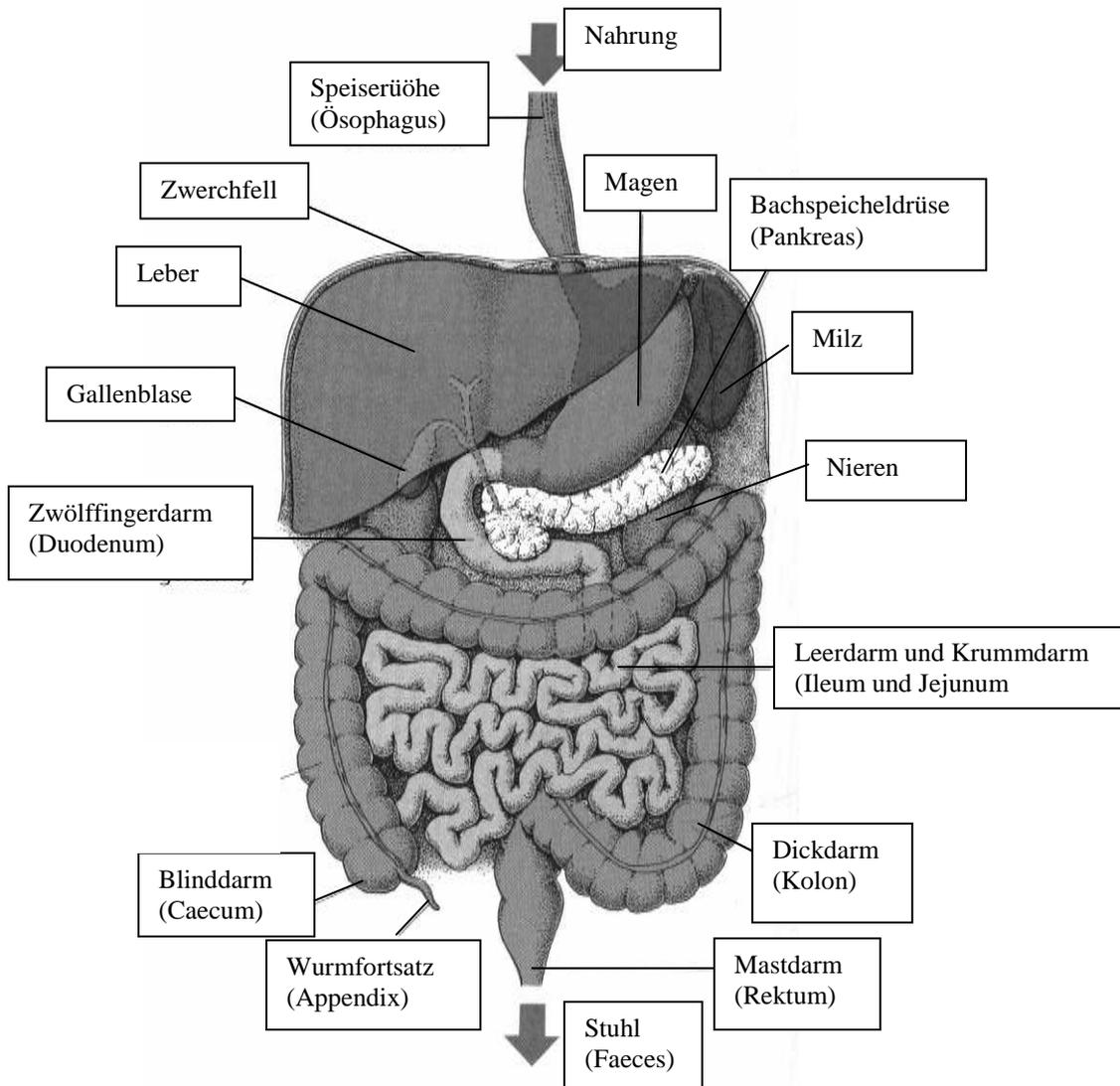


## 5.4. Verdauung

### 5.4.1. Aufbau der Verdauungsorgane

Der Verdauungstrakt (**Gastrointestinaltrakt**) bildet ein durchgehendes Rohr, das mit dem Mund beginnt und mit dem After (**Anus**) endet:

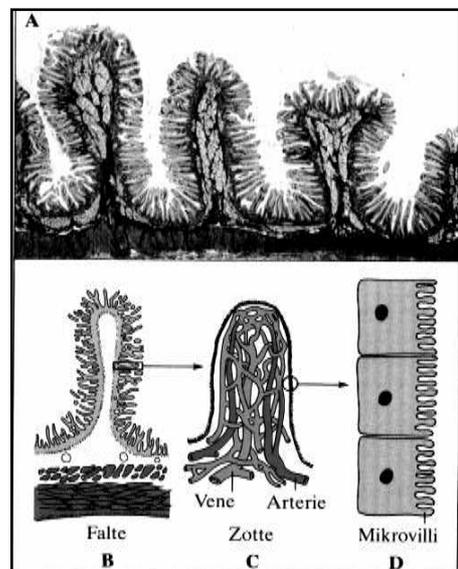


Die **Mucosa**, eine Schleimhaut, bildet die innere Wandschicht des Verdauungstraktes. Sie besteht aus einem dünnen **Epithel**, das in direktem Kontakt mit der zu verdauenden Nahrung steht und durch mehrfache Faltung eine Oberfläche von ca. 200 m<sup>2</sup> aufweist:

- A: Photo der Darmfalten
- B: Schema der Darmfalte
- C: Darmzotte
- D: Darmepithelzellen

An das Epithel schließt sich lockeres Bindegewebe und eine Schicht glatter, unwillkürlich arbeitender **Muskulatur** an. Diese feine, zur Schleimhaut gehörende Muskulatur gestattet Eigenbewegungen der Schleimhaut, um den Kontakt des Epithels zur Nahrung zu optimieren.

Die gesamte Verdauungsröhre wird außerdem von einer dicken zweilagigen, ebenfalls unwillkürlich arbeitenden Muskelschicht umgeben, die für die **mechanische** Zerkleinerung sowie den Transport der Nahrung durch wellenförmig wandernde uskelkontraktionen (**Peristaltik**) dient.



## 5.4.2. Enzyme des menschlichen Verdauungstraktes

Die **chemische** Verdauung wird im wesentlichen durch **Enzyme** bewirkt. Dabei handelt es sich ausschließlich um **Hydrolasen**, durch die die Kohlenhydrate, Fette und Proteine zu Monosacchariden, Fettsäuren, Glycerin und Aminosäuren hydrolysiert werden, die dann durch die Dünndarmwand in das Blut- oder Lymphsystem aufgenommen (**resorbiert**) werden können.

### 5.4.2.1. Glycosidasen

**Glycosidasen** hydrolysieren glykosidische Bindungen (**Vollacetale**) und spalten die Polysaccharide Amylose und Amylopektin über Hexa- und Disaccharide zu den Monosacchariden Glucose, Fructose und Galactose. Sie werden nach der Art der hydrolysierten Bindung unterteilt:

Klasse	Name	Substrat	Spaltprodukte	Vorkommen
<b><math>\alpha</math>-(1,4)-Glucosidasen</b>	$\alpha$ -Amylase	Glykogen, Amylose, Dextrine	Dextrine (6 Glucoseeinheiten) Maltose	Speichel, Pankreassaft Körner und Früchte der Pflanzen
	$\beta$ -Amylase	Amylose	Maltose	Körner und Früchte der Pflanzen
	Maltase	Maltose	D-Glucose	Mucosa
	Saccharase	Saccharose	D-Glucose D-Fructose	Mucosa
<b><math>\alpha</math>-(1,4)-Galactosidasen</b>	Lactase	Lactose	D-Glucose D-Galactose	Mucosa
<b><math>\alpha</math>-(1,6)-Glucosidasen</b>		Amylopektin	D-Glucose	Mucosa
<b>B-(1,4)-Glucosidasen</b>	Cellulase	Cellulose	D-Glucose	Schimmelpilze, z.B. Aspergillus niger, Bakterien im menschlichen und tierischen Verdauungstrakt, z.B. Escherischia coli

### 5.4.2.2. Peptidasen

**Peptidasen** hydrolysieren die **Peptidbindungen** der Proteine und spalten sie über kürzerkettige Polypeptide in Aminosäuren. Sie sind weniger spezifisch als die Glycosidasen und werden daher nach der Lage des Angriffsortes unterteilt:

**Endopeptidasen** spalten die Kette an einer bestimmten Stelle in der Mitte.

**Exopeptidasen** greifen am Carboxyl- (**Carboxypeptidasen**) oder Aminoende (**Amino-peptidasen**) der Kette an.

Klasse	Name	Substrat	Spaltprodukte	Vorkommen
<b>Endopeptidasen</b>	Pepsin	Proteine	Polypeptide	Magen
	Trypsin	Proteine mit Lys oder Arg	Polypeptide	Pankreassaft
	Chymotrypsin	Proteine	Polypeptide	Pankreassaft
<b>Carboxypeptidasen</b>	Carboxypeptidase A	Spaltprodukte des Chymotrypsins	hydrophobe AS + Polypeptid-Rest	Pankreassaft
	Carboxypeptidase B	Spaltprodukte des Trypsins	basische AS + Polypeptid-Rest	Pankreassaft
<b>Amino-peptidasen</b>		Proteine	AS + Rest	Pankreassaft

### 5.4.2.3. Lipasen

**Lipasen** hydrolysieren die **Esterbindungen** der Fette und spalten diese über Di- und Monoacylglyceride in Glycerin und Fettsäuren. Sie sind ebenfalls relativ unspezifisch und werden nach der Lage des Angriffsortes unterteilt:

Klasse	Name	Substrat	Spaltprodukte	Vorkommen
<b>Triacylglycerinlipasen</b>	Magenlipase	Triglyceride mit kurz-kettigen FS	$\beta$ -Monoacylglyceride + Fettsäuren	Magensaft
	Pankreaslipase	Triglyceride mit lang-kettigen FS	$\beta$ -Monoacylglyceride + Fettsäuren	Pankreassaft
<b>Monoacylglycerinlipasen</b>		2-Monoglyceride	Glycerin + Fettsäuren	Pankreassaft

### 5.4.3. Mund und Speiseröhre (Ösophagus)

Im **Mund** wird die Nahrung zunächst durch Beißen und Kauen mechanisch zerkleinert. Der **Speichel** enthält

1. **Hydrogencarbonat**, das den pH-Wert leicht basisch zwischen 7 und 8 puffert, um den Zahnschmelz vor Säuren zu schützen und das Ptyalin zu aktivieren.
2. **Lysozym**, eine **Glycosidase**, die bestimmte Polysaccharide (**Mureine**) spaltet, die der Hauptbestandteil der Zellwände der Bakterien sind. Lysozym wirkt daher **bakterizid** und dient ebenfalls zum Schutz des Zahnschmelzes, da viele dieser Bakterien saure Stoffwechselprodukte bilden.
3. **Ptyalin**, eine  **$\alpha$ -1,4-Glucosidase**.
4. **Schleimstoffe (Mucine)**, die die Gleitfähigkeit des Speisebreies erhöhen und vor allem aus **Glykoproteiden** bestehen

### 5.4.4. Magen

Der Magen dient hauptsächlich als Vorratsbehälter für vorverdaute Nahrung. Sowohl der Eingang von der Speiseröhre her (**Magenmund** bzw. Kardia) als auch der Ausgang zum Zwölffingerdarm (**Pfortner** bzw. Pyrolus) sind normalerweise durch starke Muskelringe verschlossen. Sie werden nur kurz geöffnet, um heruntergeschluckte Nahrungsbrocken aufzunehmen bzw. in regelmäßigen Abständen dosierte Mengen an Nahrungsbrei in den Zwölffingerdarm abzugeben. Der **Magensaft** enthält:

1. **Salzsäure**, die den pH-Wert stark sauer zwischen 2 und 3 hält, um Proteine zu denaturieren, (wobei u.a. die lebenswichtigen  $Fe^{3+}$ -Ionen freigesetzt werden), das Pepsin zu aktivieren und Bakterien abzutöten.
2. **Lipasen**, die vor allem Fette mit kurzkettigen Fettsäuren spalten und für die Milchverdauung beim Säugling von Bedeutung sind.
3. **Pepsinogen**, das durch die Salzsäure zu **Pepsin** aktiviert wird.
4. **Mucine**, die die Gleitfähigkeit des Speisebreies erhöhen und die Magenwand vor Selbstzerstörung schützen.

### 5.4.5. Zwölffingerdarm (Duodenum)

In den **Zwölffingerdarm** mündet der Ausführungsgang der **Bauchspeicheldrüse (Pankreas)**. Der Bauchspeichel enthält:

1. **Hydrogencarbonat**, das den pH-Wert wieder leicht basisch zwischen 7 und 8 hält, um die folgenden Enzyme zu aktivieren:
2. **Chymotrypsinogen** und **Trypsinogen**, die erst durch das im Dünndarm gebildete Enzym **Enterokinase** zu **Chymotrypsin** und **Trypsin** aktiviert werden, um eine Selbstzerstörung der Bauchspeicheldrüse zu verhindern.
3. **Carboxypeptidasen A und B**
4.  **$\alpha$ -Amylasen**
5. **Lipasen** zur Spaltung von Fetten mit langkettigen Fettsäuren.

Durch den Gallengang gelangt auch der in der **Leber** gebildete **Gallensaft** in den Zwölffingerdarm. Er enthält:

1. **Gallensäuren**, die als Emulgatoren für die Mononacylglyceride bzw. die abgespaltenen Fettsäuren dienen und außerdem für die Aktivierung einiger Lipasen notwendig sind.
2. **Phospholipide (vor allem Lecithin)**, die ebenfalls als Emulgatoren dienen und außerdem in den Darmzellen zum Aufbau von Lipoproteinen verwendet werden.
3. **Cholesterin**, das zusammen mit den Nahrungslipiden resorbiert und mittels Lipoproteinen über den Milchbrustgang in den Blutkreislauf gelangt und auf diese Weise im ganzen Körper verteilt wird.
4. alle fettlöslichen Abbauprodukte des Leberstoffwechsels, z.B. den Gallenfarbstoff **Bilirubin**, der aus dem Abbau des Hämoglobins stammt und die Reste aller **Medikamente**, die in der Leber abgebaut werden.

### 5.4.6. Dünndarm (Ileum und Jejunum)

Im Dünndarm kommt zu den bisherigen Verdauungssäften noch der Darmsaft hinzu, der in den Drüsen der Darmschleimhaut gebildet wird. Wesentlicher Bestandteil des Darmsaftes sind:

1. **Aminopeptidasen**
2.  **$\alpha$ -Amylasen**
3. **Mucine**

Die Hauptaufgabe des Dünndarms besteht jedoch in der **Resorption** (Aufnahme) der verdauten Nahrungsbestandteile.

Die **wasserlöslichen** Bestandteile gelangen durch

- **passive Transportvorgänge** (Fructose,) oder
- **aktive Transportvorgänge** (Glucose, Galactose, Dipeptide, Aminosäuren, Kurzkettige Fettsäuren, Glycerin, Gallensäuren)

direkt über die **Pfortader** in die **Leber**.

Die Resorption der **wasserunlöslichen** Bestandteile (Monoacylglyceride, langkettige Fettsäuren, Cholesterin und Phospholipide) ist dagegen aufwendiger:

Nahrungslipide sind im **Magen** zunächst grob verteilt mit einem Tröpfchendurchmesser von rund 100 nm.

Sie bilden im alkalischen Milieu des **Dünndarms** mit den Phospholipiden und Gallensäuren des Gallensaftes eine **Emulsion**.

Im Duodenum werden die Fettsäuren am C<sub>1</sub> und C<sub>3</sub> des Glycerin abgespalten, so daß  **$\beta$ -Monoacylglyceride** übrig bleiben. Die in der Nahrung vorhandenen Cholesterinester werden ebenfalls zu Cholesterin und Fettsäuren hydrolysiert.

Die dabei entstehenden Spaltprodukte bilden **Micellen**, deren Durchmesser in der Regel kleiner als 10 nm ist. Sie enthalten Fettsäuren, Monoacylglyceride, Cholesterin, Gallensäuren und Phospholipide. Auf diese Weise wird die **Teilchenkonzentration** von Fettabbauprodukten um den Faktor 1000 erhöht.

Die **langkettigen Fettsäuren** werden in den **Dünndarmzellen** zunächst mit Coenzym A aktiviert und anschließend mit den **Monoacylglyceriden** oder mit körpereigenem (durch Reduktion von Dihydroxyacetonphosphat aus der Glykolyse entstandenem) Glycerin wieder zu Triacylglyceriden **neu verestert** (**Lipogenese**, vgl. 3.3.).

**Cholesterin** wird ebenfalls mit aktivierten Fettsäuren verestert und zusammen mit den neu gebildeten Triacylglyceriden und den **Phospholipiden** mit Hilfe von spezielle Lipoproteinen, den **Chylomikronen** (s. 5.2.1.) über den **Milchbrustgang** des **Lymphsystems** an der Leber vorbei in den **Blutkreislauf** abgegeben.

### 5.4.7. Dickdarm (Kolon)

Der Dickdarm produziert keine Verdauungssäfte. Dem Speisebrei werden **Wasser** und **Elektrolyte** entzogen und resorbiert. Außerdem werden **Schleimstoffe** abgesondert, die die Gleitfähigkeit der unverdaulichen Nahrungsbestandteile erhöhen sollen.

Die unverdaulichen Nahrungsbestandteile, die **Ballaststoffe**, regen die Darmbewegung an - eine ballaststofffreie Nahrung würde zur Verstopfung führen.

Die **Bakterien** im Dickdarm vergären Ballaststoffe, die dabei entstehenden Gase Methan, Kohlenstoffdioxid, Wasserstoffe u.a. können zu unerwünschten **Blähungen** führen. Die ernährungsabhängige Bakterienflora ist auch für die Synthese von Vitamin K, Biotin, Niacin und Folsäure von Bedeutung.

### 5.4.8. Spaltung und Resorption von Kohlenhydraten, Fetten und Eiweißen (Übersicht)

