatorische aerobe Schwelle (VT1)
bei Herzinsuffizienz**

Laktatschwelle bei verschiedenen Schweregraden Herzinsuffizienz

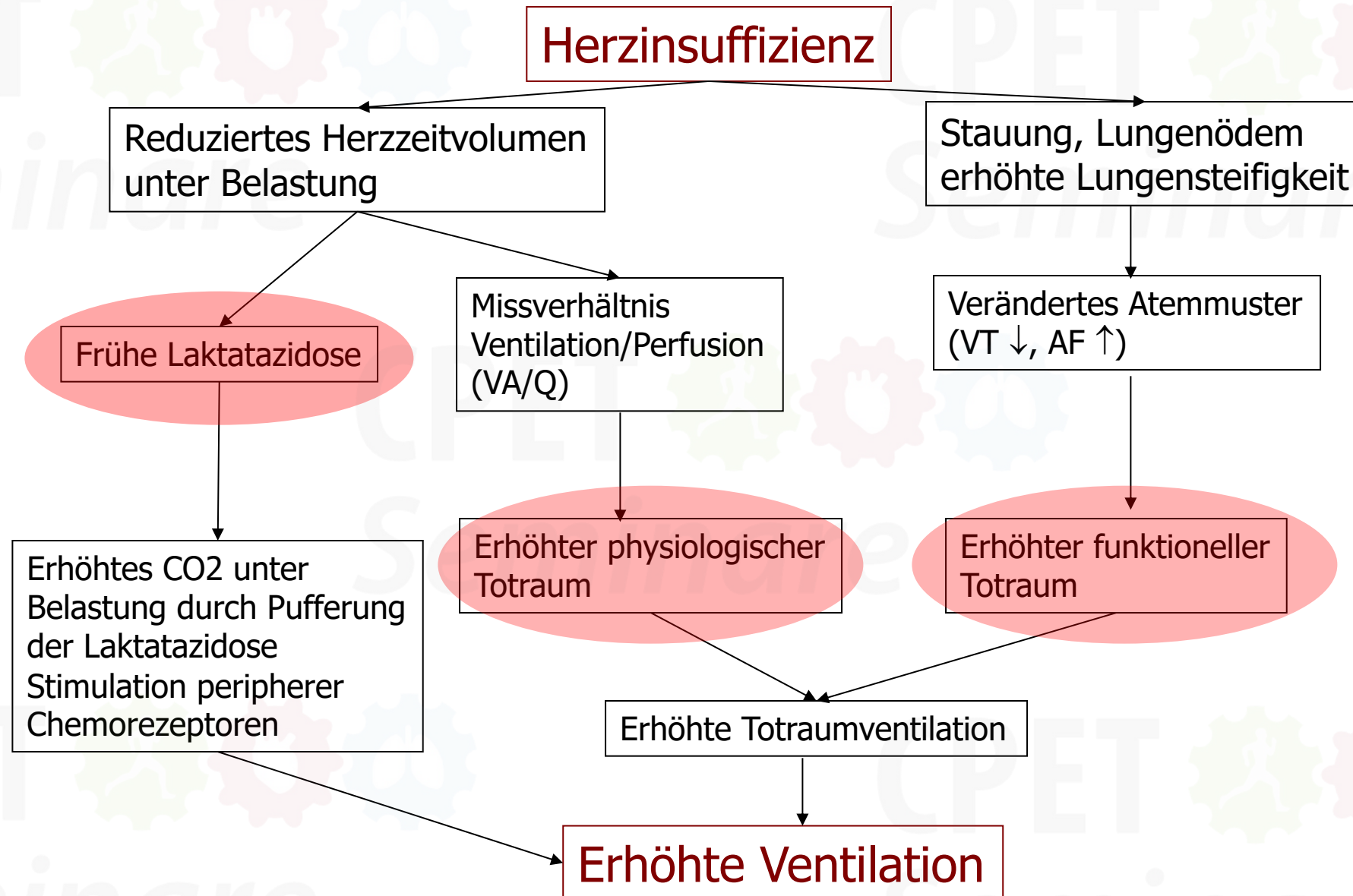


Laktatleistungskurven bei unterschiedlichen Schweregraden der Herzinsuffizienz
Weber-Klasse A bis D

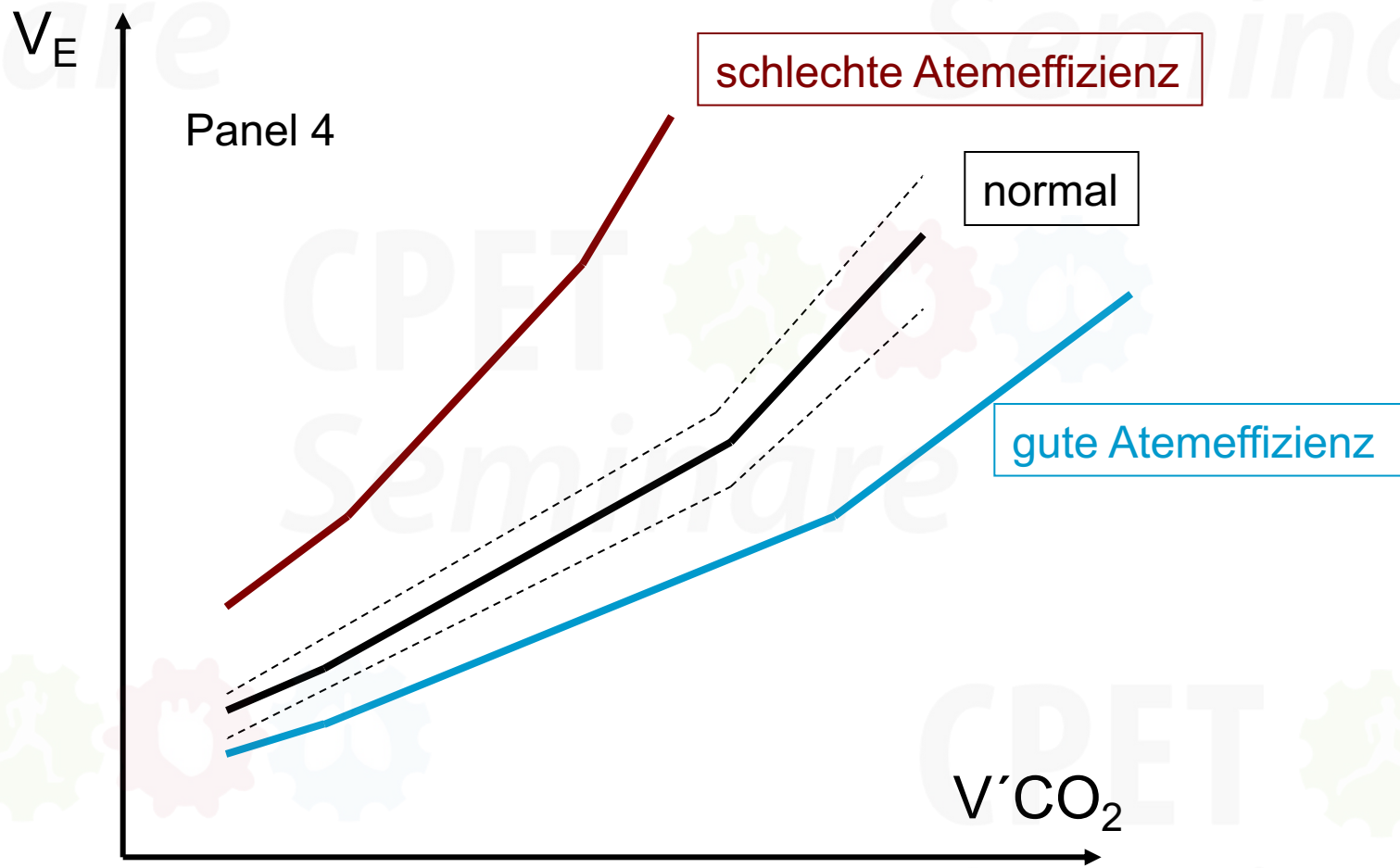


**Sekundäre ventilatorische Effekte bei
Herzinsuffizienz**

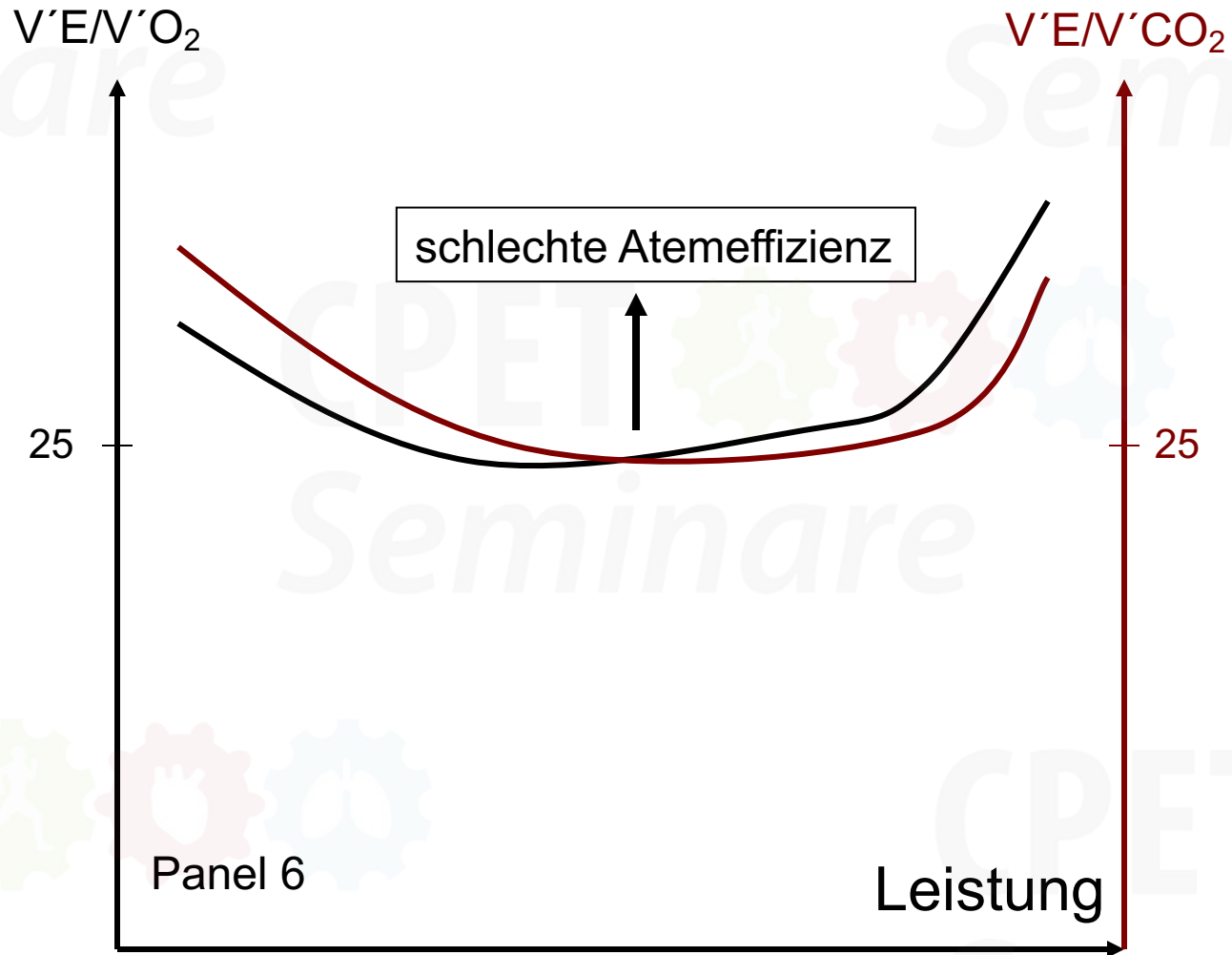
Veränderte Ventilation bei Herzinsuffizienz



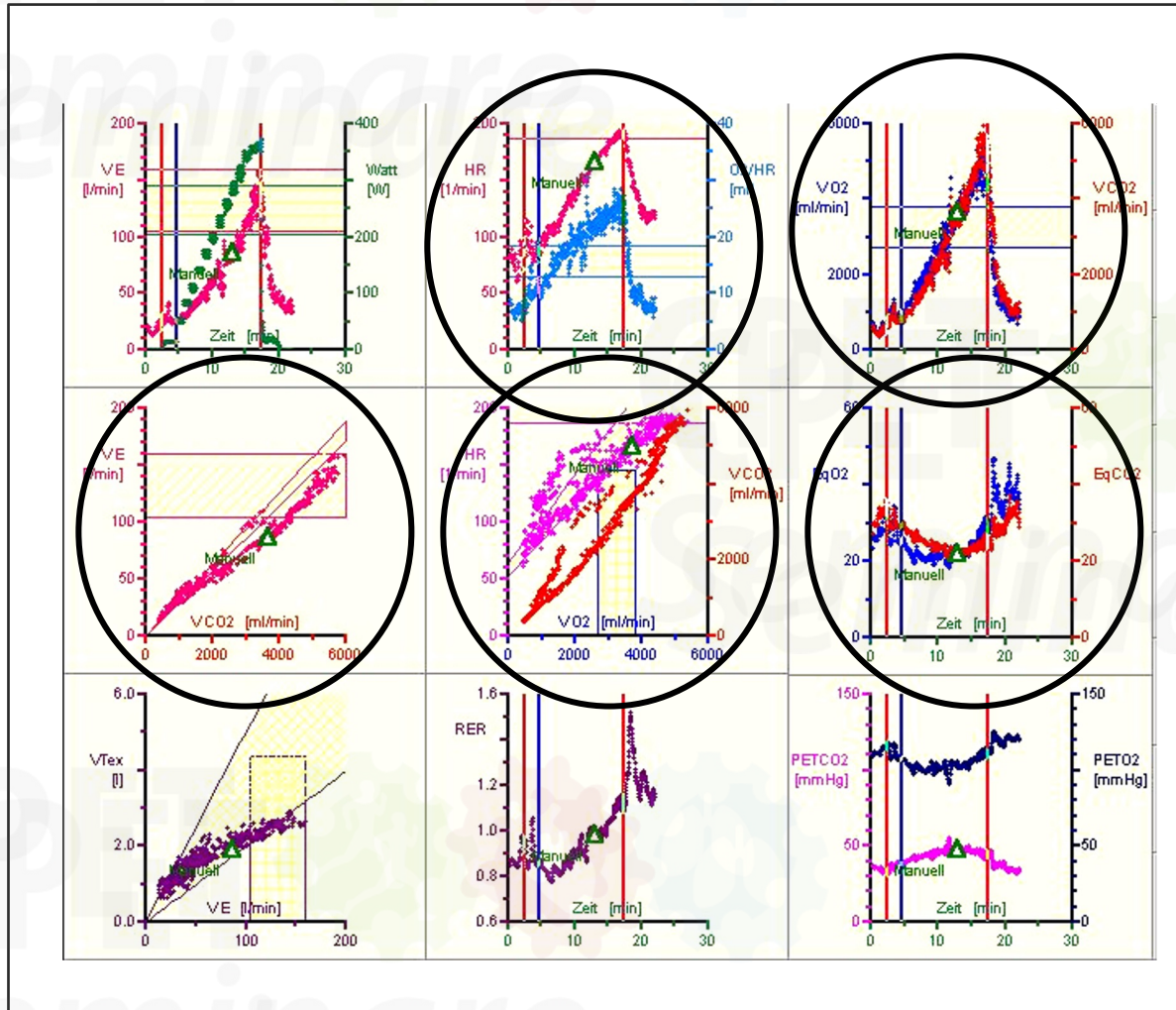
Atemäquivalent ($V'_E/V'CO_2$)



Atemäquivalente ($V'E/V'O_2$ und $V'E/V'CO_2$)



Veränderungen bei gestörter Kardiozirkulation



- 1.) Sauerstoffaufnahme (peak $\dot{V}'O_2$, $\dot{V}'O_{2max}$)
- 2.) aerobe Kapazität ($\Delta \dot{V}'O_2 / \Delta WR$)
- 3.) aerobe Schwelle ($\dot{V}'O_2 VT_1$)
- 4.) Herzfrequenz
- 5.) Sauerstoffpuls (O_2 -Puls)
- 6.) Atemäquivalente ($\dot{V}'E / \dot{V}'CO_2$)