Ernährung und Verdauung

1 Ernährung

1.1 Energiehaushalt und Energieumsatz

1.1.1 Energiehaushalt

Energiebilanz. Die energiereichen Nahrungsbestandteile **Kohlenhydrate**, **Fette** und **Proteine** dienen dem Körper als Energiequelle. Er benötigt diese Energie für Auf- und Abbauprozesse, für zu verrichtende Arbeit oder für die Wärmeproduktion. Wenn der Körper mehr Energie aufnimmt als er benötigt, ist die Energiebilanz des Körpers **positiv** und die überschüssige Energie wird gespeichert (z. B. in Form von Fettdepots), nimmt er weniger auf, ist die Energiebilanz **negativ** und Reserven werden abgebaut.

Wirkungsgrad. Die chemische Energie der Nährstoffe wird in den zellulären Energiespeicher ATP umgewandelt, der dann die Energie für weitere chemische Reaktionen liefert oder z. B. in mechanische Energie für eine Muskelbewegung umgesetzt wird. Diese Energieumwandlungen können nicht zu 100 % erfolgen, sondern bei jeder einzelnen Umwandlung wird ein Teil der Energie als **Wärmeenergie** frei. Dieser Energiebetrag steht dem Körper nicht mehr zur Arbeit zur Verfügung. Den Quotienten aus geleisteter Arbeit und umgesetzter Energie bezeichnet man als **Wirkungsgrad**. Der Wirkungsgrad körperlicher Arbeit liegt **kaum höher als 25 %**, d. h., der Großteil der Energie geht als Wärme verloren. Die so im Körper entstehende Wärme bestimmt maßgeblich die Körpertemperatur. Um überschießende Reaktionen zu verhindern, müssen Energie- und Wärmehaushalt notwendigerweise aufeinander abgestimmt sein.

Lerntipp !

Zum Energiehaushalt werden zahlreiche Rechenaufgaben gestellt. Hierzu ist es wichtig, sich folgende Definitionen und Umrechnungen klar zu machen:

- Die Maßeinheit für die physikalischen Größen „Energie“ und „Arbeit“ ist das **Joule**.
- Die Gesamtenergie eines Systems bleibt **konstant**.
- Energie kann weder neu geschaffen noch vernichtet werden, sondern nur von einer **Energieform** in eine andere überführt werden.

Diese Energieformen werden entsprechend ihrer Natur in verschiedenen Einheiten ausgedrückt. Für die Umrechnungen gilt:

1 Joule (1 J) = 1 Newtonmeter (1 Nm) = 1 Wattsekunde (1 Ws).

Abgeleitet davon ist die **Leistung** (Arbeit/Zeit), die in Watt angegeben wird:

1 W (Watt) = 1 J/s = 1 Nm/s

Eine noch häufig verwendete Einheit der Energie ist die **Kalorie**:

1 cal = 4,2 J oder 1 J = 0,24 cal

1.1.2 Energieumsatz

Die Menge an Energie, die ein Mensch innerhalb eines Zeitraums umwandelt, wird als **Energieumsatz** bezeichnet. Der Energieumsatz des Körpers ist neben anderen Faktoren (S. 8) von der körperlichen Tätigkeit abhängig. Entsprechend werden verschiedene Belastungsstufen unterschieden, deren Definitionen nicht immer einheitlich sind.

Ruheumsatz und Grundumsatz. Unter **Ruheumsatz** versteht man den Energieumsatz eines Menschen, der nicht körperlich arbeitet. Da hierbei andere einflussnehmende Faktoren nicht berücksichtigt sind, wurde der **Grundumsatz** eingeführt, der unter definierten Standardbedingungen gemessen wird:

- nüchtern (12–14 Stunden nach der letzten Mahlzeit)
- morgens
- bei völliger körperlicher und geistiger Ruhe (liegend und entspannt)
- bei Indifferenztemperatur (27–31 °C, unbekleidet)
- bei normaler Körpertemperatur.

Der Grundumsatz bezeichnet den Energieumsatz eines gesunden Erwachsenen, der zur Aufrechterhaltung der Organfunktionen notwendig ist. Er umfasst die benötigte Energie für Strukturerhaltung und Temperaturregulation sowie für ständig ablaufende physiologische Vorgänge der verschiedenen Organe wie Herz, Lunge oder Niere, deren Anteil am Grundumsatz unterschiedlich ist.

aus: Endspurt Vorklinik – Biochemie, Physiologie (ISBN 9783132458963) © 2025. Thieme. All rights reserved.

Tab. 1.1 Prozentualer Anteil der Organe am Grundumsatz

Organ	Anteil beim Mann (%)	Anteil bei der Frau (%)
Leber	20	20
Muskulatur	26	20
Gehirn	22	26
Herz	10	10
Nieren	10	10
übrige Organe	12	14

Grundbedarf. Der Grundbedarf an Energie für einen 70 kg schweren Mann beträgt ca. 6900 kJ/d = 6,9 MJ/d. In den alten Einheiten entspricht dies 1650 kcal/d. Für eine Frau beträgt der Grundumsatz ca. 6200 kJ/d = 6,2 MJ/d (1500 kcal/d). Der tatsächliche Energiebedarf des Körpers liegt in Abhängigkeit von der körperlichen Aktivität höher.

Freizeit- und Arbeitsumsatz. Ein nicht körperlich arbeitender Mensch, der auch außerhalb der Arbeit keine Anstrengungen (z. B. Sport) unternimmt, setzt pro Tag etwa 9600 kJ (Männer) bzw. 8400 kJ (Frauen) um. Die Werte liegen somit etwa 30 % über dem Grundumsatz. Ausgehend von diesem Freizeitumsatz erhöht sich der Energiebedarf durch körperliche Aktivität.

Der zusätzliche Energieumsatz bei leichter körperlicher Arbeit beträgt 2000 kJ/d, bei Schwerstarbeit müssen bis zu 10 000 kJ/d zusätzlich zugeführt werden, das entspricht etwa einer Verdoppelung des Grundumsatzes. Auch bei **geistiger Arbeit** erhöht sich der **Energieumsatz**. Diese Steigerung erklärt sich jedoch nicht durch einen erhöhten Energiebedarf des Gehirns, sondern durch eine reflektorische **Anspannung der Skelettmuskulatur** („angestrengtes Nachdenken").

Faktoren, die den Energieumsatz beeinflussen

Allgemeine Faktoren. Neben der Art der körperlichen Aktivität ist der Energieumsatz noch von zahlreichen anderen Faktoren abhängig, z. B. von der Außentemperatur, von der Aktivität einzelner Organsysteme und von der hormonellen Situation, v. a. von der Aktivität der Schilddrüsenhormone (S. 47).

Körpermasse und ihre Zusammensetzung. Die **Körperoberfläche** eines Menschen wird durch Körpergröße und Körpergewicht bestimmt. Über die Körperoberfläche wird der größte Teil der Wärme abgegeben. Die **Wärmeproduktion** findet im Körperinneren statt, sie hängt vom Volumen ab. Entscheidend ist daher das Verhältnis von Körperoberfläche zu Körpervolumen. Bei gleichem Gewicht muss also der Grundumsatz bei einem größeren Menschen mit großer Körperoberfläche und größerem Wärmeverlust höher sein. Bei gleicher Größe und unterschiedlichem Gewicht hat der Schwerere eine größere Wärmeproduktion und damit einen höheren Grundumsatz.

Der Grundumsatz hängt aber nicht nur von der Körpermasse ab, sondern auch von ihrer Zusammensetzung. Je mehr stoffwechselaktive Zellmasse (Skelettmuskulatur, Skelett und innere Organe) eine Person hat, desto höher ist ihr Energieumsatz.

Alter und Geschlecht. Im Alter sinkt der Grundumsatz, da sich die Zusammensetzung des Körpers ändert und z. B. Muskelmasse, d. h. ein Teil der fettfreien stoffwechselaktiven Masse, abnimmt. Frauen haben aufgrund des relativ höheren Anteils an metabolisch weniger aktivem Fettgewebe einen um ca. 10 % niedrigeren Grundumsatz.

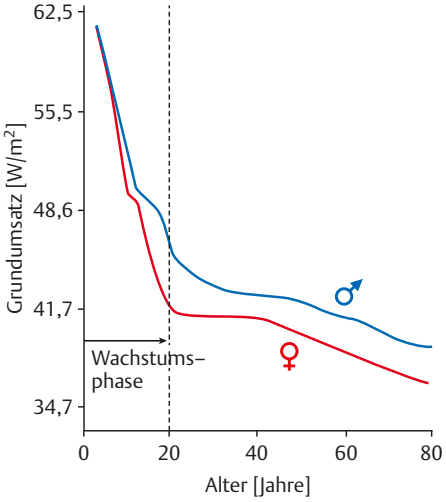

Abb. 1.1 Abhängigkeit des relativen Grundumsatzes von Lebensalter und Geschlecht. [Quelle: Gekle et al. Taschenlehrbuch Physiologie, Thieme, 2015]

Grundumsatz beim Neugeborenen und Säugling. Für ein Neugeborenes bzw. einen Säugling ist die Abhängigkeit des Grundumsatzes von der Körperoberfläche problematisch. Seine Körperoberfläche ist im Verhältnis zum Körpervolumen größer als beim Erwachsenen. Der Gesamtumsatz ist natürlich deutlich kleiner als beim Erwachsenen, aber bei einer Umrechnung des Grundumsatzes relativ zur Körperoberfläche (**relativer Grundumsatz**, angegeben in W/m²) ergeben sich recht hohe Zahlenwerte. Zudem ist der Körperkern durch die dünnere Schale schlechter isoliert. Eine Unterkühlung kann deshalb schon bei für Erwachsene völlig unbedenklichen Temperaturen auftreten. Folglich setzt die aktive Wärmebildung des Neugeborenen schon bei höheren Temperaturen ein.

Umgebungstemperatur. Bei Indifferenztemperatur oder thermoneutraler Umgebung ist der temperaturbedingte Energieumsatz am geringsten. Er steigt bei höherer Umgebungstemperatur durch die Zunahme der Reaktionsgeschwindigkeiten bzw. stärkere Hautdurchblutung und Schweißdrüsentätigkeit, bei niedrigeren Temperaturen z. B. durch aktive Wärmeproduktion.

Verdauung, Resorption und Speicherung von Nahrung. Bei der Verdauung, Resorption und Speicherung von Nahrung finden energieverbrauchende Prozesse statt, zusätzlich kommt es zu einer durch den Parasympathikus induzierten Erhöhung der Stoffwechselaktivität, d. h., die Nahrungszufuhr selbst führt zu einer Zunahme des Energieumsatzes und ein Teil der aufgenommenen Energie geht als Wärme verloren. Diese postprandiale Steigerung des Energieumsatzes bezeichnet man als **spezifisch-dynamische Wirkung**.

IMPP-Fakten

! Der **Wirkungsgrad** bei körperlicher Arbeit berechnet sich aus dem Quotienten der geleisteten Arbeit und der verbrauchten Energie.
! Der **Anteil des Energieumsatzes des Gehirns** am Grundumsatz des Körpers beträgt beim Erwachsenen 22–26 %.
! Der **Anteil des Energieumsatzes des Herzmuskels** am Grundumsatz des Körpers beträgt beim Erwachsenen 8–12 %.
! **Geistige Arbeit** erhöht den Energieumsatz, Ursache ist eine reflektorische Anspannung der Muskulatur.
! Mit steigendem Alter sinkt der **Grundumsatz**.
! Bei **Neugeborenen und Säuglingen** ist der relative Grundumsatz (Grundumsatz bezogen auf die Körperoberfläche) am höchsten.

aus: Endspurt Vorklinik – Biochemie, Physiologie (ISBN 9783132458963) © 2025. Thieme. All rights reserved.

1.2 Zusammensetzung und Energiegehalt der Nahrung

1.2.1 Zusammensetzung der Nahrung

Unsere Nahrung enthält folgende Nährstoffe:

- **Hauptnährstoffe** (in Klammern der Anteil bei einer ausgewogenen Ernährung):
  - Kohlenhydrate (60 %): dienen hauptsächlich der Energiegewinnung
  - Lipide (25 %): dienen der Energiegewinnung und werden als Membranbestandteile in Membranen eingebaut
  - Proteine (15 %): werden überwiegend zum Aufbau körpereigener Proteine verwendet
- **Vitamine, Spurenelemente**: werden nur in sehr geringen Mengen benötigt, sind aber ein essenzieller Bestandteil der Nahrung
- **Ballaststoffe**: unverdauliche Bestandteile pflanzlicher Nahrung, die wichtig für die Verdauung sind und die Motilität des Dickdarms stimulieren.

Essenzielle Nahrungsbestandteile. Essenzielle Nahrungsbestandteile sind Nahrungsbestandteile, die der Körper nicht selbst synthetisieren kann, sondern mit der Nahrung aufnehmen muss. Dazu zählen:

- **8 Aminosäuren:** Phenylalanin, Isoleucin, Tryptophan, Methionin, Leucin, Valin, Lysin, Threonin
- **Fettsäuren:** z. B. die mehrfach ungesättigte Linolsäure (ω6-Fettsäure) und die Linolensäure (ω3-Fettsäure)
- **Vitamine, Elektrolyte, Spurenelemente**.

Bedeutung der Proteine. Je näher die Aminosäurezusammensetzung eines Proteins der Aminosäurezusammensetzung des menschlichen Körpers kommt, desto höher ist seine **biologische Wertigkeit**. Diese hängt außerdem vom Gehalt an essenziellen Aminosäuren ab. Tierisches Protein ist biologisch höherwertiger als pflanzliches.

1.2.2 Energiegehalt der Nahrung

Brennwert

Die Energie für die Erhaltung der zahlreichen Funktionen unseres Körpers ist in den 3 Hauptnährstoffen (Kohlenhydrate, Fette und Proteine) gespeichert. Bei der biologischen Oxidation über die Atmungskette wird diese Energie zu einem Teil in Form von ATP gespeichert, der Rest wird als Wärme frei. Die Menge an Energie, die bei dieser Oxidation umgesetzt wird, bezeichnet man als **Brennwert**. Die Maßeinheit für diese Energie ist die SI-Einheit Kilojoule (kJ). Fette, Proteine und Kohlenhydrate unterscheiden sich in ihren Brennwerten. Der Wirkungsgrad bei der biologischen Oxidation liegt bei etwa 40–50 %, wenn man den Brennwert von 1 Mol Glucose (ca 2880 kJ) mit dem Energiegehalt der daraus generierten 32 Mol ATP (ca 30–50 kJ/Mol) vergleicht.

Lerntipp !

Da die veraltete Bezeichnung „Kilokalorie“ (kcal) noch immer häufig benutzt wird und sich zuweilen auch bequemer mit ihr rechnen lässt, wird sie hier zusätzlich aufgeführt: 1 kcal = 4,2 kJ; 1 kJ = 0,24 kcal.

Physikalischer Brennwert. Der physikalische Brennwert eines Nährstoffs ist die Energiemenge, die frei wird, wenn man den Nährstoff vollständig zu CO_2 und H_2O verbrennt. Für die Bestimmung des physikalischen Brennwerts nutzt man ein Kalorimeter.

Physiologischer Brennwert. Auch Kohlenhydrate, Lipide und auch Ethanol werden im menschlichen Körper vollständig zu CO_2 und H_2O oxidiert. Proteine werden jedoch vom Menschen nicht vollständig abgebaut. Ausscheidungsprodukt ist Harnstoff, dessen Energie der Körper nicht mehr nutzen kann. Deshalb ergibt sich bei der biologischen Oxidation ein niedrigerer Brennwert als bei der Verbrennung im Kalorimeter. Man spricht dann vom **physiologischen Brennwert**. Der physiologische Brennwert von Proteinen ist demnach geringer als der physikalische. Ist die Zusammensetzung der Nahrung bekannt, kann mithilfe des physiologischen Brennwerts die zugeführte Energie berechnet werden.

Lerntipp !

Merke dir unbedingt die Brennwerte für die in der Tabelle aufgeführten Nahrungsstoffe!

Tab. 1.2 Brennwerte der Hauptnahrungsbestandteile. Der physiologische Brennwert von Ethanol liegt mit 29,7 kJ/g nur wenig niedriger als der von Fetten.

Nährstoff	physikalischer Brennwert (kJ/g)	physiologischer Brennwert (kJ/g; in Klammern kcal/g)
Kohlenhydrate	17,2	17,2 (4)
Protein	23	17,2 (4)
Fette	38,9	38,9 (9,3)
Ethanol	29,7	29,7 (7,1)

Indirekte Kalorimetrie

Der physiologische Energieumsatz einer Testperson kann direkt über deren Wärmeabgabe in einem Kalorimeter gemessen werden (**direkte Kalorimetrie**). Hierfür ist allerdings ein relativ hoher Aufwand nötig. Einfacher ist die Methode der **indirekten Kalorimetrie**, bei der man den Umstand nutzt, dass bei der Verbrennung der Nährstoffe im Stoffwechsel O_2 verbraucht und CO_2 abgegeben wird.

Sind die Mengen der aufgenommenen und abgegebenen Atemgase für ein bestimmtes Zeitintervall bekannt, können über das kalorische Äquivalent der Energieumsatz pro Tag und über den respiratorischen Quotienten (S. 10) der vorherrschend verstoffwechselte Nährstoff bestimmt werden.

Kalorisches Äquivalent. Das kalorische Äquivalent ist die Energiemenge, die im Körper bei der Aufnahme von 1 l Sauerstoff für die Verbrennung der Hauptnährstoffe freigesetzt wird. Für Glucose kann es z. B. folgendermaßen berechnet werden:

Die Reaktionsgleichung für die vollständige Verbrennung von 1 Mol Glucose (180 g) lautet:

$$C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2 \rightarrow 6\ CO_2 + 6\ H_2O + 2868\ kJ$$

Es werden 2868 kJ frei.

Das Molvolumen eines Gases beträgt 22,4 l. Nach der Gleichung oben werden für die vollständige Verbrennung der Glucose 6 mol Sauerstoff benötigt. Also:

$$6 \cdot 22{,}4\ l = 134{,}4\ l\ O_2$$

aus: Endspurt Vorklinik – Biochemie, Physiologie (ISBN 9783132458963) © 2025. Thieme. All rights reserved.

Das kalorische Äquivalent für Glucose ist das Verhältnis aus freiwerdender Energie und verbrauchtem Sauerstoff:

$$\text{kalorisches Äquivalent}_{\text{Gluc}} = \frac{2868\ \text{kJ}}{134{,}4\ \text{l}\ O_2} = 21{,}4\ \text{kJ/l}\ O_2$$

Aufgrund ihrer unterschiedlichen Brennwerte wird bei der vollständigen Oxidation der verschiedenen Nährstoffe pro Liter verbrauchtem Sauerstoff unterschiedlich viel Energie frei. Da nicht bekannt ist, welche Nährstoffe in welchen Anteilen zu einem bestimmten Zeitpunkt im Körper verbrannt werden, wird bei Mischkost mit einem Mittelwert von ca. 20 kJ/l O_2 gerechnet. Oder anders ausgedrückt: Beim Verbrauch von 1 l Sauerstoff wird bei Mischkost eine Energiemenge von 20 kJ freigesetzt.

Mithilfe des **kalorischen Äquivalents** und des **Sauerstoffverbrauchs** lässt sich der **Energieumsatz** bestimmen. Er berechnet sich als Produkt aus O_2-Aufnahme pro Zeit multipliziert mit dem kalorischen Äquivalent. Bei einer normalen O_2-Aufnahme von 300 ml/min ergäbe sich bei normaler Mischkost ein Energieumsatz von

$$0{,}3\ \text{l}\ O_2/\text{min} \cdot 20\ \text{kJ/l}\ O_2 = 6\ \text{kJ/min} = 6000\ \text{J} / 60\ \text{s} = 100\ \text{W}$$

Das entspricht 8640 kJ/d.

Tab. 1.3 Kalorisches Äquivalent der Hauptnahrungsbestandteile

Nährstoff	kalorisches Äquivalent von O_2 (kJ/l O_2)
Kohlenhydrate	21,0
Protein	18,7
Fette	19,6
Mischkost	20,2

Respiratorischer Quotient. Der respiratorische Quotient ist das Verhältnis von abgeatmeter CO_2-Menge zu aufgenommener O_2-Menge.

$$\text{RQ} = \frac{CO_2\text{-Abgabe}}{O_2\text{-Aufnahme}}$$

Damit kann man den zu einem bestimmten Zeitpunkt vorherrschend verstoffwechselten Nährstoff ermitteln:

Bei der Verbrennung von Kohlenhydraten wird für jedes verbrauchte Mol O_2 ein Mol CO_2 erzeugt (Reaktionsgleichung für die Verbrennung von Glucose (S. 9)). Der RQ beträgt 1. Für die Verbrennung der stärker reduzierten Moleküle wie Fette und Proteine wird mehr Sauerstoff verbraucht als Kohlendioxid abgegeben, der RQ liegt unter 1 und zwar bei 0,81 für Proteine und 0,70 für Fette.

Für die Oxidation von z. B. Palmitinsäure ergibt sich:

$$C_{15}H_{31}COOH + 23\ O_2 \rightarrow 16\ CO_2 + 16\ H_2O$$

und damit folgender RQ:

$$RQ_{\text{Palm}} = 16/23 = 0{,}7$$

Für den respiratorischen Quotienten wird ein Mittelwert für Mischkost von 0,82 angegeben.

Tab. 1.4 Respiratorischer Quotient der Hauptnahrungsbestandteile

Nährstoff	respiratorischer Quotient (RQ)
Kohlenhydrate	1,0
Protein	0,81
Fette	0,70
Mischkost	0,82–0,85

IMPP-Fakten

! Die **biologische Wertigkeit von Proteinen** hängt von ihrem Gehalt an essenziellen Aminosäuren ab.
!!!! Der physiologische Brennwert von **Kohlenhydraten** ist 17 kJ/g (4 kcal/g).
!!!! Der physiologische Brennwert von **Lipiden** (z. B. Triacylglycerin) ist 39 kJ/g (9 kcal/g).
!!!! Der physiologische Brennwert von **Protein** ist 17 kJ/g (4 kcal/g).
!!!! Der physiologische Brennwert von **Ethanol** ist 30 kJ/g (7 kcal/g).
!!!! Der **Energieumsatz** kann aus der O_2-Aufnahme pro Zeit multipliziert mit dem kalorischen Äquivalent berechnet werden.
!! Das **kalorische Äquivalent für Sauerstoff** bei normaler Mischkost beträgt 20 kJ/l O_2.

1.3 Rechenbeispiele

1.3.1 Allgemeines

Für die meisten Rechnungen, die das IMPP zum Energieumsatz verlangt, musst du nur die verschiedenen physiologischen Brennwerte der Hauptnährstoffe (siehe **Tab. 1.2**) und von Ethanol kennen. Die Aufgaben kannst du dann in der Regel mit einem einfachen Dreisatz lösen.

Gelegentlich gibt es aber auch Aufgaben, bei denen du wissen musst, was das kalorische Äquivalent (siehe **Tab. 1.3**) ist und wie man damit den Energieumsatz einer Person berechnen kann.

1.3.2 Physiologischer Brennwert

Rechenbeispiel 1

Ein Mann trinkt 0,5 l eines alkoholfreien Biers. 100 ml dieses Getränks enthalten ca. 0,4 g Protein und 5,3 g Maltose. Was den physiologischen Brennwert angeht, sind die übrigen Inhaltsstoffe nicht von Belang. Der tägliche Energiebedarf des Mannes liegt bei 10 MJ. Wie hoch ist der Anteil am täglichen Energiebedarf, der durch das Bier gedeckt wird?

Lösungsweg: Der physiologische Brennwert von Proteinen und Kohlenhydraten liegt bei jeweils 17 kJ/g (siehe **Tab. 1.2**). Die Angabe der Inhaltsstoffe bezieht sich auf 100 ml, der Mann trinkt aber 500 ml. Er nimmt also über das Bier 2 g Protein und 26,5 g Maltose zu sich und damit:

$$2 \cdot 17 + 26{,}5 \cdot 17 = 484{,}5\ \text{kJ}$$

Der tägliche Energiebedarf des Mannes liegt bei 10 000 kJ (= 10 MJ), er deckt durch das Getränk also 4,85 % ab.

Lösung: 4,85 %.

Rechenbeispiel 2

Welche Menge Protein ist äquikalorisch zu 50 g Ethanol?

Lösungsweg: Zunächst wird der Brennwert der angegebenen Ethanolmenge ausgerechnet und dann die entsprechende Menge an Protein ermittelt.

50 g Ethanol haben einen Brennwert von ca. 50 g · 30 kJ = 1500 kJ.

1 g Protein hat einen Brennwert von ca. 17 kJ.

Um 1500 kJ zu sich zu nehmen, muss man 1500 kJ/(17 kJ/g) = 88,2 g ≈ 90 g Protein verzehren.

Lösung: ca. 90 g

aus: Endspurt Vorklinik – Biochemie, Physiologie (ISBN 9783132458963) © 2025. Thieme. All rights reserved.

Rechenbeispiel 3

Ein Student geht jeden Tag 30 min laufen und benötigt dafür 1680 kJ (400 kcal). Wie viele Tage muss er laufen gehen, um 5 kg Fettgewebe abzutrainieren, wenn die Energie zum Laufen ausschließlich durch Abbau des Fettgewebes gewonnen würde? Fettgewebe besteht zu rund 70 % aus Triglyceriden (Triacylglycerinen). Der Rest sei vereinfacht Wasser, das beim Abbau des Fettgewebes ausgeschieden wird.

Lösungsweg: Der physiologische Brennwert von Fett liegt bei 38, 9 kJ/g. Damit reduzieren sich die Fettdepots des Studenten jeden Tag um

$$\frac{1680\ \text{kJ}}{38{,}9\ \text{kJ/g}} \approx 43{,}2\ \text{g}$$

Um 5 kg Fettgewebe abzutrainieren, muss er also 5000 g · 0,7 = 3500 g Fett verbrennen. Wenn er jeden Tag 43,2 g Fett verliert, muss er 3500 g / 43,2 g ≈ 81 Tage (knapp 3 Monate) lang jeden Tag ein halbe Stunde Joggen gehen.

Lösung: 81 Tage

Rechenbeispiel 4

Wenn ein Patient täglich 150 g Eiweiß zu sich nimmt, etwa wie viel Gramm Kohlenhydrate sollte er zusätzlich verzehren, um seinen Energiebedarf von etwa 7150 kJ (1700 kcal) pro Tag zu decken?

Lösungsweg: 1 g Protein und 1 g Kohlenhydrate haben beide denselben Brennwert von ca. 17 kJ; 150 g Protein haben daher einen Brennwert von ca. 150 g · 17 kJ = 2550 kJ.

Um insgesamt 7150 kJ zuzuführen, muss der Patient daher noch (7 150 – 2550) kJ = 4600 kJ zu sich nehmen. Soll dies durch die Aufnahme von Kohlenhydraten geschehen, muss er etwa eine Menge von 4600 kJ/(17 kJ/g) = 270 g verzehren.

Lösung: 270 g

Rechenbeispiel 5

Welche Proteinmenge hat den gleichen Brennwert wie 60 g Kohlenhydrate?

Lösungsweg: Da Kohlenhydrate mit ca. 17 kJ/g den gleichen Brennwert haben wie Protein, kann man die Kohlenhydrate einfach durch die gleiche Menge an Protein ersetzen.

Lösung: 60 g

Rechenbeispiel 6

Wie viel Energie enthält ca. 1 l einer 5 %igen Glucoselösung?

Lösungsweg: In 1 l (= 1 kg) 5 %iger Glucoselösung sind 0,05 · 1000 g = 50 g Glucose enthalten. Es ist also der Brennwert von 50 g Glucose zu berechnen.

50 g Glucose haben einen Brennwert von ca. 50 g · 17 kJ = 850 kJ

Lösung: 850 kJ

1.3.3 Indirekte Kalorimetrie

Bei einer Versuchsperson mit einem Atemzeitvolumen von 15 l/min beträgt der Volumenanteil des O_2 exspiratorisch 0,17 l/l, inspiratorisch 0,21 l/l. Errechne den Energieumsatz!

Lösungsweg: Die Differenz zwischen dem inspiratorischen und dem exspiratorischen Sauerstoffvolumenanteil – und damit die Sauerstoffaufnahme – liegt bei 0,04 l/l. Pro Minute werden daher 15 · 0,04 = 0,6 l O_2 aufgenommen. Das kalorische Äquivalent für normale Mischkost wird mit 20 kJ/l O_2 angenommen, d. h.

0,6 l/min · 20 kJ/l = 12 kJ/min (= 12 000 J/min = 200 J/s)

Ein Watt entspricht 1 J/s, der Energieumsatz beträgt daher 200 W.

Lösung: 200 W

LERNTAG 33

2 Sekretion im Magen-Darm-Trakt

2.1 Sekretion im Magen-Darm-Trakt

Die Sekretion im Magen-Darm-Trakt hat 2 verschiedene Aspekte:

- **Sekretion der Verdauungssäfte**: Gebildet werden
  - Speichel und darin enthaltene Enzyme,
  - Magensaft mit Enzymen und HCl,
  - Pankreassaft mit den Enzymen zur Proteinverdauung und
  - Galle zur Fettverdauung.
- **Sekretion von Hormonen und Neurotransmitter zur Steuerung der Verdauung**: Wichtige Rollen spielen
  - die Hormone Gastrin, Sekretin, Histamin und Cholecystokinin (CCK) und
  - die Neurotransmitter: Acetylcholin und Noradrenalin.

Welche Wirkung die Hormone und Neurotransmitter haben, hängt davon ab, in welcher Phase der Verdauung und in welchem Abschnitt des Magen-Darm-Trakts sie ausgeschüttet werden.

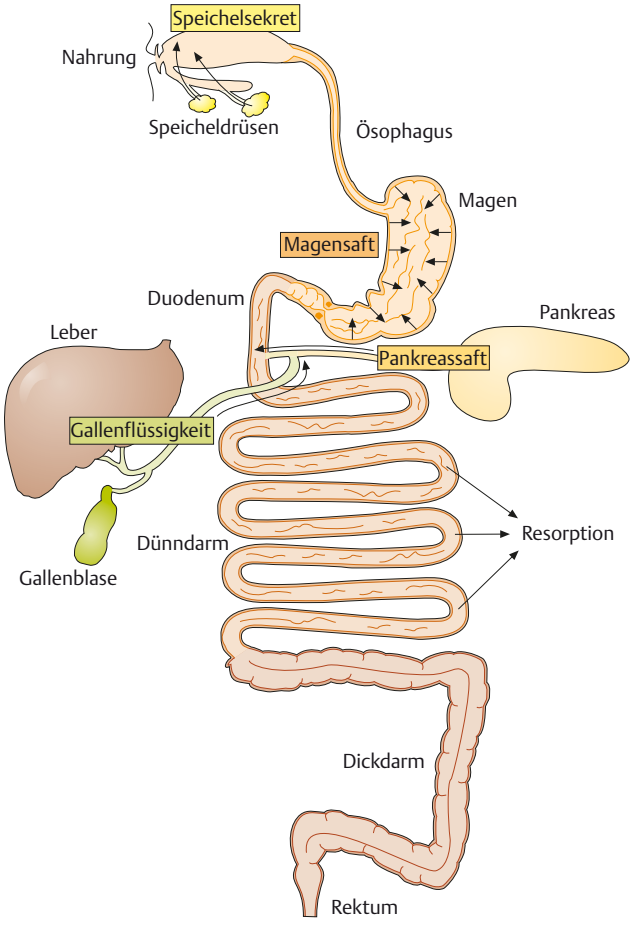

Abb. 2.1 Entstehungsorte der Verdauungssekrete.

aus: Endspurt Vorklinik – Biochemie, Physiologie (ISBN 9783132458963) © 2025. Thieme. All rights reserved.

2.1.1 Überblick

Die meisten Nahrungsbestandteile müssen mechanisch und enzymatisch in kleinere Moleküle zerlegt werden, bevor der Körper sie aufnehmen kann. Die Nahrungsstoffe durchwandern den Verdauungstrakt, wo sie schrittweise mit verschiedenen Sekreten vermischt werden, die die Verdauungsenzyme enthalten.

Die Sekrete werden in verschiedenen Verdauungsdrüsen gebildet.

Tab. 2.1 Inhaltsstoffe und Menge der Verdauungssekrete (nach Behrends et al., Duale Reihe Physiologie, Thieme, 2012)

Sekret	wichtige Inhaltsstoffe	Sekretmenge pro Tag (l)*
Speichel	▪ Elektrolyte: Na^+, Cl^-, K^+, Bicarbonat (HCO_3^- = Hydrogencarbonat) ▪ Enzyme: z. B. α-Amylase (= Ptyalin), Lipase, Lysozym ▪ Immunglobuline (v. a. IgA)	0,5–1,5
Magensaft	▪ Salzsäure (HCl) ▪ HCO_3^- ▪ Intrinsic Factor ▪ Pepsin (Proteasen) bzw. das Vorläufermolekül Pepsinogen ▪ Mucine	2
Pankreassekret	▪ $NaHCO_3$ ▪ Proteasen ▪ Peptidasen ▪ α-Amylase ▪ Lipasen ▪ Cholesterinesterase ▪ RNasen und DNasen	1,5–2
Galle	▪ NaCl ▪ Gallensäuren ▪ Cholesterin ▪ Lecithin ▪ Gallenfarbstoffe (v. a. Bilirubin; Abbauprodukte von Hämgruppen)	0,5–1

* Die genauen Mengen der verschiedenen Sekrete werden von der Ernährung bestimmt und können erheblich schwanken.

2.2 Mundspeicheldrüsen

2.2.1 Funktionelle Anatomie

Die Mundspeicheldrüsen sind in Läppchen organisierte, zusammengesetzte Drüsen mit Endstücken (Azini) und einem Ausführungsgangsystem. Sie bilden den Mundspeichel. In den Azini wird das primäre Sekret gebildet und in die Schaltstücke der Ausführungsgänge sezerniert. Den Schaltstücken liegen Myoepithelzellen an, die das Sekret nach außen „pressen".

2.2.2 Zusammensetzung und Funktion des Mundspeichels

Der Mundspeichel besteht aus Wasser (99 %), verschiedenen Proteinen und Elektrolyten. Er dient vor allem zum „Einspeicheln" der Nahrung, um die Passage der Nahrung durch die Speiseröhre zu erleichtern. Außerdem hält er die Mundhöhle feucht.

Die sezernierten Proteine lassen sich in verschiedene Gruppen einteilen:

- **prolinreiche Proteine** (ca. 30 % der Aminosäuren sind Prolin): Sie können auch glykosyliert sein und haben hauptsächlich eine Schutzfunktion.
- **Mucine**: Mucine sind Glykoproteine, die sehr viele O- und N-glykosidisch gebundene Kohlenhydratketten enthalten. Diese Kohlenhydratketten sind am häufigsten über die Seitenketten der Aminosäuren Serin und Threonin verknüpft. Sie dienen als Gleitmittel und schützen die Mundschleimhaut vor Proteasen und Krankheitserregern.
- **Speichelenzyme**:
  - **α-Amylase** (Ptyalin), spaltet α-1,4-glykosidische Bindungen und baut damit die Polysaccharide Stärke und Glykogen zu kleineren Bruchstücken wie Oligosacchariden (Maltotriose) und Disacchariden (Maltose und Isomaltose) ab. Die Verdauung der Kohlenhydrate beginnt also bereits im Mund.
  - **saure Lipase**: Sie spaltet Triacylglycerine, allerdings erst im sauren Milieu des Magens.
  - **Ribonuclease**: Sie verdaut RNA.
- weitere **antimikrobielle Proteine**:
  - Immunglobulin A (IgA)
  - **Lysozym**
- **Wachstumsfaktoren** dienen der Wundheilung.

2.2.3 Speichelbildung

Täglich werden von verschiedenen Drüsen (Glandula submandibularis, parotis, sublingualis) 0,5–1,5 l Speichel gebildet. Die Speichelbildung vollzieht sich in 2 Schritten. Zuerst wird der Primärspeichel gebildet. Aus diesem entsteht dann der Sekundärspeichel, der in die Mundhöhle abgegeben wird.

Primärspeichel

Zunächst wird in den Drüsenkanälchen (Azini) der Primärspeichel gebildet, der in seiner Elektrolytzusammensetzung weitgehend der des Blutes entspricht.

Über einen **Na^+-K^+-$2Cl^-$-Symporter** in der basolateralen Membran werden Cl^--Ionen in die Azinuszelle aufgenommen. Das Cl^- wird dann über einen **Cl^--Kanal** in der apikalen Membran ins Lumen sezerniert. Die **Na^+/K^+-ATPase** in der basolateralen Membran produziert die treibende Kraft für den Symport, der durch Na^+-Einstrom angetrieben wird (sekundär aktiver Transport). Na^+ und H_2O folgen passiv auf parazellulärem Weg nach, H_2O auch transzellulär. Auf diese Weise erfolgt auch die Sekretion des Pankreassaftes.

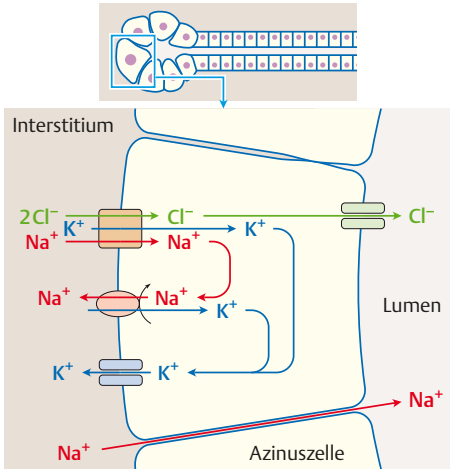

Abb. 2.2 Bildung des Primärspeichels in den Drüsenazini. [Quelle: Gekle et al., Taschenlehrbuch Physiologie, Thieme, 2015]

aus: Endspurt Vorklinik – Biochemie, Physiologie (ISBN 9783132458963) © 2025. Thieme. All rights reserved.

Sekundärspeichel

Während der Primärspeichel die Ausführungsgänge passiert, wird er weiter modifiziert: Na^+ und Cl^- werden aus dem Lumen resorbiert und K^+ und HCO_3^- sezerniert. Es entsteht ein hypotoner Sekundärspeichel. An den Austauschvorgängen in den Epithelien der Ausführungsgänge sind apikal **Na^+-Kanäle** und ein **Na^+/H^+-Austauscher** und basolateral eine **Na^+/K^+-ATPase** beteiligt. Die Cl^--Resorption findet apikal über **Cl^-/HCO_3^--Austauscher** und andere **Cl^--Kanäle** und basolateral ebenfalls über Cl^--Kanäle statt. Der Cl^-/HCO_3^--Austauscher ist auch für die HCO_3^--Sekretion verantwortlich.

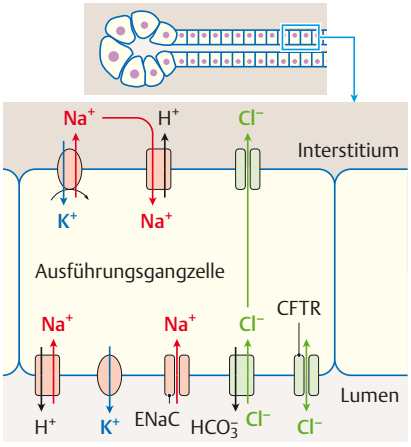

Abb. 2.3 Bildung des Sekundärspeichels in den Ausführungsgängen. [Quelle: Gekle et al., Taschenlehrbuch Physiologie, Thieme, 2015]

Die Zusammensetzung des endgültigen Speichels ist von der **Sekretionsrate** abhängig. Bei der basalen, nicht stimulierten Speichelbildung überwiegt die Na^+- und Cl^--Rückresorption bei gleichzeitig geringer Wasserpermeabilität der Ausführungsgänge, sodass am Ende die HCO_3^--Konzentration größer als die Cl^--Konzentration ist und der Speichel deutlich **hypoton** (bis 50 mosmol/l) wird. Je höher die Sekretionsrate, desto schneller fließt der Speichel durch die Ausführungsgänge, sodass nur wenige Austauschvorgänge stattfinden können. Daher findet man bei zunehmendem Speichelfluss entsprechend höhere Na^+- und Cl^--Konzentrationen und die Elektrolytzusammensetzung des Speichels nähert sich der des Blutplasmas.

2.2.4 Steuerung der Speichelsekretion

Die Speichelproduktion erfolgt **reflektorisch**. Psychische Einflüsse (Erwartung und Appetit), Reizung von Geruchs- und Geschmacksrezeptoren (v. a. bei Säure wird dünnflüssiger Spülspeichel zur Neutralisation freigesetzt) und mechanische Reize (z. B. Kauen) fördern die Speichelbildung.

Durch differenzierte Innervation der Speicheldrüsen über vegetative Fasern wird die Zusammensetzung des Mundspeichels dem Bedarf angepasst:

- Durch Aktivierung des Parasympathikus wird über **Acetylcholin** die Durchblutung der Speicheldrüsen angeregt, sodass viel wässriger Speichel freigesetzt wird. Eine Blockade der Acetylcholin-Rezeptoren hemmt demnach die Speichelsekretion.
- Der Transmitter des Sympathikus, **Noradrenalin,** beeinflusst den Speichelfluss dahingehend, dass weniger, aber mucinreicher, hochviskoser Speichel produziert wird.

Sowohl Parasympathikus als auch Sympathikus können die **myoepithelialen Zellen** zur Kontraktion anregen und damit den Speichelfluss erleichtern. Einige Nervenfasern geben Substanz P und VIP ab, die ebenfalls die Speichelsekretion stimulieren.

IMPP-Fakten

! **Mucine** sind Glykoproteine.
! Die Kohlenhydratketten der **Mucine** sind am häufigsten über die **Seitenketten** der Aminosäuren Serin und Threonin verknüpft.
! Substrate der **α-Amylase** sind Stärke und Glykogen.
! Produkte der **α-Amylase-Reaktion** sind Maltose und Isomaltose.
!! An der **Sekretion des Primärspeichels** sind Cl^--Kanäle in der apikalen Membran der Azinuszellen beteiligt.
! In der basolateralen Membran werden Cl^--Ionen über einen **Na^+-K^+-$2Cl^-$-Symporter** in die Azinuszelle aufgenommen.
! In den Ausführungsgängen entsteht u. a. durch **Na^+- und Cl^--Resorption** der Sekundärspeichel.
! Bei der Bildung des Sekundärspeichels erfolgt die **Cl^--Resorption** über einen apikalen **Cl^-/HCO_3^--Austauscher** und andere basolaterale **Cl^--Kanäle**.
!! Je höher der Speichelfluss ist, desto höher ist die **Na^+-Konzentration im Speichel**.
! Die **Cl^--Konzentration des Speichels steigt** bei parasympathischer Aktivierung durch den angenehmen Geruch einer Speise.
!! Eine Blockade der Acetylcholinrezeptoren hemmt die **Speichelsekretion**.

2.3 Magen

2.3.1 Funktionelle Anatomie

Der Magen lässt sich funktionell in einen proximalen und einen distalen Teil unterteilen. Zum proximalen Teil zählen Kardia, Fundus und die ersten beiden Drittel des Korpus, zum distalen Teil das restliche Drittel und das Antrum.

In der Magenschleimhaut, deren Oberfläche durch die Magengrübchen (Foveolae) stark vergrößert wird, liegen die verschiedenen Zellen, die den Magensaft produzieren. Die eigentlichen Oberflächenzellen produzieren dabei Schleim sowie HCO_3^- und dienen dem Schutz der Magenschleimhaut. In den Drüsen liegen die **Haupt**- und **Nebenzellen**, **Belegzellen** und verschiedene **endokrine Zellen** (H-, D- und G-Zellen).

Tab. 2.2 Vorkommen und Funktion der Zellen der Magenschleimhaut

Zellen und Vorkommen	Sekretionsprodukt
Corpus	
Belegzellen	HCl, Intrinsic Factor
Hauptzellen	Pepsinogen, Lipase
Nebenzellen bzw. Schleimzellen	Mucin, Pepsinogen
ECL(enterochromaffine-like)-Zellen (auch H-Zellen genannt)	Histamin
D-Zellen	Somatostatin
Antrum	
Hauptzellen	Pepsinogen, Lipase
G-Zellen	Gastrin
D-Zellen	Somatostatin

aus: Endspurt Vorklinik – Biochemie, Physiologie (ISBN 9783132458963) © 2025. Thieme. All rights reserved.

2.3.2 Bildung der Magensäure

Pro Tag werden von den verschiedenen Drüsenzellen im Magen etwa 2–4 l Magensaft produziert. Neben Salzsäure (HCl) sind im Magensaft Pepsine, säurestabile Lipase, Intrinsic Factor und Mucine enthalten.

Bildungsort und Funktion

Die **Belegzellen** sind die Bildungsorte der Salzsäure. Bei maximaler Sekretion kann der pH-Wert im Magen auf 1 absinken. Durch den niedrigen pH-Wert werden Bakterien abgetötet und das optimale pH-Milieu für die Aktivität der Magenenzyme geschaffen. Das pH-Optimum von Pepsin liegt im stark sauren Bereich (pH 1,8–3,5).

Außerdem werden durch den sehr niedrigen pH-Wert Proteine denaturiert.

Säuresekretion in den Belegzellen

Wird die Belegzelle stimuliert, ändert sich innerhalb von Sekunden ihr Aussehen. Im Ruhezustand liegen entlang der Ausführungsgänge (Canaliculi) der Belegzelle zahlreiche Tubulovesikel im Zytoplasma. Sie verschmelzen nach Aktivierung mit der Membran der zum Lumen hin geöffneten Canaliculi, wodurch sich die Oberfläche der Canaliculi in zahlreiche Falten legt und um das 50–100-Fache vergrößert wird. In den Membranen der Tubulovesikel befinden sich die zur Salzsäureproduktion benötigte **H^+/K^+-ATPase** und Ionenkanäle, die durch das Verschmelzen in die Canaliculimembran integriert werden.

Die Vorgänge an der Belegzelle im Einzelnen:

1. Carboanhydrase-Reaktion. Im Lumen der Belegzelle entstehen aus den Substraten CO_2 und H_2O Hydrogencarbonat (HCO_3^-, auch als Bicarbonat bezeichnet) und Protonen (H^+):

$$CO_2 + H_2O \rightleftharpoons HCO_3^- + H^+$$

2. H^+/K^+-ATPase-Reaktion. Die bei der Carboanhydrase-Reaktion entstehenden Protonen werden primär aktiv (d. h. unter direktem ATP-Verbrauch) von einer **H^+/K^+-ATPase** aus den Belegzellen ins Magenlumen gepumpt. Im Austausch gelangt dabei **Kalium** (K^+) **in die Zelle**. Der Transporter wird auch als Protonenpumpe bezeichnet und sorgt direkt für den niedrigen pH-Wert im Magen. Die nachfolgenden Reaktionen 3 und 4 dienen dem passiven Cl^--Transport von der basolateralen zur luminalen Seite der Belegzellen. Die treibende Kraft sind die Protonen im Lumen.

3. HCO_3^-/Cl^--Antiport. Chlorid (Cl^-) wird auf der basolateralen Seite im Antiport gegen HCO_3^- in die Zelle „geholt".

4. Cl^--Transport und K^+-Rezirkulation. Cl^- und K^+ werden an der luminalen Membran wieder aus der Zelle transportiert. Das K^+, das vorher durch die Protonenpumpe in die Zelle gepumpt wurde, gelangt so wieder aus der Zelle hinaus (K^+-Rezirkulation). Cl^- folgt entsprechend seinem elektrochemischen Gradienten den positiv geladenen H^+-Ionen ins Magenlumen, sodass pro sezerniertem H^+-Ion auch ein Cl^--Ion in das Magenlumen gelangt.

Die H^+-Konzentration im Magenlumen (pH 1–4) ist etwa 10^3–10^6-fach höher als im Intrazellularraum (pH 7,1–7,3). Das Kalium rezirkuliert, sodass im Magenlumen eine ausreichende K^+-Konzentration erhalten bleibt. Die basolateral lokalisierte Na^+/K^+-ATPase sorgt für die Aufrechterhaltung der ionalen Zellhomöostase. Die gesamte HCl-Produktion der Belegzellen wird letztlich von der ATP-Hydrolyse der H^+/K^+-ATPase angetrieben.

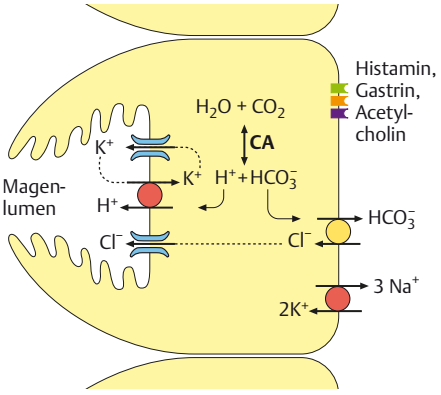

Abb. 2.4 Mechanismus der HCl-Sekretion in den Belegzellen des Magens. CA = Carboanhydrase. [Quelle: Huppelsberg, Walter, Kurzlehrbuch Physiologie, Thieme, 2013]

2.3.3 Steuerung der Magensäuresekretion

Die Produktion der HCl wird durch gastrointestinale Hormone gesteuert. Auch Neurotransmitter sind an dieser Regulation beteiligt.

Stimulation der Magensäureproduktion

Stimulierend wirken **Gastrin**, **Histamin** und **Acetylcholin**, die jeweils an eigene Membranrezeptoren der Belegzelle binden. Die 3 Botenstoffe wirken synergistisch an der Belegzelle. Fällt einer aus, ist die Säuresekretion deutlich reduziert.

Gastrin. Gastrin wird in der Mukosa von **G-Zellen** im Magenantrum und Duodenum gebildet und ins Blut freigesetzt (endokrine Sekretion), wenn in der gastrischen Phase die luminale Seite der Zellen durch **Proteine und Proteinabbauprodukte** chemisch gereizt wird. Durch die **Magendehnung** aktiviert, setzen außerdem auf der Blutseite efferente Fasern des N. vagus das Gastrin-releasing Peptide (GRP) frei, das ebenfalls zur Gastrinfreisetzung führt. Gastrin wird über den Blutweg zu den Belegzellen transportiert und bindet an Gastrinrezeptoren (CCK_B) der Belegzellen. Es bedingt über den gleichen Mechanismus wie Acetylcholin einen Ca^{2+}-Anstieg und fördert damit die Magensaftsekretion. Zusätzlich stimuliert es die Histaminfreisetzung aus den ECL-Zellen.

Histamin. Histamin wird von den H- oder ECL(enterochromaffine-like)-Zellen der Fundusdrüsen freigesetzt. Es bindet an **H_2-Rezeptoren** der Belegzellen und stimuliert über einen Anstieg der intrazellulären cAMP-Konzentration und Proteinkinase A die Säuresekretion.

Acetylcholin. Acetylcholin wird schon im Rahmen der kephalen Phase durch efferente Fasern des N. vagus freigesetzt. Es bindet direkt an muskarinische **M_3-Rezeptoren** der Belegzelle. Durch die Phospholipase C und einen intrazellulären Ca^{2+}-Anstieg wird die H^+/K^+-ATPase aktiviert und so die Säuresekretion stimuliert.

Physiologische Hemmung der HCl-Produktion

Physiologische Hemmstoffe der HCl-Produktion sind Somatostatin und Prostaglandin E_2 (PGE_2).

Somatostatin. Durch den Nahrungsbrei wird die sezernierte Magensäure zunächst abgepuffert. Sinkt im Verlauf der Magenentleerung der pH-Wert im Magen unter 2, wird zum Schutz gegen Übersäuerung die Gastrinausschüttung gehemmt. Ein **nied-**

aus: Endspurt Vorklinik – Biochemie, Physiologie (ISBN 9783132458963) © 2025. Thieme. All rights reserved.