Energiestoffwechsel – Seminarfragen mit Lösungen

Alle Fragen aus „2026 - 3. Sem - Seminar 2“: **Teil 1** (21 Freitextfragen) mit Musterantwort, **Teil 2** (27 MC-Fragen) mit der richtigen Antwort und für **jede** Option, warum sie stimmt oder nicht stimmt. Themen: Einführung (ATP, Vitamine), Pyruvat-Dehydrogenase, Citratzyklus, Atmungskette und ATP-Synthase.
Tipp: Deck die Lösung ab und antworte erst selbst. Der Schlüssel steht ganz am Ende.

Teil 1 – Freitextfragen

1 NUKLEOSID / NUKLEOTID

Was versteht man in der Biochemie unter einem Nukleosid? Was ist ein Nukleotid?

Nukleosid = Base + Pentose (Ribose oder Desoxyribose), verbunden über eine **N-glykosidische Bindung** (z. B. Adenosin). **Nukleotid** = Nukleosid + eine oder mehrere **Phosphatgruppen**, die erste als Phosphorsäureester am 5′-OH der Pentose (z. B. AMP, ADP, ATP).

2 BINDUNGEN IM ADP

Wieviele Bindungen der genannten Art gibt es in einem Molekül ADP?

N-glykosidische Bindung	**1**	Adenin-N9 → C1′ der Ribose
Esterbindung	**1**	5′-OH der Ribose → α-Phosphat (Phosphorsäureester)
Anhydridbindung	**1**	α-Phosphat–O–β-Phosphat (Phosphorsäureanhydrid)
Thioesterbindung	**0**	kein Schwefel im ADP (Thioester: z. B. Acetyl-CoA)
Energiereiche Bindung	**1**	die Anhydridbindung (ΔG°′ der Spaltung ≈ −30 kJ/mol); der Ester ist energiearm (≈ −14 kJ/mol)

Zum Vergleich ATP: 1 · 1 · **2** · 0 · **2**.

3 ATP-UMSATZ

Wie oft wird jedes ATP-Molekül pro Tag zu ADP abgebaut und wieder phosphoryliert (Bedarf 200 mol/Tag, Bestand 0,1 mol)?

200 mol ÷ 0,1 mol = **2000-mal pro Tag** (≈ alle 43 s einmal). Bei M(ATP) ≈ 507 g/mol entsprechen 200 mol etwa 100 kg ATP pro Tag – etwa das eigene Körpergewicht. ATP ist deshalb kein Speicher, sondern ein schnell umlaufender Energieüberträger.

4 KREATINPHOSPHAT

Wie entsteht aus Kreatin neues Kreatinphosphat? Welches Enzym katalysiert das?

In Ruhe (wenn genug ATP da ist) läuft die Reaktion rückwärts: **Kreatin + ATP → Kreatinphosphat + ADP**. Enzym: **Kreatinkinase** (CK; die mitochondriale Mi-CK im Intermembranraum nutzt direkt das ATP aus der ATP-Synthase, die zytosolische CK-MM gibt es an die Myofibrillen ab – „Kreatinphosphat-Shuttle“). Die Reaktion ist frei umkehrbar; welche Richtung läuft, hängt vom ATP/ADP-Verhältnis ab.

5 MYOKINASE

Welche Reaktion katalysiert die Myokinase in der Muskulatur, um ATP zu gewinnen?

Die Myokinase (= **Adenylatkinase**): **2 ADP ⇌ ATP + AMP**. Eine Phosphatgruppe wird von einem ADP auf das andere übertragen. Das entstehende AMP ist ein Energiemangel-Signal: Es aktiviert die AMP-Kinase (AMPK) und allosterisch die Phosphofructokinase 1.

6 PHOSPHAT-EINBAU IN DER GLYKOLYSE

Welches Enzym der Glykolyse baut anorganisches Phosphat in eine organische Verbindung ein? Wie heißt das Produkt?

Die **Glycerinaldehyd-3-phosphat-Dehydrogenase** (GAPDH): Glycerinaldehyd-3-phosphat + NAD^+ + P_i → **1,3-Bisphosphoglycerat** + NADH + H^+. Die neue Phosphatgruppe sitzt als energiereiches gemischtes **Säureanhydrid** an C1 und wird im nächsten Schritt (Phosphoglyceratkinase) auf ADP übertragen – Substratkettenphosphorylierung.

7 COENZYM A

Welches Vitamin ist als Bestandteil des Pantethein-Teils im Coenzym A enthalten?

Pantothensäure (Vitamin B5). Pantethein = Pantothensäure + Cysteamin (aus Cystein); dessen SH-Gruppe bildet die Thioester (Acetyl-CoA, Succinyl-CoA).

8 THIAMINPYROPHOSPHAT

Aus welchem Vitamin entsteht das Thiaminpyrophosphat der Pyruvat-Dehydrogenase?

Aus **Thiamin** (Vitamin B1). TPP decarboxyliert in der PDH (E1) das Pyruvat. Mangel → Beriberi bzw. Wernicke-Enzephalopathie (Alkoholiker), Laktat ↑, weil Pyruvat nicht mehr abgebaut wird.

9 LIPOAMID

Welche Bindung entsteht, wenn die Carboxylgruppe der Liponsäure mit der Aminogruppe eines Lysins reagiert?

Amidbindung (Carbonsäure + Amin → Amid + H_2O). Das Ergebnis heißt **Lipoamid** bzw. Lipoyllysin. Der lange Lysinarm lässt die Liponsäure wie einen „Schwenkarm“ zwischen den drei aktiven Zentren der PDH pendeln.

10 RIBOFLAVIN

Worauf beziehen sich die Silben „Ribo“ und „Flavin“ im Namen Riboflavin (Vitamin B2)?

„Ribo“: die Seitenkette ist **Ribitol** – der Zuckeralkohol der Ribose (reduzierte Ribose; also keine echte Ribose, keine glykosidische Bindung). **„Flavin“**: von lat. *flavus* = **gelb** – das Ringsystem (Isoalloxazin) ist gelb gefärbt. Daraus entstehen FMN und FAD.

11 CITRATZYKLUS: COA-METABOLIT

Wie heißt der einzige Metabolit des Citratzyklus, der Coenzym A enthält?

Succinyl-CoA (Produkt der α-Ketoglutarat-Dehydrogenase). Acetyl-CoA wird in den Zyklus eingespeist, ist aber kein Zwischenprodukt des Zyklus.

12 ISOCITRAT-DEHYDROGENASE

Wie wirken NADH und ATP auf die Isocitrat-Dehydrogenase?

Beide **hemmen** das Enzym (Signal: Energie ist genug da). **Aktiviert** wird es durch **ADP** und **Ca^{2+}** (Muskelarbeit). Die ICDH ist das wichtigste Schrittmacherenzym des Zyklus.

13 ACONITASE

Was passiert im Citratzyklus mit dem Citrat in der ersten Reaktion?

Es wird durch die **Aconitase** zu **Isocitrat isomerisiert** (über cis-Aconitat: erst Wasser abspalten, dann wieder anlagern). Dabei wandert die OH-Gruppe von einem tertiären an ein sekundäres C-Atom – erst dann kann sie zur Ketogruppe oxidiert werden.

14 MEMBRANSTÄNDIGES ENZYM

Welches Enzym des Citratzyklus ist ein Membranprotein?

Die **Succinat-Dehydrogenase**. Sie sitzt in der inneren Mitochondrienmembran und ist gleichzeitig **Komplex II** der Atmungskette.

15 DECARBOXYLIERUNGEN

Wieviele C-Atome gehen in einer Runde des Citratzyklus als CO_2 verloren?

2 – bei der Isocitrat-Dehydrogenase und bei der α-Ketoglutarat-Dehydrogenase. Das entspricht den 2 C-Atomen des eingespeisten Acetylrests. (Feinheit: Die abgespaltenen C-Atome stammen in dieser Runde aus dem Oxalacetat-Teil, nicht aus dem gerade eingespeisten Acetylrest.)

16 $FADH_2$

An welches Enzym ist das im Citratzyklus entstehende $FADH_2$ fest gebunden?

An die **Succinat-Dehydrogenase**: Das FAD ist dort **kovalent** (an einen Histidinrest) gebunden. Die Elektronen gehen über Fe-S-Zentren direkt auf Ubichinon – das $FADH_2$ verlässt das Enzym nie.

17 VERWANDTER DER PDH

Welches Enzym des Citratzyklus ähnelt der Pyruvat-Dehydrogenase am meisten?

Die **α-Ketoglutarat-Dehydrogenase**: gleicher Aufbau aus E1/E2/E3 (E3 ist sogar dasselbe Protein), gleiche fünf Coenzyme (TPP, Liponsäure, CoA, FAD, NAD^+), gleicher Mechanismus (oxidative Decarboxylierung einer α-Ketosäure).

18 COA-BEDARF

Welches Enzym des Citratzyklus braucht Coenzym A für seine Reaktion?

> Die **α-Ketoglutarat-Dehydrogenase**: α-Ketoglutarat + NAD^+ + **CoA-SH** → Succinyl-CoA + CO_2 + NADH. (Citrat-Synthase und Succinyl-CoA-Synthetase **setzen** CoA frei, sie verbrauchen es nicht.)

19 ATP-SYNTHASE: ORT

In welcher Membran sind die ATP-Synthasen der Mitochondrien verankert?

> In der **inneren Mitochondrienmembran**, vor allem in der Cristae-Membran (als Dimere an den Cristae-Kanten aufgereiht). Die äußere Membran enthält keine.

20 ATP-SYNTHASE: AKTIVER TEIL

Wo befindet sich der enzymatisch aktive Teil der ATP-Synthase? (Außenseite · Intermembranraum · Cristae-Lumen · Matrix)

> **In der mitochondrialen Matrix.** Der F_1-Kopf ($\alpha_3\beta_3$, katalytische Zentren in den β-Untereinheiten) ragt in die Matrix; der F_O-Teil steckt in der Membran und leitet die Protonen. Das Lumen der Cristae ist mit dem Intermembranraum verbunden – dort ist die Protonenkonzentration hoch.

21 FUNKTION DER ATMUNGSKETTE

Was überträgt die Atmungskette aus der Matrix in den Intermembranraum/das Cristae-Lumen? (nur eine Antwort)

> **Protonen.** Die Komplexe I, III und IV pumpen H^+ nach außen; der entstehende Gradient (protonenmotorische Kraft) treibt die ATP-Synthase. Elektronen bleiben in der Membran und gehen auf O_2 in der Matrix; ATP wird in der Matrix gebildet und erst vom ANT hinaustransportiert.

Teil 2 – MC-Fragen

Frage 1 PDH: PRODUKTE

Welche Produkte entstehen bei der Umsetzung von Pyruvat durch die Pyruvat-Dehydrogenase?

A. Acetyl-CoA, CO_2 und NADH
B. Acyl-CoA und NAD^+
C. Lactat und NADH
D. Oxalacetat, CO_2 und $FADH_2$
E. Phosphoenolpyruvat und GDP

Richtig: **A** – Pyruvat + CoA + NAD^+ → Acetyl-CoA + CO_2 + NADH + H^+ (oxidative Decarboxylierung).

A	✓	Genau die Gesamtgleichung der PDH. Die Reaktion ist irreversibel – aus Acetyl-CoA kann der Mensch keine Glucose machen.
B	✗	„Acyl-CoA" ist der Oberbegriff für aktivierte Fettsäuren. NAD^+ wird verbraucht, nicht gebildet.
C	✗	Lactat entsteht durch die **Lactat-Dehydrogenase** – und die verbraucht NADH, statt es zu bilden.
D	✗	Oxalacetat entsteht aus Pyruvat durch die **Pyruvat-Carboxylase** – sie bindet CO_2 (ATP-, Biotin-abhängig), statt es freizusetzen.
E	✗	PEP entsteht aus Oxalacetat durch die **PEP-Carboxykinase** (GTP → GDP) in der Gluconeogenese.

Frage 2 PDH: REGULATION

Welche Aussage trifft <u>nicht</u> zu? Der Pyruvat-Dehydrogenase-Komplex …

A. katalysiert in einer Teilreaktion die Decarboxylierung von Pyruvat
B. katalysiert in einer Teilreaktion die Bildung von Acetyl-Lipoat aus Hydroxyethyl-Thiamindiphosphat
C. benötigt FAD als Oxidationsmittel
D. wird durch cAMP-abhängige Phosphorylierung aktiviert
E. wird durch Acetyl-CoA gehemmt

Richtig: **D** – Phosphorylierung (durch die PDH-Kinase, nicht cAMP-abhängig) **inaktiviert** die PDH.

A	✗	Stimmt: E1 (mit TPP) spaltet CO_2 ab, es entsteht Hydroxyethyl-TPP.
B	✗	Stimmt: Der Hydroxyethylrest wird auf die Liponsäure von E2 übertragen und dabei zu Acetyl oxidiert → Acetyl-Lipoat (Acetyl-Dihydrolipoamid).
C	✗	Stimmt: E3 (Dihydrolipoyl-Dehydrogenase) reoxidiert das Dihydrolipoamid mit **FAD**; $FADH_2$ gibt die Elektronen dann an NAD^+ weiter.
D	✓	Falsch: Die **PDH-Kinase** phosphoryliert E1 und schaltet die PDH damit **aus**; die PDH-Phosphatase (aktiviert durch Insulin, Ca^{2+}) schaltet sie wieder ein. cAMP/PKA spielt dabei keine Rolle.
E	✗	Stimmt: Acetyl-CoA und NADH hemmen als Produkte und aktivieren zusätzlich die PDH-Kinase.

Merke: PDH: phosphoryliert = inaktiv, dephosphoryliert = aktiv. Insulin → PDH-Phosphatase → PDH an.

Frage 3 PDH: COENZYME UND REGULATION

Welche Aussage über den Pyruvat-Dehydrogenase-Komplex trifft nicht zu?

A. Thiamindiphosphat (TPP) ist eines der benötigten Coenzyme.
B. NAD^+ ist ein Cosubstrat.
C. Das Enzym liegt bei hohem Glucoseangebot vorwiegend im aktiven Zustand vor.
D. Eine Phosphatase bewirkt durch eine Dephosphorylierung die Aktivierung des Enzyms.
E. ATP ist ein allosterischer Aktivator.

Richtig: **E** – ATP **hemmt** die PDH (indirekt über Aktivierung der PDH-Kinase).

A	✗	Stimmt: TPP in E1.
B	✗	Stimmt: NAD^+ wird als Cosubstrat zu NADH reduziert (wie CoA wird es verbraucht, nicht fest gebunden).
C	✗	Stimmt: Viel Glucose → Insulin → PDH-Phosphatase aktiv → PDH dephosphoryliert und aktiv; außerdem hemmt Pyruvat die PDH-Kinase.
D	✗	Stimmt: Die PDH-Phosphatase aktiviert durch Dephosphorylierung.
E	✓	Falsch: Viel ATP (und NADH, Acetyl-CoA) heißt „Energie genug“ – das aktiviert die PDH-Kinase und schaltet die PDH ab. Aktivierend wirken ADP, Pyruvat und Ca^{2+} (hemmen die Kinase).

Merke: Die fünf Coenzyme der PDH: TPP (B1) · Liponsäure · CoA (B5) · FAD (B2) · NAD^+ (B3).

Frage 4 PDH: REIHENFOLGE

Welche Reihenfolge der Reaktionen der PDH trifft zu?

A. Oxidation von $FADH_2$ – Decarboxylierung – Reduktion der Liponsäure – Transacetylierung
B. Transacetylierung – Decarboxylierung – Reduktion der Liponsäure – Reduktion von NAD
C. Reduktion der Liponsäure – Transacetylierung – Decarboxylierung – Oxidation von $FADH_2$
D. Decarboxylierung – Reduktion der Liponsäure – Transacetylierung – Reduktion von NAD
E. Reduktion der Liponsäure – Oxidation von $FADH_2$ – Transacetylierung – Decarboxylierung

Richtig: **D** – E1 decarboxyliert → Acetylrest auf Liponsäure (die dabei reduziert wird) → E2 überträgt ihn auf CoA → E3 regeneriert die Liponsäure, am Ende wird NAD^+ reduziert.

A	✗	Die Oxidation von $FADH_2$ (auf NAD^+) ist der **letzte** Schritt, nicht der erste.
B	✗	Bevor eine Acetylgruppe übertragen werden kann, muss erst Pyruvat decarboxyliert werden.
C	✗	Die Decarboxylierung steht ganz am Anfang; ohne sie gibt es nichts, was die Liponsäure reduzieren könnte.
D	✓	Richtig: 1. Decarboxylierung (E1, TPP) → 2. Übertragung des Hydroxyethylrests auf Lipoamid, das dabei **reduziert** wird (Acetyl-Dihydrolipoamid) → 3. **Transacetylierung** auf CoA (E2) → 4. E3 reoxidiert das Dihydrolipoamid mit FAD, $FADH_2$ **reduziert NAD^+**.
E	✗	Beginnt ebenfalls nicht mit der Decarboxylierung und endet sogar damit.

Frage 5 PDH-ERKRANKUNGEN

Erkrankungen des Pyruvat-DH-Komplexes sind: 1 Leigh-Syndrom · 2 von-Gierke-Syndrom · 3 Primäre biliäre Leberzirrhose · 4 Xeroderma pigmentosum

A. nur 1 und 2 sind richtig
B. nur 1 und 3 sind richtig
C. nur 2 und 3 sind richtig
D. nur 1, 2 und 4 sind richtig
E. 1–4 = alle sind richtig

Richtig: **B** – Leigh-Syndrom (u. a. durch PDH-Mangel) und primär biliäre Cholangitis (Autoantikörper gegen die E2-Untereinheit der PDH).

A	✗	2 ist falsch: Morbus **von Gierke** = Glykogenose Typ I (Glucose-6-Phosphatase-Mangel).
B	✓	1: Das **Leigh-Syndrom** (subakute nekrotisierende Enzephalomyelopathie) wird u. a. durch PDH-Mangel (oft E1α, X-chromosomal) verursacht – Laktatazidose, neurologische Ausfälle. 3: Bei der **primär biliären Cholangitis** (früher „Zirrhose“) richten sich die typischen **antimitochondrialen Antikörper (AMA-M2)** gegen die E2-Untereinheit der PDH.
C	✗	2 ist falsch (Glykogenose).
D	✗	2 und 4 sind falsch: **Xeroderma pigmentosum** = Defekt der Nukleotidexzisionsreparatur (UV-Schäden der DNA).
E	✗	2 und 4 sind falsch.

Merke: PDH-Mangel → Pyruvat staut sich → Lactat ↑ (Laktatazidose). Therapieansatz: ketogene Diät (Energie ohne Umweg über die PDH).

Frage 6 VERWANDTER DER PDH

Welches Enzym des Citratzyklus nutzt die gleichen Coenzyme und hat den prinzipiell gleichen Mechanismus wie die PDH?

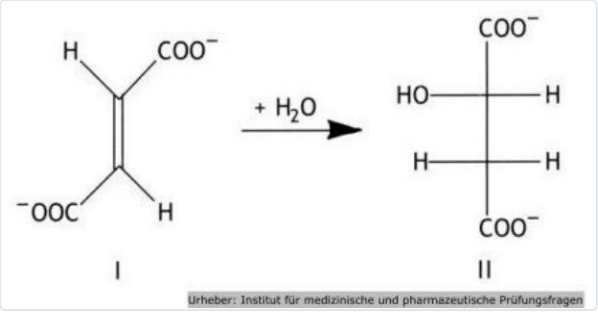
A. Isocitrat-Dehydrogenase
B. α-Ketoglutarat-Dehydrogenase
C. Malat-Dehydrogenase
D. Succinat-Dehydrogenase
E. Succinyl-CoA-Synthetase

Richtig: **B** – Die α-KGDH ist ebenfalls ein E1/E2/E3-Komplex mit TPP, Lipoamid, CoA, FAD und NAD^+.

A	✗	Die ICDH decarboxyliert zwar auch oxidativ, braucht aber nur NAD^+ (und Mn^{2+}/Mg^{2+}) – kein TPP, keine Liponsäure, kein CoA.
B	✓	Oxidative Decarboxylierung einer α-Ketosäure (α-Ketoglutarat statt Pyruvat) zu einem Thioester (Succinyl-CoA statt Acetyl-CoA). E3 ist bei beiden Komplexen dasselbe Protein.
C	✗	Die MDH oxidiert Malat mit NAD^+ zu Oxalacetat – eine einfache Dehydrierung ohne Decarboxylierung.
D	✗	Die SDH oxidiert Succinat zu Fumarat mit kovalent gebundenem FAD.
E	✗	Die Succinyl-CoA-Synthetase spaltet den Thioester und bildet dabei GTP (Substratkettenphosphorylierung).

Frage 7 FUMARASE

Im Citrat-Zyklus läuft die abgebildete Reaktion ab. Welche Aussage trifft zu?



A. I ist das Anion der Bernsteinsäure.
B. II ist Malat.
C. II ist α-Ketoglutarat.
D. Die Reaktion von I nach II ist eine Isomerisierung.
E. Die Reaktion von I nach II ist eine Kondensation.

Richtig: **B** – I ist Fumarat (trans-Doppelbindung), Wasseranlagerung (Fumarase) ergibt L-Malat.

A	✗	I hat eine **Doppelbindung** mit trans-ständigen Carboxylaten → **Fumarat** (Anion der Fumarsäure). Bernsteinsäure (Succinat) ist gesättigt (–CH_2–CH_2–).
B	✓	II ist eine C4-Dicarbonsäure mit einer OH-Gruppe: HOOC–CHOH–CH_2–COOH = **Malat** (in der Fischer-Projektion OH links → L-Malat).
C	✗	α-Ketoglutarat hat 5 C-Atome und eine Ketogruppe.
D	✗	Bei einer Isomerisierung bleibt die Summenformel gleich. Hier kommt H_2O hinzu → **Hydratisierung** (Addition).
E	✗	Bei einer Kondensation wird Wasser **abgespalten** (zwei Moleküle verknüpfen sich). Hier wird Wasser angelagert.

Frage 8 CO_2-FREISETZUNG

Welches der genannten Enzyme setzt beim vollständigen Abbau von Glucose CO_2 frei?

A. Aconitase
B. Glycerinaldehyd-3-phosphat-Dehydrogenase
C. Pyruvat-Dehydrogenase
D. Pyruvat-Kinase
E. Succinat-Dehydrogenase

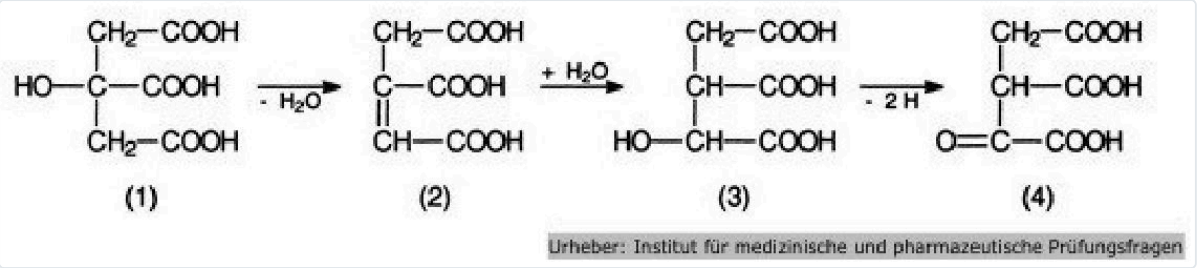
Richtig: **C** – Die PDH spaltet das erste CO_2 des Glucoseabbaus ab.

A	✗	Aconitase isomerisiert Citrat zu Isocitrat – keine Decarboxylierung.
B	✗	GAPDH oxidiert und phosphoryliert (→ 1,3-Bisphosphoglycerat); die Glykolyse setzt insgesamt kein CO_2 frei.
C	✓	PDH: Pyruvat → Acetyl-CoA + **CO_2**. Die übrigen CO_2 des Glucoseabbaus kommen von ICDH und α-KGDH (insgesamt 6 CO_2 pro Glucose).
D	✗	Pyruvat-Kinase: PEP + ADP → Pyruvat + ATP – kein CO_2.
E	✗	SDH: Succinat → Fumarat (Dehydrierung) – kein CO_2.

Merke: CO_2 beim Glucoseabbau: PDH, Isocitrat-DH, α-Ketoglutarat-DH (+ im Pentosephosphatweg die 6-Phosphogluconat-DH).

Frage 9 CITRAT → OXALSUCCINAT

Welche Aussage zu den abgebildeten Reaktionen des Citratzyklus trifft nicht zu?



A. Die Reaktion (1) → (2) ist eine Eliminierung.
B. Die Reaktion (2) → (3) ist eine Addition.
C. Die Reaktion (3) → (4) ist eine Oxidation.
D. (1) und (3) sind Konstitutionsisomere.
E. (3) und (4) sind Keto-Enol-Tautomere.

Richtig: **E** – (3) Isocitrat und (4) Oxalsuccinat unterscheiden sich um 2 H – das ist eine Oxidation, keine Tautomerie.

A	✗	Stimmt: Citrat (1) → cis-Aconitat (2) unter Abspaltung von H_2O = Eliminierung (Dehydratisierung).
B	✗	Stimmt: cis-Aconitat (2) + H_2O → Isocitrat (3) = Addition (Hydratisierung).
C	✗	Stimmt: Isocitrat (3) − 2 H → Oxalsuccinat (4): Die sekundäre OH-Gruppe wird zur Ketogruppe oxidiert (ICDH, NAD^+). Danach folgt die Decarboxylierung zu α-Ketoglutarat.
D	✗	Stimmt: Citrat und Isocitrat haben dieselbe Summenformel ($C_6H_8O_7$), aber die OH-Gruppe sitzt an einem anderen C-Atom → Konstitutionsisomere.
E	✓	Falsch: Tautomere haben die **gleiche Summenformel** (nur ein H und eine Doppelbindung wandern). (4) hat 2 H weniger als (3). Außerdem ist (3) kein Enol, sondern ein Alkohol.

Merke: Aconitase = Eliminierung + Addition von Wasser (→ Isomerisierung) · ICDH = Oxidation + Decarboxylierung.

Frage 10 CITRATZYKLUS: BILANZ

Welche Aussage über den Citratzyklus trifft nicht zu? Bei Durchsatz einer Acetylgruppe …

A. wird auf drei NAD^+ jeweils ein Hydridion übertragen
B. werden Reduktionsäquivalente auf FAD übertragen
C. wird intermediär ein Molekül Liponsäureamid reduziert
D. wird ein Molekül cis-Aconitat unter NAD^+-Verbrauch zu Isocitrat oxidiert
E. entsteht bei der Oxidation eines Moleküls α-Ketoglutarat ein energiereicher Thioester

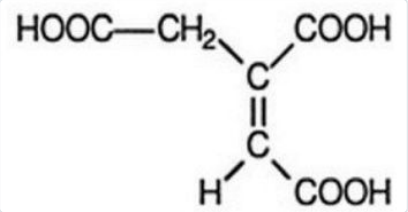
Richtig: **D** – cis-Aconitat wird zu Isocitrat **hydratisiert** (Wasseranlagerung, Aconitase) – ohne NAD^+, keine Oxidation.

A	✗	Stimmt: ICDH, α-KGDH und MDH bilden je 1 NADH; NAD^+ nimmt dabei jeweils ein Hydridion ($H^- = 1\,H^+ + 2\,e^-$) auf.
B	✗	Stimmt: Succinat-Dehydrogenase → $FADH_2$.
C	✗	Stimmt: In der α-KGDH wird (wie in der PDH) das Lipoamid von E2 vorübergehend reduziert und dann von E3 wieder oxidiert.
D	✓	Falsch: Die Aconitase lagert Wasser an – Isocitrat und cis-Aconitat haben die gleiche Oxidationsstufe. NAD^+ braucht erst der nächste Schritt (ICDH).

E ✗ Stimmt: α-Ketoglutarat → **Succinyl-CoA** (Thioester). Dessen Energie nutzt die Succinyl-CoA-Synthetase zur GTP-Bildung.

Frage 11 ACONITSÄURE

Welche Aussage zur abgebildeten Aconitsäure trifft nicht zu?



A. Es handelt sich um eine Tricarbonsäure.
B. Im Citrat-Zyklus ist Aconitsäure ein enzymgebundenes Intermediat.
C. Die Doppelbindung der abgebildeten Aconitsäure ist cis-konfiguriert.
D. Im Citratzyklus entsteht Aconitat aus Citrat.
E. Im Citratzyklus wird Aconitat decarboxyliert.

Richtig: **E** – cis-Aconitat wird hydratisiert (zu Isocitrat), nicht decarboxyliert.

A ✗ Stimmt: drei COOH-Gruppen → Tricarbonsäure (daher „Tricarbonsäurezyklus“).

B ✗ Stimmt: cis-Aconitat verlässt die Aconitase normalerweise nicht – es wird im aktiven Zentrum „umgedreht“ und sofort wieder hydratisiert.

C ✗ Stimmt: Die beiden direkt an der Doppelbindung sitzenden COOH-Gruppen stehen auf derselben Seite (in der Abbildung beide rechts) → (Z)- bzw. **cis**-Aconitsäure, die Form im Citratzyklus.

D ✗ Stimmt: Aconitase spaltet aus Citrat H_2O ab → cis-Aconitat.

E ✓ Falsch: Aconitat wird zu Isocitrat hydratisiert. Decarboxyliert wird erst das Oxalsuccinat (an der ICDH).

Frage 12 SUCCINAT-DEHYDROGENASE

Welche Aussage trifft nicht zu? Die Succinat-Dehydrogenase …

A. ist ein membrangebundenes Enzym des Citratzyklus
B. enthält kovalent gebundenes FAD als prosthetische Gruppe
C. enthält Eisen-Schwefel-Komplexe, die Elektronen auf die Atmungskette übertragen
D. ist Teil des Komplexes II der Atmungskette (Succinat-Ubichinon-Reduktase)
E. wird durch Malonat aktiviert

Richtig: **E** – Malonat ist der klassische **kompetitive Hemmstoff** der SDH.

A ✗ Stimmt: das einzige membrangebundene Enzym des Zyklus (innere Mitochondrienmembran).

B ✗ Stimmt: FAD ist kovalent an einen Histidinrest gebunden.

C ✗ Stimmt: Die Elektronen gehen von $FADH_2$ über drei Fe-S-Zentren auf Ubichinon.

D ✗ Stimmt: SDH = Komplex II (pumpt selbst keine Protonen).

E ✓ Falsch: **Malonat** ($^-OOC–CH_2–COO^-$) ähnelt Succinat ($^-OOC–CH_2–CH_2–COO^-$), bindet ins aktive Zentrum, kann aber nicht dehydriert werden → kompetitive Hemmung.

Frage 13 SUCCINYL-COA

Welche Aussage zu Succinyl-CoA trifft zu?

A. entsteht im Citratzyklus als Produkt der Reaktion der Isocitrat-Dehydrogenase
B. kann in einer ATP-abhängigen Reaktion in Glutamat überführt werden
C. reagiert mit Glycin unter Bildung von 5-Aminolävulinat
D. wird im Citrat-Zyklus zu Oxalacetat decarboxyliert
E. wird in den Mitochondrien vom Komplex II der Atmungskette oxidiert

Richtig: **C** – Erster Schritt der Hämsynthese: Succinyl-CoA + Glycin → δ-Aminolävulinat + CoA + CO_2 (ALA-Synthase, Pyridoxalphosphat).

A	✗	Die ICDH bildet α-Ketoglutarat. Succinyl-CoA entsteht erst durch die **α-Ketoglutarat-DH**.
B	✗	Glutamat entsteht aus **α-Ketoglutarat** (Transaminierung oder Glutamat-Dehydrogenase), nicht aus Succinyl-CoA.
C	✓	Stimmt: Die **δ-ALA-Synthase** (Schrittmacher der Hämsynthese, in den Mitochondrien) verknüpft Succinyl-CoA mit Glycin.
D	✗	Succinyl-CoA wird zu Succinat gespalten (GTP-Bildung). Weitere Decarboxylierungen gibt es danach im Zyklus nicht.
E	✗	Komplex II oxidiert **Succinat**, nicht Succinyl-CoA.

Frage 14 REGULATION BEI ARBEIT

Was liegt der Aktivitätszunahme des Citrat-Zyklus bei körperlicher Arbeit zugrunde?

A. Abfall der Konzentration der C4-Intermediate
B. Aktivierung mehrerer Enzyme infolge Abnahme des Quotienten NADH/NAD^+
C. allosterische Aktivierung der Fumarase infolge Zunahme der ADP-Konzentration
D. allosterische Aktivierung der Isocitrat-Dehydrogenase infolge Zunahme der NADH-Konzentration
E. Produkthemmung der Citrat-Synthase

Richtig: **B** – Bei Arbeit verbraucht die Atmungskette NADH schneller → NADH/NAD^+ sinkt → Hemmung von Citrat-Synthase, ICDH und α-KGDH fällt weg.

A	✗	Weniger C4-Intermediate (v. a. Oxalacetat) würde den Zyklus **bremsen** – Oxalacetat ist das Substrat der Citrat-Synthase.
B	✓	Stimmt: ATP-Verbrauch → ADP ↑ → ATP-Synthase und Atmungskette laufen schneller → NADH wird schneller reoxidiert. Zusätzlich aktivieren Ca^{2+} und ADP ICDH und α-KGDH.
C	✗	Die Fumarase ist nicht allosterisch reguliert; sie arbeitet nahe am Gleichgewicht.
D	✗	NADH **hemmt** die ICDH; bei Arbeit sinkt es.
E	✗	Eine Produkthemmung würde die Aktivität senken, nicht steigern.

Merke: Der Citratzyklus folgt der Atmungskette: Er läuft so schnell, wie NAD^+ und FAD zurückgeliefert werden (respiratorische Kontrolle).

Frage 15 ANABOLE FUNKTIONEN

Welche Aussage trifft nicht zu? Zu den anabolen Funktionen des Citratzyklus gehört die …

A. Bildung von Citrat für die Fettsäuresynthese
B. Bereitstellung des Kohlenstoffgerüstes für die Glutaminsäuresynthese
C. Bildung von Oxalacetat für die Gluconeogenese
D. Bildung von Acetyl-CoA für die Cholesterolsynthese
E. Bildung von Succinyl-CoA für die Porphyrinsynthese

Richtig: **D** – Der Citratzyklus bildet kein Acetyl-CoA – er verbraucht es.

A	✗	Stimmt: Citrat geht über den Citrat-Carrier ins Zytosol; die ATP-Citrat-Lyase macht daraus Acetyl-CoA + Oxalacetat für die Fettsäuresynthese (Citrat-Malat-Shuttle).
B	✗	Stimmt: α-Ketoglutarat → Glutamat (Transaminierung/GLDH).
C	✗	Stimmt: Oxalacetat (als Malat ins Zytosol) → PEP für die Gluconeogenese.
D	✓	Falsch: Acetyl-CoA ist kein Zwischenprodukt des Zyklus, sondern sein Substrat (aus PDH oder β-Oxidation). Für die Cholesterinsynthese im Zytosol kommt es zwar über exportiertes Citrat – das ist aber die Funktion aus A.
E	✗	Stimmt: Succinyl-CoA + Glycin → δ-ALA (siehe Frage 13).

Frage 16 ALLOSTERISCHE ENZYME

Welche Aussage trifft nicht zu? Wichtige allosterisch regulierte Enzyme im Energiestoffwechsel sind:

A. Pyruvat-Carboxylase
B. Pyruvat-Dehydrogenase
C. Malat-Dehydrogenase
D. Isocitrat-Dehydrogenase
E. Phosphofructokinase 1

Richtig: **C** – Die Malat-Dehydrogenase arbeitet nahe am Gleichgewicht und wird nur über Substrat- und Produktkonzentration gesteuert.

A	✗	Stimmt: Acetyl-CoA aktiviert sie allosterisch (Signal: genug Acetyl-CoA → Oxalacetat nachliefern bzw. Gluconeogenese).
B	✗	Stimmt: gehemmt durch Acetyl-CoA und NADH (Produkte), daneben Interkonversion (PDH-Kinase/-Phosphatase).
C	✓	Falsch: Die MDH ist **nicht allosterisch** reguliert. Ihr Gleichgewicht liegt sogar stark auf der Malatseite; die Reaktion läuft nur, weil die Citrat-Synthase Oxalacetat sofort wegfängt.
D	✗	Stimmt: aktiviert durch ADP und Ca^{2+}, gehemmt durch ATP und NADH.
E	✗	Stimmt: das wichtigste Schrittmacherenzym der Glykolyse (Aktivatoren AMP, Fructose-2,6-bisphosphat; Hemmstoffe ATP, Citrat).

Frage 17 ATMUNGSKETTENKOMPLEXE

Welche Aussage zu Komponenten der Atmungskette trifft zu?

A. Komplex I ist eine NADPH-abhängige Oxidase.
B. Komplex II fungiert auch als Succinat-Dehydrogenase des Citrat-Zyklus.
C. Komplex III überträgt Elektronen von Cytochrom c auf Ubichinon.
D. Komplex IV synthetisiert ATP.
E. Cytochrom c ist ein lösliches Protein der mitochondrialen Matrix.

Richtig: **B** – Komplex II = Succinat-Dehydrogenase (Succinat-Ubichinon-Oxidoreduktase).

A	✗	Komplex I ist die **NADH**-Ubichinon-Oxidoreduktase. NADPH dient der Biosynthese und Entgiftung, nicht der Atmungskette.
B	✓	Stimmt: dasselbe Enzym ist Teil des Citratzyklus und der Atmungskette.
C	✗	Umgekehrt: Komplex III überträgt Elektronen von **Ubichinol (QH_2) auf Cytochrom c** (Q-Zyklus).
D	✗	Komplex IV (Cytochrom-c-Oxidase) reduziert O_2 zu H_2O und pumpt H^+. ATP bildet die ATP-Synthase (Komplex V).
E	✗	Cytochrom c ist ein lösliches Protein im **Intermembranraum** (lose an der Außenseite der inneren Membran). Bei der Apoptose wird es ins Zytosol freigesetzt.

Merke: I: NADH → Q · II: Succinat → Q · III: QH_2 → Cyt c · IV: Cyt c → O_2 · V: ATP-Synthase. Protonen pumpen I, III, IV (4 + 4 + 2 H^+ pro NADH).

Frage 18 ENTKOPPLER

Welche Veränderung bewirkt ein Entkoppler der Atmungskette typischerweise?

A. Abnahme der ATP-Synthese
B. Abnahme des Sauerstoffverbrauchs
C. Blockade des Elektronentransports in der Atmungskette
D. Blockade des Protonentransports in der Atmungskette
E. Hemmung der Cytochrom-c-Oxidase

Richtig: **A** – Ein Entkoppler lässt die Protonen an der ATP-Synthase vorbei zurückfließen – der Gradient fehlt, ATP-Synthese sinkt.

A	✓	Stimmt: Entkoppler (z. B. 2,4-Dinitrophenol, Thermogenin) machen die innere Membran für H^+ durchlässig. Die Energie wird als Wärme frei statt als ATP.
B	✗	Umgekehrt: Ohne Gegendruck des Gradienten läuft die Atmungskette ungebremst – der O_2-Verbrauch **steigt**.
C	✗	Der Elektronentransport läuft schneller, nicht langsamer. Blockieren tun **Hemmstoffe** (Rotenon an I, Antimycin A an III, Cyanid/CO an IV).
D	✗	Die Komplexe pumpen weiter Protonen – die fließen nur sofort zurück.
E	✗	Hemmung der Cytochrom-c-Oxidase = Cyanid, CO, Azid, H_2S – das sind Hemmstoffe, keine Entkoppler.

Merke: Hemmstoff: O_2-Verbrauch ↓ und ATP ↓ · Entkoppler: O_2-Verbrauch ↑ und ATP ↓ (+ Wärme ↑) · Oligomycin (hemmt ATP-Synthase): ATP ↓ und O_2-Verbrauch ↓.

Frage 19 RECHNUNG: WASSERSTOFF

$4\ H^+ + 4\ e^- + O_2 \rightarrow 2\ H_2O$. Etwa wie viel Gramm Wasserstoff müssen umgesetzt werden, um 90 g H_2O zu erhalten?

A. 2 g
B. 4 g
C. 8 g
D. 10 g
E. 14 g

Richtig: **D** – 90 g H_2O = 5 mol; jedes H_2O enthält 2 H → 10 mol H ≈ 10 g.

A	✗	Entspräche nur 1 mol H_2O (18 g).
B	✗	Entspräche 2 mol H_2O (36 g).
C	✗	Entspräche 4 mol H_2O (72 g).
D	✓	$M(H_2O)$ = 18 g/mol → 90 g = **5 mol** H_2O. Darin stecken 2 × 5 = 10 mol H (je $H^+ + e^-$). M(H) ≈ 1 g/mol → **10 g**. Den Rest (80 g) liefert der Sauerstoff (2,5 mol O_2).
E	✗	Passt zu keiner sinnvollen Rechnung (z. B. Molmassen verwechselt).

Frage 20 PROTONENPUMPEN

Was wird von den Komplexen I, III und IV in den Intermembranraum transportiert?

A. Elektronen
B. Kohlendioxid
C. NADPH
D. H^+
E. Sauerstoff

Richtig: **D** – Komplex I, III und IV sind Protonenpumpen.

A	✗	Elektronen wandern innerhalb der Membran von Komplex zu Komplex und landen am Ende auf O_2 auf der Matrixseite.
B	✗	CO_2 entsteht im Citratzyklus und diffundiert frei durch die Membranen.
C	✗	NADPH wird nicht transportiert und spielt für die Atmungskette keine Rolle.
D	✓	Stimmt: Pro NADH pumpen I (4), III (4) und IV (2) zusammen etwa **10 H^+** nach außen.
E	✗	O_2 diffundiert frei und wird an Komplex IV auf der Matrixseite zu Wasser reduziert.

Frage 21 ATP-SYNTHASE

Welche Aussage zur ATP-Synthase der inneren Mitochondrienmembran trifft zu?

A. Der F_O-Teil ist die eigentliche katalytische Einheit (mit drei katalytischen Zentren).
B. Der Protonengradient ergibt sich daraus, dass der pH in der Matrix niedriger ist als im Intermembranraum.
C. Die ATP-Synthase benötigt Elektronen, die sie über Cytochrom c vom Komplex IV erhält.
D. Die Protonen werden ins Zentrum des F_1-Teils geleitet, wo sie durch Bindung an Histidinreste die Freisetzung des ATP bewirken.
E. Im F_1-Teil der aktiven ATP-Synthase rotiert die γ-Untereinheit relativ zum $\alpha_3\beta_3$-Hexamer.

Richtig: **E** – Der Protonenfluss durch F_O dreht den c-Ring samt γ-Untereinheit; die rotierende γ-Achse verformt nacheinander die drei β-Untereinheiten (Bindungswechsel-Mechanismus nach Boyer).

A	✗	Die drei katalytischen Zentren liegen im **F_1**-Teil (in den β-Untereinheiten). F_O ist der Protonenkanal und Rotor.
B	✗	Umgekehrt: Die Matrix ist **alkalischer** (pH ≈ 8), der Intermembranraum saurer (pH ≈ 7) – denn dorthin werden die Protonen gepumpt.
C	✗	Die ATP-Synthase braucht keine Elektronen, nur den Protonengradienten. Cytochrom c gibt seine Elektronen an Komplex IV ab, nicht umgekehrt.
D	✗	Die Protonen fließen durch F_O (zwischen a-Untereinheit und c-Ring) und gelangen gar nicht in den F_1-Teil. Die ATP-Freisetzung wird durch die Rotation der γ-Untereinheit bewirkt.
E	✓	Stimmt: γ (mit ε und dem c-Ring) ist der Rotor, $\alpha_3\beta_3$ wird vom peripheren Stiel festgehalten (Stator). Jede β-Untereinheit durchläuft die Zustände offen → locker → fest.

Merke: Pro 360°-Umdrehung entstehen 3 ATP; dafür fließen etwa 8–10 H^+ (je nach Größe des c-Rings). Dazu kommt 1 H^+ für den Phosphat-Import → etwa 2,5 ATP pro NADH, 1,5 pro $FADH_2$.

Frage 22 RECHNUNG: ΔG

NADH/NAD^+: E°′ ≈ −0,32 V; ½ O_2/H_2O: E°′ ≈ +0,81 V; F ≈ 96,5 kJ·V^{-1}·mol^{-1}; 2 Elektronen. Wie groß ist ΔG°′?

A. −436 kJ·mol^{-1}
B. −218 kJ·mol^{-1}
C. −109 kJ·mol^{-1}
D. −47 kJ·mol^{-1}
E. +218 kJ·mol^{-1}

Richtig: **B** – $\Delta G^{\circ\prime} = -n \cdot F \cdot \Delta E^{\circ\prime} = -2 \times 96{,}5 \times 1{,}13 \approx -218$ kJ/mol.

A	✗	Doppelter Wert – entspräche 4 Elektronen (also 2 NADH bzw. einem ganzen O_2).
B	✓	$\Delta E^{\circ\prime}$ = E°′(Akzeptor) − E°′(Donor) = 0,81 − (−0,32) = **1,13 V**. $\Delta G^{\circ\prime} = -2 \times 96{,}5 \times 1{,}13 \approx$ **−218 kJ/mol**. Negativ, weil die Elektronen „bergab" zum O_2 fließen.
C	✗	Halber Wert – entspräche nur 1 Elektron (n = 1 vergessen).
D	✗	Entsteht, wenn man das Minus beim NADH-Potenzial übersieht (0,81 − 0,32 = 0,49 V) und zusätzlich n = 1 nimmt: $-1 \times 96{,}5 \times 0{,}49 \approx -47$.
E	✗	Richtiger Betrag, aber falsches Vorzeichen: Die Reaktion läuft freiwillig ab (exergon).

Merke: $\Delta G^{\circ\prime} = -n \cdot F \cdot \Delta E^{\circ\prime}$. Mit −218 kJ/mol ließen sich theoretisch etwa 7 ATP (je ≈ 30,5 kJ/mol) bilden; tatsächlich entstehen ≈ 2,5 (Wirkungsgrad ≈ 35–40 %). (Im Original steht „O_2^-/½ O_2" – gemeint ist das Redoxpaar ½ O_2/H_2O.)

Frage 23 BILANZ PYRUVAT

Welche Komponenten entstehen beim vollständigen oxidativen Abbau von Pyruvat in den Mitochondrien?

A. 1 CO_2 + 1 NADH + 1 Succinyl-CoA
B. 1 CO_2 + 1 NADH + 1 Lactat
C. 2 CO_2 + 3 NADH + 1 $FADH_2$ + 1 GTP
D. 3 CO_2 + 2 NADH + 1 $FADH_2$ + 1 GTP
E. 3 CO_2 + 4 NADH + 1 $FADH_2$ + 1 GTP

Richtig: **E** – PDH (1 CO_2, 1 NADH) + eine Runde Citratzyklus (2 CO_2, 3 NADH, 1 $FADH_2$, 1 GTP).

A	✗	Succinyl-CoA ist ein Zwischenprodukt, kein Endprodukt des vollständigen Abbaus.
B	✗	Lactat entsteht anaerob im Zytosol (LDH) und verbraucht NADH.
C	✗	Das ist nur die Bilanz **einer Runde Citratzyklus** (ab Acetyl-CoA) – die PDH fehlt.
D	✗	Ein NADH zu wenig: Es fehlen entweder das NADH der PDH oder eines der drei NADH des Zyklus.
E	✓	Pyruvat hat 3 C → **3 CO_2**. NADH: PDH + ICDH + α-KGDH + MDH = **4**. $FADH_2$: SDH = 1. GTP: Succinyl-CoA-Synthetase = 1.

Merke: Pro Pyruvat ≈ 4 × 2,5 + 1 × 1,5 + 1 = 12,5 ATP; pro Glucose insgesamt ≈ 30–32 ATP.

Frage 24 ELEKTRONENÜBERTRÄGER

Welche Aussage zur Atmungskette in der inneren Mitochondrienmembran trifft zu?

A. Die Succinat-Dehydrogenase überträgt zwei Elektronen auf den Komplex I der Atmungskette.
B. Ein 4Fe-4S-Zentrum nimmt vier Elektronen auf und gibt sie dann einzeln wieder ab.
C. Ein reduziertes Cytochrom-c-Molekül transportiert jeweils ein Elektron zur Cytochrom-c-Oxidase.
D. $FADH_2$ überträgt Hydridionen gekoppelt mit einem transmembranären Protonentransport auf Ubichinon.
E. Ubichinon ist ein kovalent gebundener Bestandteil des Komplexes III der Atmungskette.

Richtig: **C** – Cytochrom c trägt ein Häm, dessen Eisen zwischen Fe^{3+} und Fe^{2+} wechselt – also genau 1 Elektron pro Transport.

A	✗	Die SDH (= Komplex II) gibt ihre Elektronen direkt an **Ubichinon** weiter; Komplex I wird umgangen. Deshalb liefert $FADH_2$ weniger ATP.
B	✗	Fe-S-Zentren sind **Ein-Elektronen-Überträger**: Ein 4Fe-4S-Zentrum nimmt unabhängig von der Zahl seiner Eisenatome nur 1 Elektron auf.
C	✓	Stimmt: Cyt c pendelt im Intermembranraum zwischen Komplex III und IV und trägt jeweils 1 e^-. Für ein O_2 braucht Komplex IV daher vier Cyt-c-Moleküle.
D	✗	Komplex II pumpt **keine Protonen**. Außerdem gehen die Elektronen von $FADH_2$ einzeln über Fe-S-Zentren, nicht als Hydridion.
E	✗	Ubichinon (Coenzym Q) ist ein frei **beweglich**es, lipidlösliches Molekül in der Membran (Q-Pool) und an keinen Komplex kovalent gebunden.

Frage 25 MITOCHONDRIALE CARRIER

Welche Aussage trifft <u>nicht</u> zu? Die innere Mitochondrienmembran enthält spezifische Transportsysteme für …

A. ATP
B. NADH
C. Citrat
D. Phosphat
E. Malat

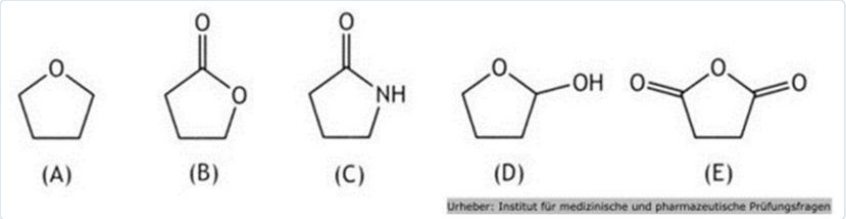
Richtig: **B** – Für NADH gibt es keinen Transporter – seine Elektronen werden über Shuttles in die Matrix gebracht.

A	✗	Stimmt: ADP/ATP-Translokator (ANT; Hemmstoff Atractylosid) tauscht ATP^{4-} (hinaus) gegen ADP^{3-} (hinein).

B	✓	Falsch: Zytosolisches NADH kann nicht in die Matrix. Seine Reduktionsäquivalente kommen über den **Malat-Aspartat-Shuttle** (→ NADH in der Matrix, Herz/Leber) oder den **Glycerin-3-phosphat-Shuttle** (→ $FADH_2$, Muskel/Gehirn) hinein.
C	✗	Stimmt: Citrat-Carrier (Tricarboxylat-Transporter; Citrat hinaus gegen Malat) – wichtig für die Fettsäuresynthese.
D	✗	Stimmt: Phosphat-Carrier (Symport mit H^+) liefert das P_i für die ATP-Synthase.
E	✗	Stimmt: Malat-α-Ketoglutarat-Antiporter, Teil des Malat-Aspartat-Shuttles.

Frage 26 CYCLISCHES ANHYDRID

Für welches der cyclischen Moleküle trifft die Bezeichnung (Carbonsäure-)Anhydrid zu?



A. Molekül A
B. Molekül B
C. Molekül C
D. Molekül D
E. Molekül E

Richtig: **E** – Nur bei E sitzt das Ring-O zwischen zwei C=O-Gruppen: O=C–O–C=O (Bernsteinsäureanhydrid).

A	✗	Tetrahydrofuran: Ring-O zwischen zwei CH_2 → cyclischer **Ether**.
B	✗	γ-Butyrolacton: Ring-O neben **einer** C=O → cyclischer **Ester** (Lacton).
C	✗	2-Pyrrolidinon: N–H neben C=O → cyclisches **Amid** (Lactam).
D	✗	Ring-O und OH am selben C-Atom → cyclisches **Halbacetal** (wie bei Zuckern in Ringform).
E	✓	Zwei Carbonsäuregruppen unter Wasserabspaltung verknüpft: O=C–O–C=O → **Carbonsäureanhydrid** (Bernsteinsäureanhydrid, aus Succinat).

Merke: Gleiche Bindungstypen wie in Teil 1: Ether · Ester · Amid · Halbacetal · Anhydrid. In ATP/ADP stecken Phosphorsäure-Anhydride, im 1,3-Bisphosphoglycerat ein gemischtes Anhydrid.

Frage 27 THERMOGENIN

Erhöht sich die Dichte von Thermogenin (UCP-1) in der inneren Mitochondrienmembran, so …

A. wird diese Membran für H^+-Ionen permeabler
B. kann ein erhöhter Parasympathikotonus dafür die Ursache sein
C. sinkt in der betreffenden Zelle die Wärmebildung
D. kommt der aerobe Stoffwechsel dieser Zelle zum Erliegen
E. nimmt die mitochondriale ATP-Synthese zu

Richtig: **A** – UCP-1 ist ein Protonenkanal – ein körpereigener Entkoppler im braunen Fettgewebe.

A	✓	Stimmt: Protonen fließen durch UCP-1 an der ATP-Synthase vorbei zurück in die Matrix (aktiviert durch freie Fettsäuren).

B	✗	UCP-1 wird über den **Sympathikus** hochreguliert (Kälte → Noradrenalin → β3-Rezeptoren → Lipolyse und UCP-1-Expression).
C	✗	Die Wärmebildung **steigt** – das ist der Zweck (zitterfreie Thermogenese, z. B. beim Neugeborenen).
D	✗	Im Gegenteil: Fettsäureoxidation, Citratzyklus und Atmungskette laufen **schneller**, der O_2-Verbrauch steigt.
E	✗	Die ATP-Synthese **sinkt**, weil der Protonengradient abgebaut wird.

Lösungsschlüssel Teil 2

1 A · **2** D · **3** E · **4** D · **5** B · **6** B · **7** B · **8** C · **9** E · **10** D · **11** E · **12** E · **13** C · **14** B · **15** D · **16** C · **17** B · **18** A · **19** D · **20** D · **21** E · **22** B · **23** E · **24** C · **25** B · **26** E · **27** A

Erklärungen nach Standard-Biochemie (Duale Reihe, Löffler/Petrides). Abbildungen aus dem Original-Fragenblatt (Urheber: IMPP).