Träger und Übertragung

Biochemie und Biologie der Informationsweitergabe

Thomas Schüller · ORCID 0009-0003-9799-6747 · Syntagma Forschung · Wien

FORSCH-PROV0420 (Kennung provisorisch) · Satzfassung v1.3 · 4. November 2026

Satzfassung. Sie enthält denselben Text wie die Lesefassung und die Einzeldateien des Bündels, ergänzt um die beiden Abbildungen an ihrer Stelle im Text. Maßgeblich sind die Einzeldateien.

Inhalt

Teil A Stoffliche Grundlagen (A1–A8) · Teil B Zelluläre Organisation (B1–B6) · Teil C Zentrales Dogma (C1–C9) · Modul D Kristallreplikation und Vorlauf (D0–D9) · Teil E Werkzeugbezug · Englische Zusammenfassung aller Teile

Aufbau

Teil	Gegenstand	Ebene
A	Stoffliche Grundlagen	Was besteht
B	Zelluläre Organisation	Wo es abläuft
C	Zentrales Dogma	Wie Information fließt
D	Kristallreplikation und Vorlauf	Was Information überhaupt tragen kann
E	Werkzeugbezug	Wie es lehrbar wird

Abbildungen

Nr.	Inhalt	Steht in
1	Informationsfluss: gesichert, selten, ausgeschlossen	Teil C, Abschnitt C9
2	Templatwachstum: periodisch/aperiodisch, Anlagerung, Defekt, Bruch	Modul D, Abschnitt D3

Quelldateien der Abbildungen liegen im Bündel unter `werk/abb/` als SVG und PNG.

Teil A — Stoffliche Grundlagen (Fließtext v1.1)

FORSCH-PROV0420 · Stand 2026-10-27

A1 Wasser

Wasser ist in jeder Zelle das mengenmäßig vorherrschende Molekül und zugleich dasjenige, dessen Eigenschaften die Form aller übrigen Moleküle mitbestimmen. Der Grund liegt in der

Geometrie: Der Winkel zwischen den beiden O–H-Bindungen beträgt nach Lehrbuchangabe rund 104,5°, und die höhere Elektronegativität des Sauerstoffs verschiebt die Bindungselektronen so, dass ein permanenter Dipol entsteht. Jedes Molekül kann zwei Wasserstoffbrücken als Donor und zwei als Akzeptor eingehen. Daraus folgt ein ausgedehntes, ständig umknüpfendes Netzwerk. Die einzelne Brücke ist mit Werten im Bereich von etwa 20 kJ/mol schwach gegenüber einer kovalenten Bindung und bricht bei Raumtemperatur im Pikosekundenbereich wieder auf; die große Zahl gleichzeitiger Brücken erzeugt dennoch die hohe Verdampfungswärme, die hohe Wärmekapazität und die Oberflächenspannung, die flüssiges Wasser von vergleichbar kleinen Molekülen unterscheiden.

Für die Biochemie entscheidend ist der Umgang des Netzwerks mit unpolaren Gruppen. Eine unpolare Oberfläche kann keine Wasserstoffbrücken anbieten. Das umgebende Wasser verliert dort Orientierungsfreiheit, weil es seine Brücken in einer geordneteren Schale um den Fremdkörper herumführen muss. Werden mehrere unpolare Flächen zusammengelegt, verkleinert sich die Gesamtgrenzfläche, und ein Teil des geordneten Wassers kehrt in die freie Phase zurück. Der Zusammenschluss wird damit nicht von einer Anziehung zwischen den unpolaren Gruppen getragen, sondern vom Entropiegewinn des Lösungsmittels. Dieser hydrophobe Effekt ist die treibende Kraft hinter der Proteinfaltung (siehe A2) und hinter der Selbstorganisation von Lipiden zu Doppelschichten (siehe A4).

Wasser ist dabei nicht nur Umgebung, sondern Reaktionspartner. Hydrolysen spalten Peptid-, Ester- und Phosphoanhydridbindungen unter Einbau eines Wassermoleküls; Kondensationen bei der Polymerbildung setzen eines frei. Die Autoprotolyse legt mit dem Ionenprodukt (Lehrbuchwert $pK_W \approx 14$ bei 25 °C) die Skala fest, auf der Protonierungszustände von Seitenketten, Phosphatgruppen und Basen eingestellt werden. Auch die Energiekopplung der Zelle arbeitet über Wasser: Die Hydrolyse von ATP wird erst dadurch zum nutzbaren Antrieb, dass die Produkte hydratisiert vorliegen (siehe A7). Eine Darstellung, die Wasser als Kulisse behandelt, lässt damit den größten Teil der Triebkräfte aus, die Struktur und Umsatz bestimmen.

A2 Aminosäuren und Proteine

Proteine sind unverzweigte Polymere aus zwanzig proteinogenen Aminosäuren, die im Grundgerüst identisch sind und sich nur in der Seitenkette unterscheiden. Die Seitenkette entscheidet darüber, ob ein Rest ins Innere des gefalteten Moleküls strebt, an der Oberfläche bleibt, eine Ladung trägt oder an Katalyse beteiligt ist.

Klasse	Vertreter	Merkmal	Typische Rolle
unpolar, aliphatisch	Gly, Ala, Val, Leu, Ile, Pro, Met	keine Brücken möglich	hydrophober Kern, Packung
aromatisch	Phe, Tyr, Trp	ausgedehnte π-Systeme	Kern, Stapelung, UV-Absorption
polar, ungeladen	Ser, Thr, Cys, Asn, Gln	Brücken als Donor/Akzeptor	Oberfläche, Phosphorylierung, Disulfide
basisch	Lys, Arg, His	bei pH 7 überwiegend positiv	Nukleinsäurebindung, Säure-Base-Katalyse
sauer	Asp, Glu	bei pH 7 negativ	Metallbindung,

Klasse	Vertreter	Merkmal	Typische Rolle
			Salzbrücken, Katalyse

Die Verknüpfung erfolgt über die Peptidbindung. Ihr Stickstoff-Carbonyl-System ist mesomeriestabilisiert und besitzt partiellen Doppelbindungscharakter; die sechs beteiligten Atome liegen in einer Ebene, und die Drehung um diese Bindung ist gesperrt. Beweglich bleiben die beiden benachbarten Bindungen, deren Winkel als Phi und Psi bezeichnet werden. Der Konformationsraum einer Kette ist dadurch von vornherein stark eingeschränkt, was die Faltung überhaupt erst in erreichbarer Zeit möglich macht.

Aus wiederkehrenden Phi/Psi-Kombinationen entstehen die Sekundärstrukturen. Die Alpha-Helix ordnet nach Lehrbuchangabe rund 3,6 Reste pro Windung und wird durch Wasserstoffbrücken zwischen Carbonyl- und Amidgruppen in Kettenrichtung zusammengehalten. Das Beta-Faltblatt verbindet benachbarte, parallel oder antiparallel laufende Abschnitte über Brücken quer zur Kettenrichtung. Die Tertiärstruktur bezeichnet die räumliche Anordnung dieser Elemente, die Quartärstruktur die Zusammenlagerung mehrerer Ketten zu einem Komplex.

Die Faltung verläuft nicht als Suche durch alle Möglichkeiten, sondern entlang eines Energietrichters: Viele teilweise korrekte Zustände haben bereits niedrigere Energie, sodass die Kette schrittweise in das Minimum geführt wird. Chaperone verhindern dabei unproduktive Zusammenlagerungen, ohne die Zielstruktur vorzugeben. Scheitert der Vorgang, können Fehlfaltungen entstehen, die sich stapeln und ihre Konformation auf korrekt gefaltete Moleküle derselben Sequenz übertragen. Dieser Weg — Weitergabe von Faltung ohne Weitergabe von Sequenz — ist der stoffliche Anschluss an Prion- und Amyloidbildung (siehe D1) und zugleich der Fall, an dem sich die Reichweite des zentralen Dogmas entscheidet (siehe C2).

A3 Nukleotide und Nukleinsäuren

Ein Nukleotid besteht aus drei Bausteinen: einer stickstoffhaltigen Base, einer Pentose und mindestens einer Phosphatgruppe. Die Pentose unterscheidet die beiden Polymerklassen — Ribose in der RNA, 2′-Desoxyribose in der DNA. Die Basen teilen sich in Purine (Adenin, Guanin) und Pyrimidine (Cytosin, Thymin in der DNA, Uracil in der RNA). Die Verknüpfung zum Polymer erfolgt über Phosphodiesterbindungen zwischen dem 5′- und dem 3′-Kohlenstoff benachbarter Zucker; daraus ergibt sich eine gerichtete Kette mit unterscheidbaren Enden.

Die Basenpaarung ist die stoffliche Grundlage des Kopierens. Adenin paart mit Thymin über zwei, Guanin mit Cytosin über drei Wasserstoffbrücken. Die Paarungen sind geometrisch gleichwertig, sodass jedes Paar denselben Platz im Doppelstrang einnimmt und die Abfolge frei wählbar bleibt. Komplementarität heißt, dass jeder Strang die Information über den anderen vollständig enthält: Ein getrennter Strang kann als Vorlage für die Neusynthese des Gegenstücks dienen. Diese Eigenschaft, nicht eine besondere chemische Aktivität, macht die Nukleinsäure zum Informationsträger (siehe C1).

Im B-Form-Doppelstrang laufen die beiden Ketten antiparallel und winden sich rechtsgängig umeinander; Lehrbuchwerte nennen rund 10,5 Basenpaare pro Windung, etwa 0,34 nm Abstand pro Paar und rund 2 nm Durchmesser. Die Basen liegen innen und stapeln sich übereinander, das Zucker-Phosphat-Rückgrat außen. Ein Großteil der Stabilität stammt aus dieser Stapelung, nicht allein aus den Brücken. Weil die Enden in der Zelle fixiert oder

ringförmig geschlossen sind, ist die Verwindungszahl eine erhaltene Größe: Jede lokale Entwindung beim Lesen oder Kopieren erzeugt Überdrehung anderswo. Topoisomerasen lösen diese Spannung durch kontrolliertes Schneiden und Wiederverschließen.

Chemisch ist die DNA stabil, aber nicht unveränderlich. Die wichtigsten spontanen und induzierten Schadensarten sind:

Schadensart	Auslöser	Folge
Desaminierung	spontan, hydrolytisch	Cytosin wird zu Uracil, Basenfehlpaarung
Depurinierung	spontan, hydrolytisch	basenfreie Stelle im Strang
Oxidation	reaktive Sauerstoffspezies	veränderte Basen, Fehlpaarung
Alkylierung	elektrophile Stoffe	blockierte oder falsch gelesene Basen
Pyrimidindimere	UV-Strahlung	Verknüpfung benachbarter Basen, Blockade
Strangbrüche	Strahlung, Radikale, Stoffwechsel	Verlust der Kontinuität, Bruchreparatur nötig

RNA ist wegen der 2′-Hydroxygruppe hydrolyseanfälliger und liegt meist einzelsträngig vor. Sie faltet sich dabei über interne Paarungen zu Haarnadeln, Schleifen und Pseudoknoten und erreicht damit definierte Strukturen mit katalytischer oder regulatorischer Funktion.

A4 Lipide und Membranen

Membranlipide sind amphiphil: Ein polarer Kopf steht einem unpolaren Schwanz aus einer oder mehreren Kohlenwasserstoffketten gegenüber. Beim Phosphoglycerid trägt ein Glyceringerüst zwei Fettsäureester und eine Phosphatgruppe mit variablem Kopfanteil; Sphingolipide und Sterole folgen anderen Gerüsten, behalten aber die Aufteilung in polaren und unpolaren Bereich. Diese eine Eigenschaft genügt, um in wässriger Umgebung eine Struktur hervorzubringen.

Die Triebkraft ist dieselbe wie bei der Proteinfaltung (siehe A1): Das Zusammenlegen der unpolaren Ketten verkleinert die Grenzfläche zum Wasser und setzt geordnete Hydrathüllen frei. Welche Struktur entsteht, hängt von der Form des Moleküls ab. Ein kegelförmiges Lipid mit großem Kopf und einer Kette bildet Micellen; ein eher zylindrisches Lipid mit zwei Ketten bildet eine Doppelschicht. Weil eine ebene Doppelschicht an ihren Rändern offene unpolare Flächen hätte, schließt sie sich zu einem Vesikel. Das Ergebnis ist ein abgegrenzter Innenraum — entstanden ohne Vorlage, ohne Bauanleitung und ohne Energiezufuhr von außen, allein aus Molekülform und Lösungsmitteleigenschaften. Damit steht neben dem Kristall ein zweiter Fall von Ordnung ohne Instruktion, der in Teil D als Vorlauffall zur Konformationsweitergabe aufgenommen wird (siehe D2).

Die Doppelschicht ist nach Lehrbuchangabe etwa 4 bis 5 nm dick und verhält sich in der Ebene flüssig: Lipide tauschen rasch seitliche Plätze, wechseln aber nur selten spontan die Seite. Der Grad der Fluidität hängt von Kettenlänge, Zahl der Doppelbindungen und Sterolanteil ab und wird von Zellen aktiv eingestellt. Für polare und geladene Teilchen ist die Schicht nahezu undurchlässig, was Transportproteine erforderlich macht:

Transportform	Triebkraft	Richtung	Beispielhafte Aufgabe
einfache Diffusion	Konzentrationsgefälle	abwärts	Gase, kleine unpolare Moleküle
erleichterte Diffusion	Konzentrationsgefälle	abwärts	Zucker, Ionen durch Kanäle
primär aktiver Transport	ATP-Hydrolyse	aufwärts	Ionenpumpen
sekundär aktiver Transport	bestehender Ionengradient	aufwärts für den Begleitstoff	Cotransport von Nährstoffen

Aus der selektiven Durchlässigkeit und den Pumpen folgt eine Ladungs- und Konzentrationsdifferenz über der Membran. Ruhepotentiale tierischer Zellen liegen nach Lehrbuchangabe im Bereich von etwa −60 bis −90 mV. Dieser Gradient ist zugleich Speicher und Übertragungsgröße; seine Nutzung zur ATP-Bildung wird in A7 behandelt.

A5 Kohlenhydrate

Kohlenhydrate sind Polyhydroxyaldehyde und -ketone sowie deren Polymere. Monosaccharide liegen in wässriger Lösung überwiegend als Ringe vor; beim Ringschluss entsteht am anomeren Kohlenstoff ein zusätzliches Stereozentrum, dessen beide Formen als Alpha und Beta bezeichnet werden. Diese Unterscheidung ist nicht formal, sondern entscheidet über die Eigenschaften der daraus gebildeten Polymere.

Die Verknüpfung erfolgt als glykosidische Bindung zwischen dem anomeren Kohlenstoff eines Zuckers und einer Hydroxygruppe des nächsten. Weil mehrere Hydroxygruppen zur Verfügung stehen, sind Verzweigungen und zahlreiche Verknüpfungsmuster möglich. Darin unterscheiden sich Kohlenhydrate grundsätzlich von Nukleinsäuren und Proteinen, die jeweils nur eine Verknüpfungsstelle kennen und deshalb lineare Ketten bilden.

Polysaccharid	Baustein und Bindung	Funktion	Besonderheit
Stärke (Amylose/Amylopektin)	Glucose, α-1,4 und α-1,6	pflanzlicher Speicher	helikal, leicht abbaubar
Glykogen	Glucose, α-1,4 und α-1,6	tierischer Speicher	stark verzweigt, viele Angriffsenden
Cellulose	Glucose, β-1,4	pflanzliche Zellwand	gestreckte Ketten, Faserbildung
Chitin	N-Acetylglucosamin, β-1,4	Exoskelett, Pilzwand	cellulosenah, zusätzlich Amidgruppen
Peptidoglykan	Zucker-Peptid-Verbund	bakterielle Zellwand	quervernetzt, drucktragend

Der Vergleich von Stärke und Cellulose zeigt die Tragweite der anomeren Konfiguration: Gleiche Bausteine, unterschiedliche Bindungsgeometrie, und daraus folgt einmal ein leicht mobilisierbarer Speicher, einmal ein tragendes Strukturmaterial.