

Verdauung, Nährstoffe und Stoffwechsel — eine erklärende Vertiefung

Zweck. Während die bisherigen Vertiefungen (0090-B2 Biochemie/Medizin, 0090-B3 Ökologie) *argumentierten, erklärt* dieser Text. Er beschreibt Schritt für Schritt, wie der menschliche Körper Nahrung verdaut und verwertet, wofür die einzelnen Nährstoffe gebraucht werden, wo die Bioverfügbarkeit entscheidet und was klinisch passiert, wenn etwas fehlt. Den Abschluss bildet ein kleiner vergleichend-zoologischer Anhang: warum die Katze Fleisch *muss*, der Hund nicht, wie der Wiederkäuer Gras in Nahrung verwandelt — und welche Verdauungs-Phänomene es im Tierreich sonst noch gibt. Das ist nicht nur Kontext: Es schärft die Kernthese des Bündels, dass der Mensch ein Allesfresser mit Wahlfreiheit ist — anders als ein obligater Karnivor.

Teil A — Die menschliche Verdauung, Station für Station

Verdauung ist die mechanische und chemische Zerlegung von Nahrung in resorbierbare Bausteine. Sie läuft als Fließband entlang des etwa acht bis neun Meter langen Magen-Darm-Trakts.

A.1 Mund. Die Verdauung beginnt vor dem Schlucken. Zähne zerkleinern mechanisch (Vergrößerung der Oberfläche), Speichel befeuchtet und enthält **α -Amylase (Ptyalin)**, die bereits Stärke in kürzere Ketten spaltet — deshalb schmeckt lange gekautes Brot süßlich. Speichel enthält außerdem Lysozym (antibakteriell) und Lipase-Spuren. Die Speichel-Amylase ist beim Menschen genetisch verstärkt (hohe AMY1-Kopienzahl) — ein evolutionärer Hinweis auf die zentrale Rolle von Stärke (vgl. Schicht 4 / Hardy-Hypothese).

A.2 Speiseröhre und Magen. Der Bissen (Bolus) wird durch peristaltische Wellen in den Magen befördert. Dort herrscht durch **Salzsäure (HCl)** ein pH von $\sim 1,5-3$: das denaturiert Proteine (entfaltet sie), aktiviert **Pepsinogen zu Pepsin** (spaltet Proteine in Peptide) und tötet die meisten Mikroorganismen. Die Belegzellen produzieren außerdem den **Intrinsic Factor** — ein Protein, das für die spätere Aufnahme von Vitamin B12 zwingend ist (s. C.1). Der Magen ist primär ein Säure-/Vorverdauungs- und Speicherorgan; nennenswerte Resorption findet hier kaum statt (Ausnahmen: Alkohol, manche Medikamente).

A.3 Dünndarm — das eigentliche Resorptionsorgan. Im Zwölffingerdarm (Duodenum) treffen drei Säfte zusammen:

- **Galle** (aus der Leber, gespeichert in der Gallenblase): emulgiert Fette zu kleinen Tröpfchen (Mizellen), damit Lipasen angreifen können — wie Spülmittel, das Fett in Wasser löslich macht.
- **Pankreassaft** (Bauchspeicheldrüse): enthält **Lipase** (Fettspaltung), **Amylase** (Stärke), **Proteasen** (Trypsin, Chymotrypsin: Proteine $\rightarrow$ Aminosäuren) sowie Bikarbonat, das die Magensäure neutralisiert.
- **Darmenzyme** der Bürstensaum-Zellen: Disaccharidasen wie **Laktase** (Milchzucker $\rightarrow$ Glukose+Galaktose), Maltase, Saccharase; Peptidasen.

Die Resorption geschieht über die riesige Oberfläche der **Zotten und Mikrovilli** (zusammen $\sim 30 \text{ m}^2$ — ein Tennisplatz, gefaltet in den Bauch). Im **Jejunum** werden Zucker und Aminosäuren ins Blut aufgenommen, im **Ileum** Gallensäuren rückresorbiert und — entscheidend — der **Intrinsic-Factor-B12-Komplex** an spezifischen Rezeptoren gebunden.

A.4 Dickdarm und Mikrobiom. Was unverdaut bleibt (v. a. Ballaststoffe), erreicht den Dickdarm. Hier passieren zwei Dinge: Wasser- und Elektrolytrückgewinnung (Eindickung des Stuhls) und die **bakterielle Fermentation** durch das Mikrobiom ($\sim 10^{13-10^{14}}$ Bakterien). Sie vergären Ballaststoffe zu **kurzkettigen Fettsäuren (SCFA: Butyrat, Propionat, Acetat)** — Butyrat ist

der Hauptbrennstoff der Dickdarmschleimhaut, antientzündlich und protektiv gegen Kolonkarzinom. Hier werden außerdem Vitamin K2 und einige B-Vitamine bakteriell gebildet. Eine ballaststoffarme, fleischbetonte Kost verschiebt das Mikrobiom (weniger SCFA-Bildner, mehr TMA-Bildner — vgl. 0090-B2 §1.1).

Teil B — Makronährstoffe: Verdauung und Stoffwechsel

B.1 Kohlenhydrate. Stärke und Zucker werden zu **Glukose** abgebaut, ins Blut aufgenommen und über Insulin in die Zellen geschleust (Energie, Glykogenspeicher, ggf. Fettsynthese). Entscheidend ist die *Form*: Vollkorn, Hülsenfrüchte und Gemüse liefern Glukose langsam (niedriger glykämischer Index) plus Ballaststoffe; isolierter Zucker und Weißmehl liefern sie als Spitze. **Ballaststoffe** sind unverdauliche Kohlenhydrate (Zellulose, β -Glucan, resistente Stärke, Pektin): sie sind selbst keine „Nährstoffe“ im engen Sinn, aber sie regulieren Blutzucker, Sättigung, Cholesterin (Bindung von Gallensäuren) und füttern das Mikrobiom. Tierprodukte enthalten *keine* Ballaststoffe — ein oft übersehener, qualitativer Unterschied.

B.2 Proteine und Aminosäuren. Proteine werden zu Aminosäuren zerlegt und neu zu körpereigenen Proteinen zusammengesetzt. Neun Aminosäuren sind **essenziell** (müssen mit der Nahrung kommen): Histidin, Isoleucin, Leucin, Lysin, Methionin, Phenylalanin, Threonin, Tryptophan, Valin. Die *Proteinqualität* misst, wie gut ein Lebensmittel diese liefert (Maße: PDCAAS, moderner DIAAS). Tierprotein ist meist „vollständig“; einzelne Pflanzenproteine haben limitierende Aminosäuren (Getreide: wenig Lysin; Hülsenfrüchte: wenig Methionin) — **kombiniert über den Tag** (Getreide + Hülsenfrüchte) ergibt sich aber ein vollständiges Profil; Soja und Quinoa sind für sich vollständig. Die alte „man muss in jeder Mahlzeit kombinieren“-Regel ist überholt; der Körper hat einen Aminosäure-Pool. Klinisch relevant: **Leucin** triggert die Muskelproteinsynthese (mTOR) — pflanzlich etwas niedriger, durch Menge ausgleichbar (vgl. 0090-B2 §5.6).

B.3 Fette. Triglyceride werden durch Lipase in Fettsäuren und Glycerin gespalten, in Mizellen resorbiert, in den Darmzellen zu **Chylomikronen** verpackt und über die Lymphe ins Blut gebracht. Fettsäuren unterscheiden sich entscheidend:

- **Gesättigte FS** (v. a. tierisch, Kokos): heben LDL-Cholesterin (kausal atherogen, vgl. 0090-B2 §3).
 - **Einfach ungesättigte FS** (Olivenöl, Nüsse, Avocado): günstig/neutral.
 - **Mehrfach ungesättigte FS**: die **essenziellen** Omega-6 (Linolsäure) und Omega-3 (α -Linolensäure, ALA) muss der Körper aufnehmen. Aus ALA werden EPA und DHA gebildet — aber ineffizient (vgl. 0090-B2 §5.3); Algen-DHA löst das direkt.
 - **Cholesterin** ist kein Nahrungsgift, sondern Baustein (Zellmembranen, Hormone, Gallensäuren); der Körper synthetisiert es selbst. Nahrungs-Cholesterin beeinflusst das Blut-LDL individuell unterschiedlich; der stärkere Hebel sind gesättigte Fette.
-

Teil C — Mikronährstoffe: was wofür, und wo die Bioverfügbarkeit entscheidet

C.1 Vitamin B12 (Cobalamin) — der kritische Sonderfall. B12 ist für Blutbildung und Nervenfunktion (Myelinscheiden) unverzichtbar. Sein Resorptionsweg ist kompliziert: im Magen aus der Nahrung freigesetzt, an **Intrinsic Factor** gebunden, im **Ileum** rezeptorvermittelt aufgenommen. B12 wird ausschließlich von **Mikroorganismen** synthetisiert — Pflanzen enthalten es nicht verlässlich. Tiere bekommen es über ihr Mikrobiom oder Futterzusatz; der Mensch über tierische Produkte *oder Supplement*. **Klinisch**: Mangel verursacht megaloblastäre Anämie und — heimtückischer — irreversible Neuropathien. Veganer müssen supplementieren; das ist

keine Schwäche der Ernährungsform, sondern eine triviale Bedingung (vgl. 0090-B2 §5.2). Auch viele Ältere und Metformin-/Säureblocker-Patienten sind betroffen (Resorptionsstörung).

C.2 Eisen — die zwei Formen und ihre Regulation. **Häm-Eisen** (tierisch) wird relativ unreguliert aufgenommen; **Nicht-Häm-Eisen** (pflanzlich) unterliegt der körpereigenen Steuerung über das Hormon **Hepcidin**: bei vollen Speichern drosselt der Körper die Aufnahme. Das ist ein Schutz vor Eisenüberladung — die Kehrseite von Häm-Eisen (oxidativer Stress, Darmkrebs-Pfad, vgl. 0090-B2 §1.4). Pflanzliche Eisenaufnahme wird durch **Vitamin C** stark gesteigert und durch Phytate/Tannine/Calcium gehemmt; Einweichen, Keimen und Fermentieren bauen Phytate ab. Gut geplante pflanzliche Kost geht nicht mit mehr Anämie einher.

C.3 Weitere Mineralstoffe. **Zink** (Immunsystem, Enzyme): pflanzlich etwas schlechter verfügbar (Phytate), über Vollkorn/Hülsenfrüchte/Nüsse abdeckbar. **Calcium** (Knochen, Muskel, Nerven): aus angereicherten Drinks, Tofu, Blattgemüse, Sesam — nicht milchabhängig. **Jod** (Schilddrüse): kritisch für *alle*, daher Speisesalz-Jodierung; Seetang als pflanzliche, aber dosierungsheikle Quelle. **Selen** (Antioxidans, Schilddrüse): bodenabhängig, Paranüsse sehr dicht. **Magnesium, Kalium** (pflanzlich reichlich), **Natrium** (eher Überschussproblem).

C.4 Fettlösliche Vitamine. **Vitamin A**: tierisch als fertiges Retinol, pflanzlich als Provitamin **Beta-Carotin** (Konversion individuell variabel) — Vorsicht: Leber akkumuliert Retinol bis zur Toxizität (Eisbärleber-Hypervitaminose, vgl. Schicht 3). **Vitamin D**: Sonnenlicht-abhängig, in nördlichen Breiten für *alle* Kostformen ein Supplementthema (D3 aus Flechten ist vegan). **Vitamin E** (Antioxidans, Pflanzenöle/Nüsse). **Vitamin K1** (Blattgemüse, Gerinnung) und **K2** (fermentierte Lebensmittel + körpereigene Umwandlung, Knochen/Gefäße).

C.5 Wasserlösliche Vitamine. B-Komplex (Energiestoffwechsel): meist pflanzlich gut gedeckt (Ausnahme B12). **Folat** (B9, Zellteilung, Schwangerschaft): grünes Gemüse, Hülsenfrüchte. **Vitamin C** (Kollagen, Antioxidans, Eisen-Enhancer): Obst, Gemüse.

C.6 „Bedingt essenzielle“ und konditionale Stoffe. **Cholin** (Zellmembranen, Acetylcholin): Eier sind reich, aber Hülsenfrüchte, Kreuzblütler und Supplemente decken es. **Kreatin** (Muskel-/Hirn-Energiepuffer) und **Carnosin**: körpereigen synthetisierbar, in pflanzlicher Kost niedriger — Supplementierung bei Veganern ein aktives, nicht alarmierendes Feld. **Taurin**: für den *Menschen* nicht essenziell (Eigensynthese) — für die *Katze* schon (s. Anhang). Dieser Unterschied ist der Schlüssel zum Verständnis von „obligater Karnivor“.

Teil D — Mikrobiom, Ballaststoffe, Darmgesundheit

Das Darmmikrobiom ist ein eigenes Stoffwechselorgan. Ballaststoffreiche, pflanzenbetonte Kost fördert SCFA-Bildner (Butyrat → Schleimhautgesundheit, Antiinflammation, Kolonkarzinom-Protektion). Fleisch-/fettbetonte, ballaststoffarme Kost fördert proteolytische und TMA-bildende Bakterien sowie sekundäre Gallensäuren (potenziell prokarzinogen). Diversität des Mikrobioms korreliert mit Pflanzenvielfalt der Kost. Das verbindet B.1 (Ballaststoffe), A.4 (Dickdarm) und die biochemischen Pfade aus 0090-B2.

Teil E — Humanmedizin: Mangelsyndrome und verdauungsrelevante Krankheiten

E.1 Mangelsyndrome. B12 → megaloblastäre Anämie, Neuropathie, Demenz-ähnliche Bilder. Eisen → mikrozytäre Anämie, Müdigkeit, Leistungsabfall. Vitamin D → Rachitis (Kind), Osteomalazie (Erwachsene). Jod → Kropf, Hypothyreose, in der Schwangerschaft kindliche Entwicklungsschäden. Folat → Neuralrohrdefekte. Vitamin A → Nachtblindheit. Vitamin C → Skorbut.

Diese Syndrome sind ernährungsform-*unabhängig* möglich; entscheidend ist die Planung, nicht das Etikett.

E.2 Verdauungsrelevante Pathologien. Laktoseintoleranz: physiologischer Normalzustand der Mehrheit der Menschheit (Laktase-Aktivität sinkt nach Entwöhnung; Lactase-Persistenz ~35 %, vgl. Schicht 6) — keine Krankheit, sondern der biologische Default. **Zöliakie:** Autoimmunreaktion auf Gluten. **Reizdarm (IBS), Divertikulose** (mit Ballaststoffmangel assoziiert), **chronisch-entzündliche Darmerkrankungen.** **Kolorektalkarzinom:** über Häm/NOC (rotes/prozessiertes Fleisch, IARC Gruppe 1/2A, vgl. 0090-B2 §2) und Ballaststoffmangel mit-beeinflusst. **Gicht:** Purinstoffwechsel (Harnsäure) — relevant bei hohem Fleisch-/Innereien-Konsum.

E.3 Stoffwechsel-Endpunkte (Querverweis): Atherosklerose (LDL, kausal), Typ-2-Diabetes (Häm-Eisen, Adipositas-Mediation), mehrere Karzinome (IGF-1/mTOR, Neu5Gc) — vollständig in 0090-B2.

Teil F (Schlusskapitel) — Vergleichende Verdauung im Tierreich

Ein kleines, aber erhellendes Thema: Wie verdauen *andere* Tiere — und was sagt das über den Menschen? Die Verdauungsanatomie verrät die evolutionäre Nahrungsnische. Genau hier entscheidet sich, ob ein Tier Fleisch *braucht* oder nur *kann*.

F.1 Die obligate Katze. Die Hauskatze ist ein **obligater Karnivor**: Sie *muss* Tierprodukte fressen, weil ihr Stoffwechsel mehrere Stoffe nicht selbst herstellen kann. Sie braucht **Taurin** aus der Nahrung (sonst Herzmuskelschwäche und Blindheit/Netzhautdegeneration), **fertiges Vitamin A** (kann Beta-Carotin nicht in Retinol umwandeln), **Arachidonsäure** (kann sie nicht synthetisieren) und hat einen obligaten Bedarf an **Arginin**. Ihr Darm ist kurz, ihre Amylase-Aktivität gering — sie ist auf eine fleischreiche, kohlenhydratarme Kost gebaut. Eine vegane Katze ohne präzise Supplementierung wird krank. **Das ist die echte Bedeutung von „der braucht Fleisch“ — und sie gilt für die Katze, nicht für den Menschen.**

F.2 Der flexible Hund. Der Hund stammt vom Wolf ab, ist aber im Zuge der Domestikation zum **fakultativen Allesfresser** geworden. Axelsson et al. 2013 (*Nature* 495:360-364, doi:10.1038/nature11837) zeigten: bei der Wolf-zu-Hund-Transition wurden drei aufeinanderfolgende Schritte des Stärkeverdauungs-Wegs genetisch verstärkt — u. a. eine etwa **fünffache Erhöhung der AMY2B-Kopienzahl** (Pankreas-Amylase). Hunde verdauen Stärke deutlich besser als Wölfe; das ist eine Parallele zur menschlichen AMY1-Erweiterung (Schicht 4) und ein schönes Beispiel für diät-getriebene Evolution. Der Hund *kann* gemischt leben — die Katze nicht.

F.3 Der Mensch dazwischen. Genau das ist der Punkt für das Gesamtwerk: Der Mensch ist anatomisch und genetisch ein **Allesfresser mit pflanzlicher Schlagseite** (langer Darm, AMY1-Erweiterung, Taurin-/Vitamin-A-Eigensynthese, B12 als einzige obligate tierische/supplementäre Ausnahme). Er ist *kein* obligater Karnivor wie die Katze. Daraus folgt nicht „Fleisch ist verboten“, sondern: Der Mensch hat — anders als die Katze — die biologische *Wahlfreiheit*, auf die sich das ethische und ökologische Argument des Bündels überhaupt erst stützen kann.

F.4 Die Wiederkäuer — Gras in Nahrung verwandeln. Rind, Schaf, Ziege, Hirsch besitzen einen **vierteiligen Magen: Pansen (Rumen), Netzmagen (Reticulum), Blättermagen (Omasum) und Labmagen (Abomasum)**. Im Pansen leben Billionen Mikroorganismen, die **Zellulose** (für Säugetiere selbst unverdaulich) zu kurzkettigen Fettsäuren vergären — das ist die Energiequelle des Wiederkäuers. Die Tiere würgen den Nahrungsbrei wieder hoch und kauen ihn erneut („**Wiederkäuen**“, Ruminat). Nebenprodukte: **Methan** (von Archaeen gebildet, klimarelevant, vgl. 0090-B3 §1.4) und **mikrobielles Protein**, das das Tier später verdaut. Die Pansen-Mikroben synthetisieren auch **B12** (wenn Kobalt im Futter ist) — deshalb

ist Wiederkäuerfleisch B12-reich. Ökologische Pointe: Wiederkäuer können marginales Grasland nutzen (Subsistenz-Vorbehalt), sind aber flächenineffizient als Massenmodell.

F.5 Hinterdarm-Fermentierer. Pferd, Esel, Kaninchen, Elefant fermentieren Pflanzenfasern nicht im Vormagen, sondern im **Blinddarm/Dickdarm (Caecum/Colon)**. Das ist weniger effizient als der Pansen (die Mikroben sitzen *hinter* dem Hauptresorptionsort), erlaubt aber kontinuierliches Fressen großer Mengen — das Pferd frisst fast ununterbrochen.

F.6 Cecotrophie — Kot als zweite Mahlzeit. Kaninchen und viele Nagetiere produzieren zwei Kotarten: harte Kügelchen und weiche, nährstoffreiche **Caecotrophen**, die sie direkt wieder fressen. So gewinnen sie B-Vitamine und mikrobielles Protein, die im Hinterdarm gebildet wurden und sonst verloren gingen — ein eleganter Trick, um die „falsche Reihenfolge“ der Hinterdarm-Fermentation auszugleichen. Verwandtes Phänomen: **Koprophagie** in verschiedenen Arten.

F.7 Vormagen-Gärer ohne Wiederkäuen. Kängurus, Flusspferde und **Blattaffen (Colobinae)** haben ebenfalls Gärkammern vor dem eigentlichen Magen, kauen aber nicht wieder. Der Riesenpanda ist ein kurioser Sonderfall: Er hat den **Verdauungstrakt eines Karnivoren** (kurz, einfacher Magen), ernährt sich aber fast ausschließlich von Bambus — und muss deshalb enorme Mengen fressen, weil er Zellulose schlecht aufschließt. Evolution ist eben kein perfekter Ingenieur.

F.8 Vögel. Vögel haben keine Zähne; sie nutzen einen **Kropf** (Speicher/Aufweichung) und einen muskulösen **Muskelmagen (Gizzard)**, oft mit verschluckten Steinchen (Gastrolithen), zur mechanischen Zerkleinerung. Körnerfresser, Nektarfresser (Kolibri), Greifvögel — jede Nische hat ihre Verdauungslösung.

F.9 Was uns das lehrt. Die Bandbreite — von der obligat fleischfressenden Katze über den flexiblen Hund und den faserfermentierenden Wiederkäuer bis zum kot-recycelnden Kaninchen — zeigt: „Was ein Tier fressen soll“ ergibt sich aus seiner Verdauungsphysiologie, nicht aus Ideologie. Für den Menschen lautet die physiologische Antwort: Allesfresser mit pflanzlicher Schlagseite und echter Wahlfreiheit. Genau diese Wahlfreiheit ist die biologische Voraussetzung dafür, dass die Frage „*soll* der Mensch industrielle Tierprodukte essen?“ überhaupt sinnvoll gestellt werden kann — sie stellt sich der Katze nicht.

Track: FORSCHUNG · ORCID 0009-0003-9799-6747 · forschung@tschueller.com · CC BY 4.0
Stand: 2026-06-16 · Erklärende Vertiefung zu den Schichten 2-6; Tier-Anhang als Kontrastfolie zur Allesfresser-These. Axelsson 2013 web-verifiziert; übrige Inhalte etablierte Physiologie.