**Biologie Jahrgangsstufe 12 im LehrplanPLUS**

**I Genetik und Gentechnik**

**2 Regulation der Genaktivität**

Thomas Nickl, Dezember 2022, überarbeitet im März 2024

|  |
| --- |
| Bitte lesen Sie meine allgemeinen Anmerkungen zur Jahrgangsstufe 12 [[docx](https://www.bio-nickl.de/wordpress/wp-content/uploads/2024/04/DM_LP_12_Allgemein_N2.docx)] [[pdf](https://www.bio-nickl.de/wordpress/wp-content/uploads/2024/04/DM_LP_12_Allgemein_N2.pdf)] zu den Aspekten:  Situation in der 12. Jahrgangsstufe Biologie, Kompetenzen, Berufsbilder und Medien. |

[Allgemeine Vorbemerkungen zum Lernbereich 2.2](#GenReg21)

[Zeitplan](#GenReg02)

**I Genetik und Gentechnik**

[2 Regulation der Genaktivität](#GenReg03)

[2.1 Regulation der Genaktivität bei Eukaryoten](#GenReg04)

[2.1.1 Problemstellung](#GenReg05)

[2.1.2 Funktionsbereiche der DNA](#GenReg06)

[2.1.3 Transkriptionsfaktoren (TF)](#GenReg24)

[2.1.4 Regulierende DNA-Abschnitte (Enhancer, Silencer)](#GenReg08)

[2.2 Epigenetik](#GenReg22)

[2.2.1 Begriff: Epigenetik](#GenReg10)

[2.2.2 DNA-Methylierung](#GenReg11)

[2.2.3 Inaktivierung des X-Chromosoms](#GenReg12)

[*2.2.4 RNA-Interferenz*](#GenReg13) *(nur eA)*

[*2.2.5 Histonmodifikation*](#GenReg14) *(nur eA)*

[2.3 Stammzellen](#GenReg23)

[2.3.1 Begriffsklärung](#GenReg16)

[2.3.2 Embryonale Stammzellen](#GenReg25)

[2.3.3 Adulte Stammzellen](#GenReg17)

[2.3.4 Induzierte pluripotente Stammzellen (iPS)](#GenReg26)

[2.3.5 Stammzellen in der Forschung](#GenReg18)

[2.3.6 Adulte Stammzellen in der Medizin](#GenReg19)

[2.3.7 Ethische Diskussion](#GenReg20)

**Allgemeine Vorbemerkungen zum Lernbereich 2.2**

***Betrachtungs-Ebenen****: Die Abschnitte 2.1 und 2.2 in meinem Didaktikskript betreffen die sub­mikro­skopische Ebene (Teil­chenebene), der Abschnitt 2.3 die mikroskopische Ebene. Das sollte deutlich gemacht wer­den, z. B. indem die Schüler diese Einordnung vornehmen (ggf. Ikons zur Visualisierung).*

**Arbeitsblatt** mit den Ikons der drei Betrachtungsebenen [[docx](https://www.bio-nickl.de/wordpress/wp-content/uploads/2023/10/MolGenLP01_Ebenen.docx)] [[pdf](https://www.bio-nickl.de/wordpress/wp-content/uploads/2023/10/MolGenLP01_Ebenen.pdf)]

**Ikons** der drei Betrachtungsebenen: makroskopisch [[jpg](https://www.bio-nickl.de/wordpress/wp-content/uploads/2020/02/Ikon-makroskopisch.png)]; mikroskopisch [[jpg](https://www.bio-nickl.de/wordpress/wp-content/uploads/2020/02/Ikon-mikroskopisch.png)]; submikroskopisch [[jpg](https://www.bio-nickl.de/wordpress/wp-content/uploads/2020/02/Ikon-submikroskopisch.png)]

*Die Lerninhalte zur Regulation der Genaktivität und zur Epigenetik sind neu im Lehrplan und nur den jüngeren Lehrkräften aus dem Studium bekannt. Ich habe versucht, mich anhand ver­schiedener seriöser Quellen einzuarbeiten, eine adäquate Auswahl an Fachbegriffen und Vor­gängen zu treffen und die Lerninhalte zu strukturieren.*

***Das Operon-Modell nach Jacob und Monod, das im Lehrplan des G8 verlangt wurde, entfällt beim LehrplanPLUS.***

*Wie bei allen Lernbereichen der Molukulargenetik besteht auch hier die Gefahr der Überfrach­tung mit zu vielen Fachbegriffen und zu vielen Details. Nicht das Faktenwissen der Schüler ist entscheidend, sondern was sie mit ihrem Fachwissen anfangen können. Biologie soll nicht „Lernfach“ sein, sondern „Verstehfach“! An manchen Stellen habe ich versucht, die wesent­lichen Lerninhalte eines Teilabschnitts in einem Textkasten zusammenzufassen.*

vgl. **Unterricht Biologie kompakt 414** (April 2016): Genregulation bei Eukaryoten

**Zeitplan**

Der LehrplanPLUS sieht für den Lernbereich 2.2 „Regulation der Genaktivität“ im grund­legenden Anforderungsniveau (gA) ca. 6 und im erweiterten Anforde­rungsniveau (eA) ca. 8 Unterrichtsstunden vor (alle Lehrplan-Formulierungen für das gA fin­den sich auch beim eA). Das bedeutet nicht unbedingt, dass in diesem Lernbereich für die dem eA vorbehaltenen Aspekte zwei Unterrichtsstunden anzusetzen wären, sondern dass beim eA insgesamt etwas mehr Zeit für Kompetenztraining bzw. schülerzentrierte Unterrichtsformen bleibt.

Die folgende Tabelle zeigt einen Vorschlag für einen Zeitplan des Lernbereichs 2.2, getrennt nach gA und eA:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Nummer** | **Abschnitte** | **Stunden**  **gA** | **Stunden**  **eA** |
| 2.1 | Regulation der Genaktivität bei Eukaryoten | 2 | 2 |
| 2.2 | Epigenetik \* | 2 | 4 |
| 2.3 | Stammzellen | 2 | 2 |
|  | **Summe** | **6** | **8** |

*\*) Einige Teile in diesem Abschnitt betreffen nur das eA.*

**2 Regulation der Genaktivität**

**2.1 Regulation der Genaktivität bei Eukaryoten**(ca. 2 Stunden)

|  |  |
| --- | --- |
| **Inhalte zu den Kompetenzen** | **Kompetenzerwartungen: Die Sch. ...** |
| Regulation der Genaktivität bei Eukaryoten (Transkriptionsfaktoren, Enhancer, Silencer) | beschreiben mögliche Mechanismen zur Regulation der Genaktivität, um zu erklären, warum trotz gleicher genetischer Ausstattung von Zellen diese unter­schiedliche Eigenschaften aufweisen können und so eine flexible Anpas­sung an Umweltbedingungen sowie eine Entwicklung und Spezialisierung in lebendigen Systemen möglich ist. |
| ***Vorwissen:***  **Jgst. 9 Biologie**, Lernbereich 3.2: Organisation und Vervielfältigung genetischer Information (Autosomen, Gonosomen, homologe Chromosomen)  ***Jgst. 12 Biologie****, Lernbereich 3.1: Proteinbiosynthese* | |

*Die Schüler sollen in diesem Abschnitt zwei unterschiedliche Regulatoren für die Transkription kennenlernen: regulierende Proteine (= Transkriptionsfaktoren) und regulierende DNA-Ab­schnit­te. Dazu gibt es z. B. bei wikipedia oder dem Spektrum Lexikon der Biologie ziemlich de­tail­lierte Darstellungen, die zu ausführlich sind, um als Quellen für Schüler geeignet zu sein. Ich habe versucht, obligate Lerninhalte herauszustellen, ergänzt von fakultativen Lerninhalten (v. a. in besonders interessierten Kursen bzw. zur* ***Begabtenförderung****).*

*Auf folgende Fachbegriffe (und deren Zusammenhänge) würde ich im Schulunterricht ver­zichten:*

* Initiations-, Elongations-, Terminations-Phase bei der Transkription *(Ich würde dafür deutsche Begriffe verwenden: Start, Kettenverlängerung, Abbruch; allerdings werden die Fremdwörter im Buchner-Buch verwendet.)*
* cis- und trans-Faktoren (bzw. -Elemente) bei der Regulierung der Transkription
* Bezeichnungen spezieller Moleküle (wird an den entsprechenden Stellen erwähnt)
* Das Operon-Modell wird im LehrplanPLUS nicht erwähnt und stellt damit keinen Lerninhalt dar.

*In manchen Darstellungen ist der Abbau von mRNA bzw. Proteinen als Regulations-Mechanis­mus berücksichtigt. Dieser Aspekt ist im LehrplanPLUS nicht vorgesehen, kann also auch weg­gelassen werden.*

**(Erklärvideo „Genregulation“** (4:45)

<https://studyflix.de/biologie/genregulation-2647>

Für den Unterricht nicht geeignet, weil dieses Video das Operon-Modell darstellt, das im LehrplanPLUS nicht vorgesehen ist.)

**(Erklärvideo „Genexpression“** (4:42)

<https://studyflix.de/biologie/genexpression-2646>

Einsatz: Für den Unterricht kaum geeignet, wohl aber zum Selbstlernen für die Schüler, z. B. zur Wieder­holung vor einer Klausur.

Inhalt: Übersicht über alle wesentlichen Details der Proteinbiosynthese bei Eukaryoten sowie über die Genregulation. Unterschiede zwischen Eu- und Prokaryoten.)

**Erklärvideo**: **„Genregulation bei Eukaryoten“** von simple biology (5:41)

<https://www.youtube.com/watch?v=BYnuLtoxRbM>

Einsatz: mit den unten genannten Einschränkungen für Unterricht und Selbstlernen bedingt geeignet

Inhalt: Einstieg über verschiedene Zelltypen

prä-transkriptionale Regulation: Methylierung von Cytosin (missverstehbar visualisiert, da die Methylgrup­pe an der Stelle der Wasserstoff-Brücken aufscheint und somit suggeriert, dass die Basenpaarung gestört wäre); Methylierung von Histonen führt zur Zusammenballung, Acetylierung und Phosphorylierung zum Lockern der DNA; ab 2:30 Zusammenfassung

ab 3:10 transkriptionale Regulation mit Enhancern und Silencern, an welche Transkriptionsfaktoren andocken, Kontakt zur Polymerase durch Schleifenbildung; gut visualisiert (nur die Enhancer und Silencer sitzen in der Visualisierung viel zu nah an der RNA-Polymerase)

ab 4:37 post-transkriptionale Regulation durch alternatives Spleißen und RNA-Interferenz (nicht gezeigt, nur darauf verwiesen)

ab 4:50 Zusammenfassung in übersichtlicher Darstellung

In **Unterricht Biologie kompakt 414** (April 2016) findet sich auf Seite 18 eine schöne Abbildung zu Transkriptionsfaktoren und regulierenden DNA-Abschnitten.

In Biosphäre 12, Cornelsen-Verlag, ist auf Seite 44 eine Übersicht der Regulations-Mechanismen zu finden (beachten, was davon vom LehrplanPLUS verlangt wird!).

**2.1.1 Problemstellung und Regulationsebenen**

Impuls: Milch enthält besondere Proteine, darunter Lactalbumin. Haben auch Männer das Gen für Lactalbumin? Wenn ja, warum produzieren Männer dieses Protein nicht? Und Frauen auch nur dann, wenn sie stillen?

Alle Zellen eines Organismus besitzen die gleiche genetische Ausstattung. Aber in jedem Zell­typ wird eine andere Auswahl an Proteinen hergestellt.

Beispiele:

* Enzyme zur Herstellung von Milcheiweiß (z. B. das Protein Lactalbumin) werden nur in bestimmten Zellen der Brustdrüsen gebildet (und zwar nur beim weiblichen Ge­schlecht und nur zur Stillzeit).
* Das Protein Keratin (Hornstoff) wird nur von Hautzellen gebildet und stellt die Haupt­substanz von Fingernägeln, Haaren, Federn, Krallen usw. dar.
* Das Protein Hämoglobin wird nur in roten Blutzellen gebildet, nicht aber in weißen Blutzellen, obwohl beide Zelltypen aus den gleichen Vorläuferzellen im Knochenmark entstehen. *(Dieses Beispiel ist insofern etwas problematisch, als reife Rote Blutzellen keinen Zellkern besitzen und im Endzustand folglich keine Proteinsynthese mehr durchführen. Die Bildung von Hämoglobin findet in den frühen Stadien der Zelldifferen­zie­rung statt.)*

Fragestellung: Wie wird sichergestellt, dass nur diejenigen Strukturgene transkribiert werden, deren Genprodukte in der jeweiligen Zelle benötigt werden?

**Ebenen der Regulation:**

* Ebene der DNA: dicht gewickelte Bereiche (stark kondensierte Bereiche) werden nicht tran­skri­biert
* Ebene der Transkription: Transkriptionsfaktoren, fördernde bzw. hemmende Einflüsse
* Ebene der mRNA: Prozessierung, Abbau (bei Bakterien durchschnittlich nach 1 min)
* Ebene des Genprodukts (meist Protein): nachträgliche Modifizierung, Abbau

*Wichtiger Hinweis: Die Steuerung der Transkription ist komplex und vielfältig und muss des­halb für den Unterricht didaktisch reduziert werden. Insbesondere darf nicht alles zum Lern­stoff gemacht werden, was in den Lernmaterialien auftaucht. Die Schüler sollen lernen, mit neuen Sachverhalten anhand von Materialien umzugehen, sie müssen aber nicht jedes Detail daraus auswendig repro­du­zieren können. Unbedingt kommunizieren, welche Aspekte Lern­inhal­te darstellen und welche nicht!*

**2.1.2 Funktionsbereiche der DNA**

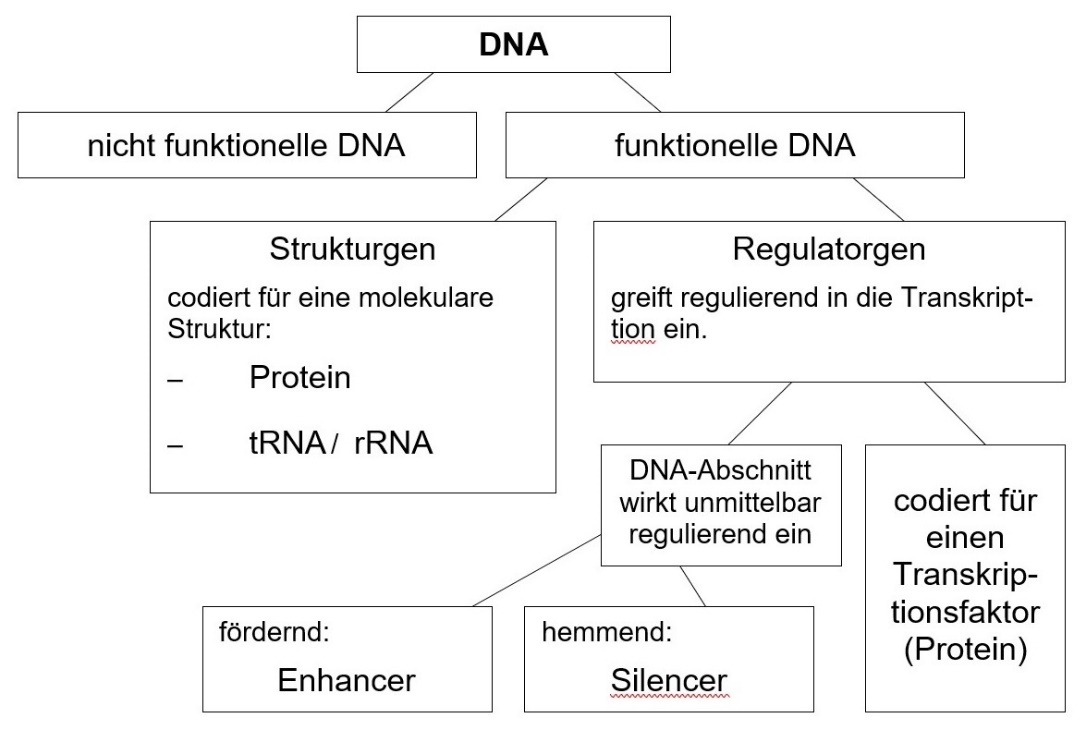
*Es ist sinnvoll, zunächst die unterschiedlichen Funktionen von DNA-Abschnitten zu betrachten und diese zu benennen, bevor die Regulation im Detail thematisiert wird. Die Zahlenangaben dienen lediglich der Veranschaulichung und stellen keine Lerninhalte dar.*

Die DNA im Zellkern einer einzigen menschlichen Zelle besitzt eine Gesamtlänge von etwa 2 Metern. Das entspricht etwa 3 Milliarden Basenpaaren. Der weitaus größte Teil davon wird als nicht funktionell betrachtet, das bedeutet, dass Änderungen in der Basensequenz solcher Berei­che keine schäd­lichen Folgen zeigen. Nur 8,2 Prozent der DNA gelten als funktionell.

Lediglich etwa 1 Prozent der menschlichen DNA besteht aus Strukturgenen, die für Proteine oder RNAs codieren. Die übrige funktionelle DNA dient der Regulation der Protein- und RNA-Synthese. Regulatorgene codieren für regulierende Proteine *(regulierende RNA-Typen werden im Schulunterricht nicht erwähnt!)* bzw. sie werden direkt als DNA-Abschnitt aktiv (Enhancer und Silencer). Die Literaturangaben zur An­zahl der menschlichen Strukturgene schwanken zwischen 20.000 und 25.000.

Zur Erarbeitung und Sicherung kann ein Arbeitsblatt dienen:

**Arbeitsblatt** *Funktionsbereiche der DNA* [[docx](https://www.bio-nickl.de/wordpress/wp-content/uploads/2023/11/MolGenLP16_DNA_Funktion.docx)] [[pdf](https://www.bio-nickl.de/wordpress/wp-content/uploads/2023/11/MolGenLP16_DNA_Funktion.pdf)]



Schema aus dem Arbeitsblatt

Übersicht:

Transkriptionsfaktor (Protein)

mRNA / tRNA / rRNA

Strukturgen

Tran-skription

Enhancer / Silencer (DNA-Abschnitt)

**2.1.3 Transkriptionsfaktoren (TF)**

**Erklärvideo** **„Transkriptionsfaktoren“** (4:32)

<https://studyflix.de/biologie/transkriptionsfaktoren-2563>

Behandelt die meisten der hier verwendeten Begriffe, aber auch weitere, die hier keinen Lern­inhalt dar­stellen. Auch die in den Abschnitten 2.1.3 und 2.1.4 thematisierten Zusam­men­hänge werden gezeigt. (Im Video wird unterschieden zwischen allgemeinen und speziellen Transkriptionsfaktoren, wo­bei letzteren auch die regulierenden DNA-Abschnitte (Enhancer und Silencer) zugeordnet werden, was der von mir entworfenen Systematik widerspricht. In anderen Quellen wird der Begriff Transkriptionsfaktoren aber aus­schließlich den Proteinen zuge­ordnet, nicht den DNA-Abschnitten.)

Wiederholung von Fachbegriffen:

das Chromatid, das Chromosom (1- bzw. 2-chromatidig), das Histon

vgl. Aufgabe 3, Arbeitsblatt *Funktionsbereiche der DNA* [[docx](https://www.bio-nickl.de/wordpress/wp-content/uploads/2023/11/MolGenLP16_DNA_Funktion.docx)] [[pdf](https://www.bio-nickl.de/wordpress/wp-content/uploads/2023/11/MolGenLP16_DNA_Funktion.pdf)]

Ein Transkriptionsfaktor (TF) ist ein Protein, das regulierend in die Transkription eingreift. Das Struk­­turgen für einen Transkriptionsfaktor kann, muss aber nicht auf dem selben Chromosom liegen wie das Struktur­gen, für dessen Regulierung es zuständig ist. *(Nicht in den Schulunter­richt gehören die Bezeichnungen cis bzw. trans für die Bezeichnung der Lokalisierung dieser Strukturgene.)*

Information für die Lehrkraft (geht über die Lerninhalte hinaus):

Die RNA-Polymerase ist nicht fähig, eigenständig an der Promotor-Region anzudocken. Sie benötigt dafür eine Art „Landeplattform“ aus **allgemeinen Transkriptionsfaktoren**, die auf dem Promotor sitzt. Einer dieser Transkriptionsfaktoren ist das sogenannte TATA-Binde­pro­tein, das an die Nukleotid-Sequenz TATA innerhalb des Promotors bindet (diese 1978 entdeck­te Startsequenz wird als „TATA-Box“ bezeichnet). Daran binden weitere Transkrip­tions­faktor-Moleküle (mit den Bezeichnungen A, B, E, F und H), bis die „Plattform“ aus etwa einem guten halben Dutzend Transkriptionsfaktor-Molekülen fertig gestellt ist. Daran bindet die RNA-Poly­merase (sie selbst wird nicht als Transkriptionsfaktor bezeichnet). Alles zusam­men bildet den **Transkriptions-Komplex**. Er kann nun grundsätzlich mit der Transkription beginnen, aber nur mit relativ geringer Effektivität, wenn nicht noch weitere Faktoren dazu kommen: die Enhancer und Silencer (regulierende DNA-Abschnitte, 2.1.4) die über **spezifische Transkrip­tions­faktoren** an den Transkriptions-Komplex andocken und dessen Tätigkeit stark beein­flussen.

*Zu viele Einzelheiten verwässern das mentale Bild bei den Kursteilnehmern. Es muss deshalb sorgfältig überlegt werden, welche Aspekte im Unterricht vorgestellt werden sollen und was davon dann zum Lerninhalt erhoben wird. Dazu folgende Vorschläge:*

Minimalversion:

*(in Abstimmung mit dem Multiplikatoren-Team auf der Tagung „Fachlichkeit und Führung“ 17.-19.1.2024 in Dillingen:)*

Die RNA-Polymerase kann alleine nicht an die Promotor-Region andocken. Dafür benötigt sie eine „Landeplattform“, die aus mehreren speziellen Proteinen aufgebaut ist, die man als Transkriptionsfaktoren (TF) bezeichnet. Transkriptionsfaktoren und RNA-Polymerase bil­den zusammen den Transkriptionskomplex.

Fakultatives Zusatzwissen (zur freien Auswahl, je nach Wissbegierigkeit des Kurses bzw. zur **Begabtenförderung**):

* Bestimmte Transkriptionsfaktoren sorgen dafür, dass der DNA-Histon-Komplex aufge­lockert wird, so dass die Komponenten des Transkriptions-Komplexes leichter an den Promotor an­docken kön­nen. *(Me­cha­nismen wie z. B. die Acetylierung von Aminosäure­resten von Histonen würden an dieser Stelle zu weit führen; sie werden später behan­delt.)*
* Die Transkriptionsfaktoren, welche die „Landeplattform“ für die RNA-Polyme­rase bilden, heißen allgemeine Transkriptionsfaktoren.

*Die nachfolgend aufgeführten spezifischen Transkriptionsfaktoren können auch erst unter 2.1.4 genannt werden, stellen aber keine obligaten Lerninhalte dar.*

* Spezifische Transkriptionsfaktoren dienen der Beschleunigung oder Hemmung der Transkrip­tion, indem sie die Verbindung zwischen regulierenden DNA-Abschnitten (s. u.) und der RNA-Polymerase herstellen.
* Spezifische Transkriptionsfaktoren konkret: Aktivatorproteine docken an je einen Enhan­­cer (s. u.) an, Repressorproteine docken an je einen Silencer (s. u.) an; sie sind jeweils über weitere Proteine (Coaktivatoren) mit der RNA-Polymerase verbunden.
* Aktivierung von spezifischen Transkriptionsfaktoren: Rezeptoren der Zellen empfan­gen spezifische Signale, die über eine lange Signalübermittlungskette weitergegeben werden. Am Ende steht ein Enzym (eine Proteinkinase), das die Übertragung eines Phosphat­restes auf den Transkriptionsfaktor katalysiert und ihn dadurch aktiviert.

**2.1.4 Regulierende DNA-Abschnitte**

Information für die Lehrkraft (geht über die Lerninhalte hinaus):

Regulierende DNA-Abschnitte (Enhancer und Silencer) sind typisch für Eukaryoten (nicht bei Prokaryoten, gelegentlich aber bei Viren). Sie sind erfahrungsgemäß immer Bestandteile des selben DNA-Moleküls, das auch das zu transkribierende Strukturgen enthält. Silencer liegen meist nahe am Promotor, während Enhancer (etwa 800 Basenpaare lang) oft weit von diesem entfernt liegen (oft Tausende, bisweilen bis zu einer Million Basenpaare). Die räumliche Nähe des Enhancers zur Promotor-Region wird erreicht, indem die DNA eine Schleifen-Struktur (auch: Schlaufe; *loop*) ausbildet (vgl. Abbildung auf Seite 9 oben).

Ein **Enhancer** ist ein regulierender DNA-Abschnitt, der die Transkription fördert. Ein **Silencer** ist ein regulierender DNA-Abschnitt, der die Transkription hemmt, also die entgegengesetzte Wirkung eines Enhancers hat. Die Verbindung zwischen Enhancer bzw. Silencer und dem Transkriptions-Komplex erfolgt über sog. **spezifische Transkriptionsfaktoren**: An die DNA-Se­quenz eines Enhancers bindet ein **Aktivatorprotein**, an die eines Silencers bindet ein **Re­pres­sorprotein**. Am Transkriptions-Komplex sitzen **Coaktivatoren** genannte Proteine, die nach dem Schlüssel-Schloss-Prinzip an Aktivator- bzw. Repressorproteine binden können, wo­durch sich die Struktur des Transkriptions-Komplex so verändert, dass die Transkription be­schleu­nigt bzw. gehemmt wird. Ein Transkriptions-Komplex kann zu mehreren spezifischen Transkripti­onsfaktoren Konktakt aufnehmen; dadurch kann die Transkription in unterschied­lichen Ge­schwindigkeiten ablaufen (vgl. Abb. B3, Seite 59, im Buchner-Buch).

Minimalversion:

*(in Abstimmung mit dem Multiplikatoren-Team auf der Tagung „Fachlichkeit und Führung“ 17.-19.1.2024 in Dillingen:)*

|  |
| --- |
| Enhancer und Silencer sind regulierende DNA-Abschnitte, die die Transkription fördern bzw. hemmen, wenn sie über bestimmte Transkriptionsfaktoren (Proteine) an den Transkrip­tions-Komplex gebunden werden. Durch Schleifen-Bildung der DNA gelangen sie in die unmittelbare Nähe des Transkriptions-Komplexes. |

Ausformuliert:

Bei vielen Strukturgenen kann der Transkriptions-Komplex aus „Landeplattform“ und RNA-Polymerase zwar an der Promotor-Region andocken, aber die Transkription verläuft trotzdem nicht oder nur in sehr geringem Ausmaß. Die Transkriptions-Geschwindigkeit wird deutlich gesteigert, wenn ein Enhancer (fördernder DNA-Abschnitt) aufgrund einer Schleifen-Bildung in unmittelbare Nähe des Transkriptions-Komplexes zu liegen kommt und über vermittelnde Proteine an ihn gebunden wird. Docken weitere Enhancer an, steigt die Transkriptions-Ge­schwin­digkeit entsprechend.

Umgekehrt wird die Transkription umso stärker gehemmt, je mehr Silencer (hemmender DNA-Abschnitt) an den Transkriptions-Prozess gebunden sind.

Fakultatives Zusatzwissen (zur freien Auswahl, je nach Wissbegierigkeit des Kurses bzw. zur **Begabtenförderung**):

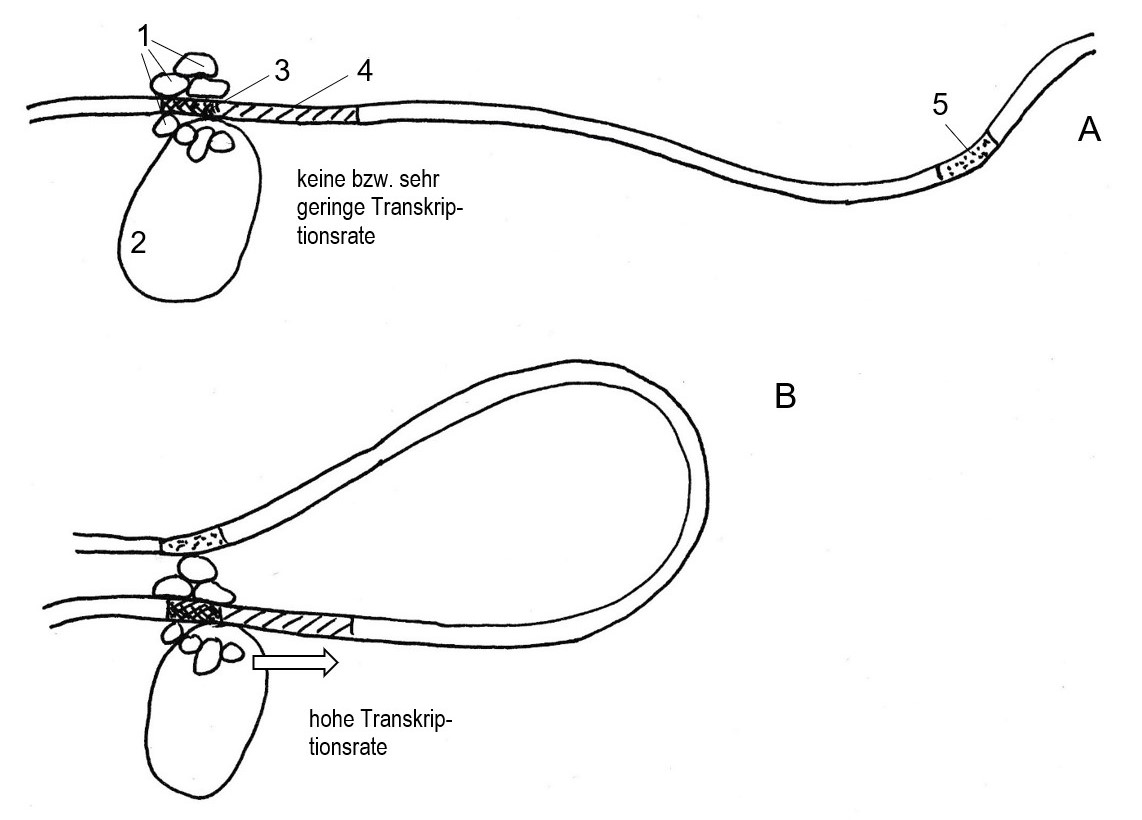
* Die Proteine, über welche Enhancer bzw. Silencer an den Transkriptions-Komplex gebunden sind, nennt man spezifische Transkriptionsfaktoren.
* ggf. Schlüssel-Schloss-Prinzip bei der Bindung dieser Proteine
* *Auf die Begriffe Aktivator- bzw. Repressorprotein sowie Coaktivator würde ich in diesem Zusammenhang verzichten.*

Rückbezug auf die Einstiegsfragestellung:

Wenn ein Strukturgen (z. B. das für Lactalbumin in bestimmten Zellen der Milchdrüse) tran­skri­biert werden soll, dann müssen alle dafür notwendigen Transkriptionsfaktoren in der Zelle vorhanden sein. Fehlt z. B. der Transkriptionsfaktor, der für die Bindung eines wesentlichen Enhancers zuständig ist, findet die Tran­skrip­tion und damit die Synthese von Lactalbumin nicht statt. Dass alle anderen Zelltypen kein Lactalbumin produzieren, liegt daran, dass ihnen (mindestens) ein bestimmter Transkriptionsfaktor fehlt (das Gen dafür haben aber alle Zellen!).

„Mehr als 90 Prozent der bisher identifizierten Risikovarianten [für Krebs und Herzleiden] liegen in nicht proteincodierenden Teilen des Genoms – häufig in Enhancer-Regionen.“

Quelle: Ran Elkon (Tel Aviv), Reuven Agami (Netherlands Cancer Institute): Backup schützt vor schädlichen Mutationen. In Spektrum der Wissenschaft 1.2023, S. 29



1: Transkriptionsfaktoren

2: RNA-Polymerase

3: Promotor

4: Strukturgen

5: Enhancer

**Arbeitsblatt** *Genregulation* [[docx](https://www.bio-nickl.de/wordpress/wp-content/uploads/2024/03/MolGenLP17N_Regulation.docx)] [[pdf](https://www.bio-nickl.de/wordpress/wp-content/uploads/2024/03/MolGenLP17N_Regulation.pdf)]

Anhand dieser Abbildungen können die Schüler die Funktion des Enhancers selbst erarbeiten und formulieren.

**Abbildung** [[jpg](https://www.bio-nickl.de/wordpress/wp-content/uploads/2024/03/MolGenLP17aN_Regulation.jpg)]

*Hinweis: Die Darstellung ist sehr stark vereinfacht, indem lediglich ein einziger Enhancer berück­sichtigt wird. Bei vielen Genen hängt die Regulation aber von mehreren Enhancern ab (z. B. gibt es beim MYC-Gen, das bei der Zellteilung eine wichtige Rolle spielt, sieben Enhan­cer, die sich auf zwei Cluster verteilen. Vermutlich wird zu einem bestimmten Zeitpunkt nur ein einziger Enhancer gebunden, aber im raschen Wechsel zwischen Enhancern des einen und des anderen Clusters.) Zudem fehlen auf der Darstellung die Silencer.*

Quelle: Ran Elkon (Tel Aviv), Reuven Agami (Netherlands Cancer Institute): Backup schützt vor schädlichen Mutationen. In Spektrum der Wissenschaft 1.2023, S. 28f

*Diese stark vereinfachte Darstellung auf meinem Arbeitsblatt eignet sich gut zum Einstieg. Danach sollten die Schüler sich mit Darstellungen auseinander setzen, die mehr als einen Enhancer sowie Silencer enthalten. Im Buchner-Buch finden sich auf Seite 59 Darstel­lungen, die erheblich mehr regulierende Ele­mente enthalten als meine Abbildung, die aber dennoch sehr übersichtlich gestaltet sind. Darauf ist zu sehen, dass an die Enhancer-Region ein Proteinmolekül (Akti­vator) andockt, das eine Erkennungsstelle für ein weiteres Protein (Coaktivator) auf dem Transkriptionskomplex hat; ent­­­­sprechend vermittelt ein anderes Protein (Repressor) die Ver­bin­dung zwischen Silencer-Region und einem anderen Coaktivator. Das ist zwar anschau­lich dargestellt und kann deshalb von den Kursteilnehmern verbalisiert werden, muss aber in dieser Detailliertheit nicht zum Lerninhalt erhoben werden. Die TATA-Box würde ich aus dem Unterricht heraus halten.*

*Nicht codierende RNA kann man mit ncRNA abkürzen, aber ich warne vor der Verwendung all­zu vieler Abkürzungen, weil dann am Ende alles nur noch durcheinander gebracht wird. Ich würde darauf verzichten.*

*Folgende Vertiefungen eignen sich ggf. zur Begabtenförderung:*

Vertiefung 1: Menschwerdung durch Verzicht auf bestimmte Enhancer

Im Lauf der Entwicklung zum Menschen gingen einige Enhancer verloren (in deren Genbereich fand jeweils eine Deletion statt, also eine Entfernung von Nukleotiden). Einer dieser Enhancer aktiviert bei anderen Menschenaffen ein Gen, dessen Produkt im Laufe der Gehirnentwicklung dafür sorgt, dass zuvor gebildete überschüssige Neuronen wieder vernichtet werden. Es wird ver­mutet, dass das Fehlen dieses Enhancers für die ungewöhnliche Größe des menschlichen Gehirn verantwortlich ist (Alex Pollen). Ein anderer Enhancer steuert bei anderen Menschen­affen ein Gen, dessen Produkt das Skelettwachstum begünstigt. Sein Fehlen könnte dafür verant­wortlich sein, dass die Zehen beim Menschen (v. a. die zweite bis fünfte) so kurz sind. [P. Reno: Per DNA-Verlust zum Menschen? In Spektrum der Wissenschaft, Heft 2.2018, Seite 30-35]

Vertiefung 2: neue Flossengestalt durch andere Faltungsstruktur der DNA

Eine **TAD** (topologisch assoziierte Domäne; *topologically associating domain*) ist eine Region der DNA, die mit sich selbst interagiert und dadurch bestimmte dreidimensionale Faltungen der DNA erzeugt. Diese 3D-Strukturen entscheiden darüber, ob Strukturgene transcribiert werden oder nicht. Fehlerhafte TAD-Faltung kann zu Krankheiten wie Darmkrebs führen. Die TAD-Mechanismen sind bislang noch nicht gut verstanden.

Man schätzt, dass etwa 40 Prozent der TAD-Regionen in allen Wirbeltieren konserviert sind, d. h. sie sind in mehreren 100 Millionen Jahren gleich geblieben, während sich die übrigen 60 Prozent im Lauf der Evolution verändert haben.

Rochen gehören zu den Knorpelfischen, die den Urfischen vor über 450 Millionen Jahren wohl am ähnlichsten sind. Auch Haie sind Knorpelfische mit kurzen, starren Brustflossen, während sich die Brustflossen der Rochen fast über die gesamte Körperlänge ausdehnen, sehr breit sind und wellenförmige Bewegungen durchführen. Ein Forscherteam des Max-Delbrück-Centers in Sevilla berichtete 2023 darüber, dass bei Rochen (den ursprünglichsten heute noch lebenden Wirbeltieren) die Packung der DNA (also TADs) von bestimmten Struktur- wie auch Regula­tor-Genen dafür verantwortlich ist, dass die Tiere keine üblichen Flossen (wie bei den Haien, ihren nächsten Verwandten) ausbilden, sondern flügelartige Lappen.

[nach F. Marlétaz et al.: The little skale genome and the evolutionary emergence of wing-like fins. In Nature 2023; berichtet im biuz newsletter]

**2.2 Epigenetik** (gA: ca. 2 Stunden, eA: ca. 4 Stunden)

|  |  |
| --- | --- |
| **Inhalte zu den Kompetenzen** | **Kompetenzerwartungen: Die Sch. ...** |
| Epigenetik: DNA-Methylierung, Inaktivierung des X‑Chromosoms,  RNA-Interferenz, Histonmodifikation \* | beschreiben mögliche Mechanismen zur Regulation der Genaktivität, um zu erklären, warum trotz gleicher genetischer Ausstattung von Zellen diese unter­schiedliche Eigenschaften aufweisen können und so eine flexible Anpas­sung an Umweltbedingungen sowie eine Entwicklung und Spezialisierung in lebendigen Systemen möglich ist. |
| ***Vorwissen:***  **Jgst. 9 Biologie**, Lernbereich 3.2: Organisation und Vervielfältigung genetischer Information (Autosomen, Gonosomen, homologe Chromosomen)  ***Jgst. 12 Biologie****, Lernbereich 3.1: Proteinbiosynthese* | |

*\*) nur eA*

**Erklärvideo** **„Methylierung“** (4:42)

<https://studyflix.de/biologie/methylierung-2554>

Besser geeignet als das Video „Epigenetik“, weil es deutlich mehr Lehrplanbezug hat.

Inhalt: DNA-Methylierung (an Cytosin); Histon-Methylierung\*; Inaktivierung des zweiten X-Chro­mo­soms (ab 3:10); Methylierung von Fremd-DNA\*\* und von fehlerhaften Stellen der Eigen-DNA bei Prokaryoten.

\* Histon-Methylierung ist kein Thema im gA-Kurs, im eA-Kurs allenfalls fakultativer Lerninhalt im Abschnitt 2.2.5.

\*\* Methylierung von Fremd-DNA kann im Kurs mit erweitertem Anforderungsniveau betrachtet werden, ist aber fakultativ. Prokaryoten sind im LehrplanPLUS an dieser Stelle nicht berücksichtigt.

**(Erklärvideo** **„Epigenetik“** (4:57)

<https://studyflix.de/biologie/epigenetik-2666>

Kann ganz anregend für den Einstieg sein, enthält aber mehr Information, als für diesen Ab­schnitt nötig ist. Zu enge Definition: Epigenetik als chemische Veränderung (Methylierung, Acetylie­rung), die zum Stumm­schalten von Genen führt. Einflussfaktoren auf das Epi­genom (z. B. Gelée royale bei Honig­bienen; Trauma­ta). Unterscheidung von epige­ne­tischer Vererbung und epigenetischer Prägung. Ggf. überflüssige Begrif­fe: Chroma­tin, Euchromatin, Heterochromatin)

**Arbeitsblatt** *Epigenetik* [[docx](https://www.bio-nickl.de/wordpress/wp-content/uploads/2023/11/MolGenLP18_Epigenetik.docx)] [[pdf](https://www.bio-nickl.de/wordpress/wp-content/uploads/2023/11/MolGenLP18_Epigenetik.pdf)]

*Hinweis: Es ist bei diesem Abschnitt besonders darauf zu achten, dass die Schüler einfache und dadurch klare und nachhaltige Vorstellungen wesentlicher Aspekte der Epigenetik bekommen anstatt in einer Fülle von Einzelfakten und Fachbegriffen zu ertrinken. Verzichten Sie also auf Aus­nah­men, Ausblicke, Spezialformen, Verhältnisse bei Nicht-Eukaryoten. Im Fokus der Be­trach­tungen sollten Säugetiere stehen, v  a. der Mensch. Andere Organismengruppen sollten – wenn überhaupt – nur ausnahmsweise berück­sichtigt werden, eigentlich nur, wenn der Vergleich der besseren Verständlichkeit dient.*

**2.2.1 Begriff: Epigenetik**

*Der Begriff Epigenetik ist noch nicht einheitlich definiert. Die Schüler sind kaum in der Lage, aus unterschiedlichen Quellen eine Begriffsdefinition zu erarbeiten. Die hier wiedergegebene Erklärung des Begriffs Epigenetik erfolgt nach Angaben des Epigenetikers Prof. Dr. Stefan H. Stricker, LMU / Helmholtz Zentrum München.*

*epi*, altgriechisch: dazu, außerdem

Das äußere Erscheinungsbild (der Phänotyp) eines Lebewesens wird in großem Ausmaß von dessen genetischer Information bestimmt, die durch die Basensequenz der DNA festgelegt ist. Zusätzlich wirken weitere Faktoren auf die Gestalt­bil­dung ein, die durch epigenetische Mecha­­­­­nismen wirksam werden.

Der Begriff Epigenetik bezieht sich nur auf Eukaryoten.

Information für die Lehrkraft:

Das Chromatin (im Wesentlichen der DNA-Histon-Komplex, an dem aber auch weitere Prote­ine und RNA-Moleküle beteiligt sind) weist unterschiedliche Formen epigenetischer Modifika­tionen auf:

* DNA-Modifikationen (6 Typen, von denen die DNA-Methylierung die bekannteste ist), wobei die Basensequenz unverändert bleibt
* Modifikationen an Histonen (mindestens 12 Typen)
* Form und Grad der Aufwicklung der DNA auf die Histone (u. a. Eu- und Hetero­chromatin)
* Faltung der DNA in größere Schleifen (*loops*) mit unterschiedlichen Kontaktpunkten

*Den letzten Punkt würde ich aus dem Unterricht herauslassen. Wichtig sind die ersten beiden Punkte, denn die stehen auch im LehrplanPLUS. Punkt 3 ergibt sich aus den beiden ersten Punkten.*

*Frühere Ansätze, mit denen abgeschätzt wurde, wieviel Prozent eines Phänotyps genetisch und wieviel durch äußere Einflüsse bedingt ist, halte ich für wenig aussagekräftig, zumal sie die Mechanismen der Interaktion zwischen genetischen und epigenetischen Faktoren nicht berück­sichtigen.*

*Als Einstieg in das Thema Epigenetik sollte das Phänomen anhand von Beispielen vorgestellt werden, bei denen bei identischem Genom unterschiedliche Phänotypen gebildet werden:*

Beispiele epigenetischer Auswirkungen:

* Bei der Honigbiene sind die Männchen (Drohnen) haploid, die Weibchen diploid. Aus einer diploiden Eizelle entsteht meistens eine Arbeiterin (kleiner, unfruchtbar). Wenn eine diploide Larve aber mit *Gelée royale* gefüttert wird (einem besonderen Futtersaft, der von Arbeiterinnen erzeugt wird), dann entwickelt sie sich auch bei identischer Erbin­for­mation zur Königin (größer, fruchtbar).
* Eineiige Zwillinge besitzen identische Erbinformation und sehen sich deshalb sehr ähnlich. Dennoch unterscheiden sich ihre Phänotypen in Details. Dies liegt an epi­gene­tischen Faktoren. (Während eineiige Zwillinge im Alter von drei Jahren auch epigene­tisch noch sehr ähnlich sind, unterscheiden sie sich in späteren Lebensphasen in epi­genetischer Hinsicht umso stärker voneinander, je unterschiedlicher ihre Lebensum­stände waren.)
* Zelldifferenzierung: Alle Zellen eines Individuums besitzen identische Erbinformation. Dennoch entwickeln sich die verschiedenen Zelltypen sehr unterschiedlich: von der Stammzelle z. B. zur Nervenzelle, Muskelzelle, Drüsenzelle usw.

**Epigenetik**: Der biologische Fachbereich Epigenetik untersucht phänotypische Unter­schiede, denen keine Unterschiede der Basensequenz der DNA zugrunde liegen und die bei der Zellteilung an die Tochterzellen weiter gegeben werden. Bestimmte Modifikationen an der DNA bzw. an den Histonen wirken sich auf die Genexpression und damit auf die Zelldifferenzierung aus. Epigenetische Regulierung ist längerfristig wirksam.

Obwohl oft unklar ist, welcher molekulare Mechanismus den epigenetischen Unterschieden zugrunde liegt, sind schon einige epigenetische Modifikationen bekannt, die unter gewissen Voraussetzungen die Aktivität von Genen beeinflussen können. Diese sind Kandidaten für die Schnittstelle zwischen Umwelteinflüssen und Genregulation.

Epigenetische Faktoren können also bestimmen, ob ein Gen transkribiert bzw. ob dessen mRNA translatiert werden kann oder nicht, sie können aber auch alternatives Spleißen beein­flussen.

*Manche Autoren beziehen in die Definition der Epigenetik noch mit ein, dass epigenetische Faktoren in die nächste Generation vererbt werden. Diese Definition ist aber zu eng, da be­stimm­te epigenetische Faktoren wohl nicht an die Nachkommen vererbbar sind. Vielmehr sollte – außerhalb der Definition – ergänzt werden:*

In bestimmten Fällen können epigenetische Faktoren auf die nächste Generation vererbt wer­den.

*Andererseits lehne ich eine zu weite Definition von Epigenetik ab, die auch extrakaryotische Information einbezieht – wie das z. B. in der Definition im Spektrum Lexikon der Biologie steht. Denn dann müsste u. a. auch die DNA der Mitochondrien als epigenetischer Faktor gezählt wer­den.*

*Hinweis: Die Tatsache, dass epigenetische Faktoren vererbbar sein können, bedeutet nicht, dass Lamarck mit seiner Vererbung erworbener Eigenschaften recht und Darwin unrecht ge­habt hätte. Epigenetische Markierungen scheinen, wenn überhaupt, nur sehr wenige Generati­onen zu überdauern und sind damit als Evolutionsfaktor praktisch nicht relevant. (Das Thema Evolution folgt auf das Thema Genetik in der 12. Jahrgangsstufe.)*

**2.2.2 DNA-Methylierung**

*Die Darstellung zur DNA-Methylierung in Unterricht Biologie kompakt 414 (April 2016) „Genregulation bei Eukaryo­ten“ auf Seite 14-17 geht weit über die Anforderungen des Lehr­plan­PLUS hinaus!*

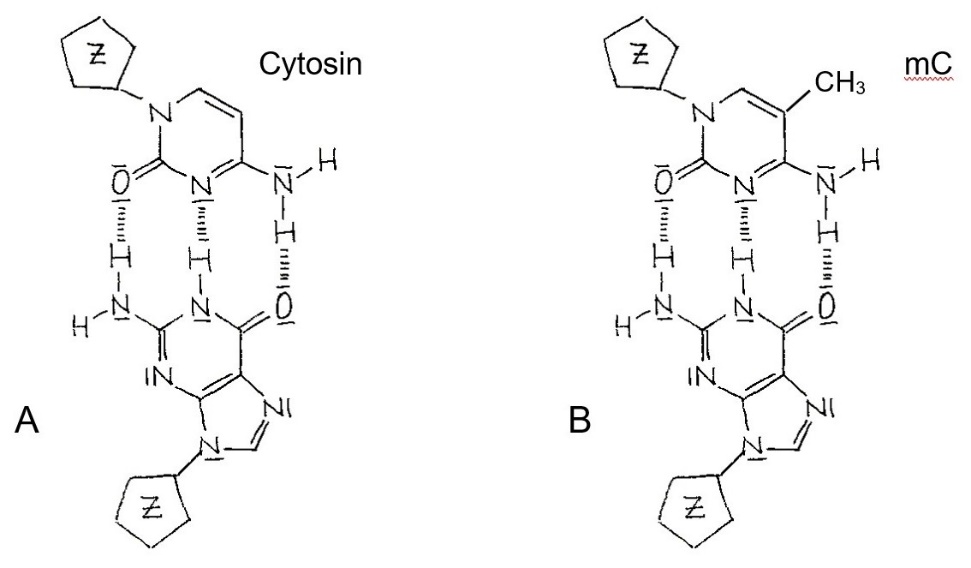
Auf der DNA können epigenetische Markierungen angebracht sein. Die wohl wichtigste Art der DNA-Markierung ist die sogenannte DNA-Methylierung. Dabei wird durch Katalyse des Enzyms DNA-Methyl-Transferase am 5. Kohlenstoffatom der Kernbase Cytosin ein Wasser­stoff-Atom durch eine Methylgruppe (–CH3) ausgetauscht. Das Produkt heißt 5-Methyl-Cytosin (Symbol: mC). Weil dadurch der Informationsgehalt der Kernbase nicht verändert wird (auch 5-Methyl-Cytosin paart mit Guanin), handelt es sich bei der Methy­lierung nicht um eine Mutation.

Die Methylierung kann durch das Enzym DNA-Demethylase rückgängig gemacht werden.

*Hinweis: Die Begriffe Transferase (Enzym, das eine chemische Gruppe überträgt) und De­methy­lase (Enzym, das eine Methylgruppe entfernt) sollten explizit angesprochen und gesichert werden. Grundsätze zur Nomenklatur von Enzymen sollen bereits bekannt sein (Suffix -ase; Substrat bzw. Wirkung als Namensbestandteil). Der LehrplanPLUS sieht allerdings die Nomen­klatur von Enzymen nicht vor.*

**Arbeitsblatt** *Epigenetik* [[docx](https://www.bio-nickl.de/wordpress/wp-content/uploads/2023/11/MolGenLP18_Epigenetik.docx)] [[pdf](https://www.bio-nickl.de/wordpress/wp-content/uploads/2023/11/MolGenLP18_Epigenetik.pdf)]

In Aufgabe 1 sollen die Schüler zunächst Vorwissen wiederholen und dann die chemischen Veränderungen bei der Methylierung von Cytosin beschreiben und beurteilen. *Die folgende Darstellung entspricht dem Arbeitsblatt; sie ist stöchiometrisch nicht vollständig (das braucht nicht ausgeglichen zu werden, aber es ist sinnvoll, wenn es angesprochen wird).*



DNA-Methyl-transferase

DNA-Demethylase

**Abbildung** (wie auf dem Arbeitsblatt ohne Pfeile und Enzymnamen) [[jpg](https://www.bio-nickl.de/wordpress/wp-content/uploads/2023/11/MolGenLP18a_CG-und-mCG-Paarung.jpg)]

*Hinweis: Dieses Beispiel sollte für den Unterricht genügen. Methylierungen an weiteren Kern­basen (bei niederen Eukaryoten an Adenin zu N6-Methyl-Adenin bzw. bei Prokaryoten) sollten unerwähnt bleiben, um das mentale Bild in den Schülerköpfen nicht zu gefährden.*

Fakultativ, v. a. für eA-Kurse bzw. zur **Begabtenförderung** auch in gA-Kursen:

In der Regel werden bei Säugetieren wie dem Menschen nur Cytosin-Basen methyliert, auf die eine Guanin-Base folgt. Man nennt solche Stellen CpG-Stellen (Cytosin-Phosphat-Guanin). Diese CpG-Stellen treten gehäuft an den Promotoren von Strukturgenen auf *(sie bilden dort regelrechte CpG-Inseln)*.

*Die Begriffe CpG-Stellen und -Inseln werden vom LehrplanPLUS nicht genannt, soll­ten also weggelassen werden und stellen keinen Lerninhalt dar.*

**Funktionelle Bedeutung der DNA-Methylierung:**

*Hinweis: ggf. eine Auswahl treffen, wichtig ist vor allem die Regulation der Gen-Aktivität*

**a) Regulation der Gen-Aktivität (Promotor-Inaktivierung):**

Wenn Cytosin-Basen in Promotoren methyliert sind, dann lagern sich dort bestimmte Proteine an (hemmende Transkriptions-Faktoren), die eine Verdichtung des DNA-Histon-Komplexes (des Chromatins) bewirken. Dadurch kann sich an dieser Stelle der Proteinkomplex für die Transkription nicht aufbauen: Methylierung an einem Promotor führt zur Inaktivierung des zugehörigen Gens.

Eine Häufung von methylierten Cytosin-Basen beobachtet man bei Genen, deren Genprodukt im betrachteten Zelltyp nicht vorkommt. Umgekehrt sind aktiv transkribierte Gene erheblich weniger methyliert als inaktive Gene.

Innerhalb der Entwicklung von einer Stammzelle zur adulten Zelle ändert sich das Muster der DNA-Methylierung je nachdem, welche Genprodukte gerade benötigt werden und welche nicht.

Vgl. Aufgabe 2 auf dem Arbeitsblatt *Epigenetik* [[docx](https://www.bio-nickl.de/wordpress/wp-content/uploads/2023/11/MolGenLP18_Epigenetik.docx)] [[pdf](https://www.bio-nickl.de/wordpress/wp-content/uploads/2023/11/MolGenLP18_Epigenetik.pdf)]

**b) DNA-Reparatur:**

*Hinweis: Der genaue Mechanismus der Basen-Exzisions-Reparatur ist Lerninhalt im eA-Kurs im Lernbereich 3 „Vervielfältigung genetischer Information“ unter 3.1.4 „DNA-Reparatur“, im gA-Kurs ist dies kein Lern­inhalt. Die DNA-Reparatur wird in beiden Kursformen im Lernbe­reich „Neukombi­na­tion und Veränderung genetischer Information“ unter 4.3.4 „Bedeutung von Reparatur­enzymen“ erneut aufgegriffen.*

Bevor es zur Replikation\* kommt, sind auf beiden DNA-Einzelsträngen etwa 1-5 Prozent der Cytosin-Basen methyliert. Bei der Replikation werden beide Einzelstränge voneinander getrennt; dann wird durch die Aktivität der DNA-Polymerase jeweils ein neuer Einzelstrang gebildet, der zunächst noch keine Methylierungen enthält. Dabei kommt es immer wieder zu fehlerhaften Basenpaarungen. An solchen Stellen hat die Doppelhelix einen größeren Durch­messer (Ausbuchtung), weil die Basen keine engen Wasserstoffbrücken ausbilden können. Ein Reparatur-Enzym fährt die neuen DNA-Doppelstränge ab und stoppt an diesen Stellen. Der neu gebildete DNA-Einzelstrang (mit dem Replikationsfehler) ist daran zu erkennen, dass er nicht methyliert ist. Der Bereich um den Fehler wird aus dem neu synthetisierten Einzelstrang groß­zügig ausgeschnitten, entfernt und erneut repliziert. Ein neu gebildeter DNA-Strang wird kurze Zeit später ebenfalls methyliert, so dass dann nicht mehr zwischen altem und neuem Strang unterschieden werden kann. Das Reparatur-Enzym hat also nicht viel Zeit.

*Der Vorgang sollte als bewegte Animation gezeigt werden bzw. fertigen die Schüler dazu Skizzen an.*

\* Replikation war Lerninhalt in der 9. Klasse Biologie und ist den Kursteilnehmern vielleicht nicht mehr gegen­wärtig. Also: Kenntnisstand evaluieren und ggf. kurz wiederholen.

**c) Medizinische Bedeutung:**

Fehlerhafte DNA-Methylierungen werden bei der Zellteilung meist an die Tochterzellen weiter­gegeben, so dass auch sie an bestimmten Stellen zu hoch oder zu niedrig methyliert sind, d. h. bestimmte Genprodukte zu wenig oder zu viel produziert werden. Das kann eine Ursache für Krankheiten sein. Beispielsweise zeigen Tumorzellen ein Methylierungs-Muster, das sich stark von dem gesunder Zellen des gleichen Zelltyps unterscheiden.

*Die folgenden beiden Beispiele sind fakultativ und allenfalls für den eA-Kurs sinnvoll:*

**d) Genetische Prägung (Imprinting):**

Wenn eine hohe Methylierung eines bestimmten Gens bei der Bildung der Keimzellen beibe­halten wird, dann ist dieses Gen auch in der Zygote und den daraus entstehenden Zellen des Kindes inaktiv. Auf dem homologen Chromosom ist das Gen in der Regel aktiv. Dann wird nur die mütterliche bzw. die väterliche Gen-Variante realisiert, aber nicht beide. (Untersucht z. B. an der Acker-Schmalwand *Arabidopsis thaliana*, einem intensiv untersuchten Kreuzblütler).

Beim Menschen ist genetische Prägung bei etwa 100 Genen bekannt.

**e) Abwehr von Fremd-DNA:**

Viren-DNA, die in Bakterien eindringt, ist in der Regel nicht methyliert. Aus dem Bakterium *Diplococcus pneumoniae* wurde ein Restriktions-Enzym (Restriktion = Spaltung von DNA) isoliert, das nicht-methylierte DNA-Doppelstränge zerschneidet, in diesem Fall die Virus-DNA. Dadurch wird das Bakterium vor dem Befall mit dem Virus geschützt.

*Hinweis: Die Zusammenhänge zwischen Methylierungsmuster und Expression sind noch nicht ausreichend erforscht. Ein anderes Methylierungsmuster muss nicht unbedingt zu einem ande­ren Expressionsmuster führen. Außerdem lässt sich allein aus einer Korrelation noch keine Kausali­tät herleiten.*

*Hinweis: Auswirkungen der DNA-Methylierung können inzwischen gezielt untersucht werden, denn Cas9 kann als Transporter für Proteine eingesetzt werden, die punktgenau bestimmte Kern­basen methylieren können.*

*Epigenetisches Alter (vom LehrplanPLUS nicht verlangt): Das Methylierungsmuster der DNA korreliert eng mit dem Lebensalter eines Menschen. Anhand des Methylierungsmusters einer DNA-Probe lässt sich ziemlich gut feststellen, wie alt diese Person etwa ist. Das heißt aber nicht unbedingt, dass dieses Methylierungsmuster die Ursache für altersbedingte Schäden wäre.*

*Methylierung bei Traumatisierung (kein Lerninhalt): Tobias Hecker und sein Team von der Universität Zürich verglichen 2016 traumatisierte Kinder (körperliche und seelische Gewalt) mit Kindern, die nur von wenig Misshandlungen berichteten. Dabei zeigte sich, dass die Methy­lierung des Gens für das Protein Proopiomelanocortin bei traumatisierten Kindern von dem bei der Kontrollgruppe abwich. Dieses Protein ist der Vorläufer verschiedener Hormone, unter anderem für das Stresshormon Adrenocorticotropin.* [nach Anne Kratzer: Hitlers Pädagogen. In Spektrum Geschichte 6.2023, Spektrum der Wissenschaft Verlag, S. 33]

**2.2.3 Inaktivierung des X-Chromosoms**

Problemstellung: Frauen besitzen in jeder Zelle zwei X-Chromosomen, Männer dagegen ein X- und ein Y-Chromosom. Die Männer beweisen also, dass es genügt, wenn von jedem X-chromosomalen Gen nur 1 Exemplar vorliegt. Dagegen könnte der doppelte X-chromosomale Gen­­­bestand bei Frauen (zumin­dest in bestimmten Zelltypen) Probleme bereiten, wenn er dazu führen würde, dass eine zu große Menge an Genprodukten hergestellt würde. Dieses Problem erkannte als erste die engli­sche Genetikerin Mary Frances Lyon im Jahr 1961 und stellte die Hypothese auf, dass in Zellen mit zwei X-Chromosomen eines im inaktiven Zustand vorliegen sollte. In der Tat liegt bei Säugetieren in vielen weiblichen Zellen eines der X-Chromosomen auch während der Inter­phase in stark kondensiertem Zustand vor. Man nennt es Barr-Körper­chen nach dem kanadi­schen Medizinforscher Murray Barr, der es 1949 das erste Mal beschrieb. (Nur bei diesem einen X-Chromosom ist der DNA-Histon-Komplex stark verdichtet. Ggf. ver­wen­den Sie hierfür den Begriff Heterochro­ma­tin.)

Die starke Kondensation des inaktivierten X-Chromosoms wird unter anderem auf einen sehr hohen Methylierungs-Grad der DNA zurückgeführt. Im Gegensatz zur regulatorischen DNA-Methylie­rung wird die X-chromosomale Methylierung in Körperzellen nicht rückgängig gemacht. Die Inaktivierung wird an alle Tochterzellen vererbt. Nur bei der Bildung von Keimzellen wird diese starke Methylierung des X-Chromosoms wieder aufgehoben.

Welches der beiden X-Chromosomen inaktiviert wird, hängt bei Mensch und Maus (und ver­mut­lich bei allen Säugetieren) vom Zufall ab.

Zellen von XY-Männern besitzen keine Barr-Körperchen. Barr-Körperchen dienen deshalb in der Sportmedizin dem Nachweis des weiblichen Geschlechts, auch bei tendenziell maskulinem Phäno­typ.

ggf. im eA-Kurs zusätzlich: Es gibt auch entsprechende Modifikationen der Histone, die eine maximale Ver­dichtung des X-Chromosoms bewirken.

Gute Abbildung zur Inaktivierung des X-Chromosoms in Biosphäre 12, Cornelsen-Verlag, auf Seite 47.

**Beispiel: Schildpatt-Muster bei weiblichen Hauskatzen**

Diese Katzen haben einen weißen Bauch *(das unterliegt einer eigenen Regulierung, die hier nicht besprochen werden soll),* der übrige Körper ist von unregelmäßigen rötlichen bzw. schwar­­­­zen Fellbereichen bedeckt. Die rötliche bzw. schwarze Fellfärbung beruht auf zwei Varianten des selben Gens auf dem X-Chromosom. In den rötlichen Hautbereichen ist das X-Chromosomen mit der für die schwarze Färbung zuständigen Variante inaktiviert und umgekehrt. In der frühen Embryonal-Entwicklung wird in den Hautzellen mal das eine, mal das andere X-Chromosom inaktiviert. Diese zufällige Auswahl wird dann in allen Tochterzellen beibehalten. Man nennt so eine Erscheinung ein genetisches Mosaik.

In Japan galten Schildpatt-Katzen als Glücksbringer.

*Hinweis: An dieser Stelle ist es sinnvoll, die einzelnen genannten Objekte der jewei­ligen* ***Betrachtungsebene*** *zuordnen zu lassen, z. B.:*

*Fellfärbung: makroskopisch*

*X-Chromosom: mikroskopisch*

*Gen für Fellfärbung, methylierte Cytosin-Base: submikroskopisch (Teilchenebene)*

*Weitere Vertiefung halte ich nicht für angebracht (z. B. XIST-RNA).*

**2.2.4 RNA-Interferenz** (nur eA)

Dieser Vorgang wird abgekürzt: RNAi (auch: post-transkriptionelles Gen-Silencing; dieser alternative Begriff kann diskutiert werden, bildet aber auf keinen Fall einen Lerninhalt)

Der im wikipedia-Artikel „RNA-Interferenz“ empfohlene Film von Spektrum der Wissenschaft „Gene zum Schwei­gen gebracht“ erscheint für die Schüler ziemlich verwirrend, weil in der Animation eine über­große Vielzahl an Objekten agiert, die nicht benannt werden, und der Text nicht immer zum Bild passt.

Mit einer Ausnahme (s. u.) finde ich sämtliche **Erklärvideos** zur RNA-Inter­ferenz auf youtube (Stand: 31.12.2022) für den Unterricht nicht tauglich, weil sie entweder verwirrend, missver­ständlich oder ohne jeden Zugewinn sind. Eine anschauliche Animation der Vorgänge habe ich dort nirgends gesehen. Die Ausnahme:

**Erklärvideo** (1:19): **„Kreidezeit 02 – RNA-Interferenz“**

<https://www.youtube.com/watch?v=hOlH4wf7jYI>

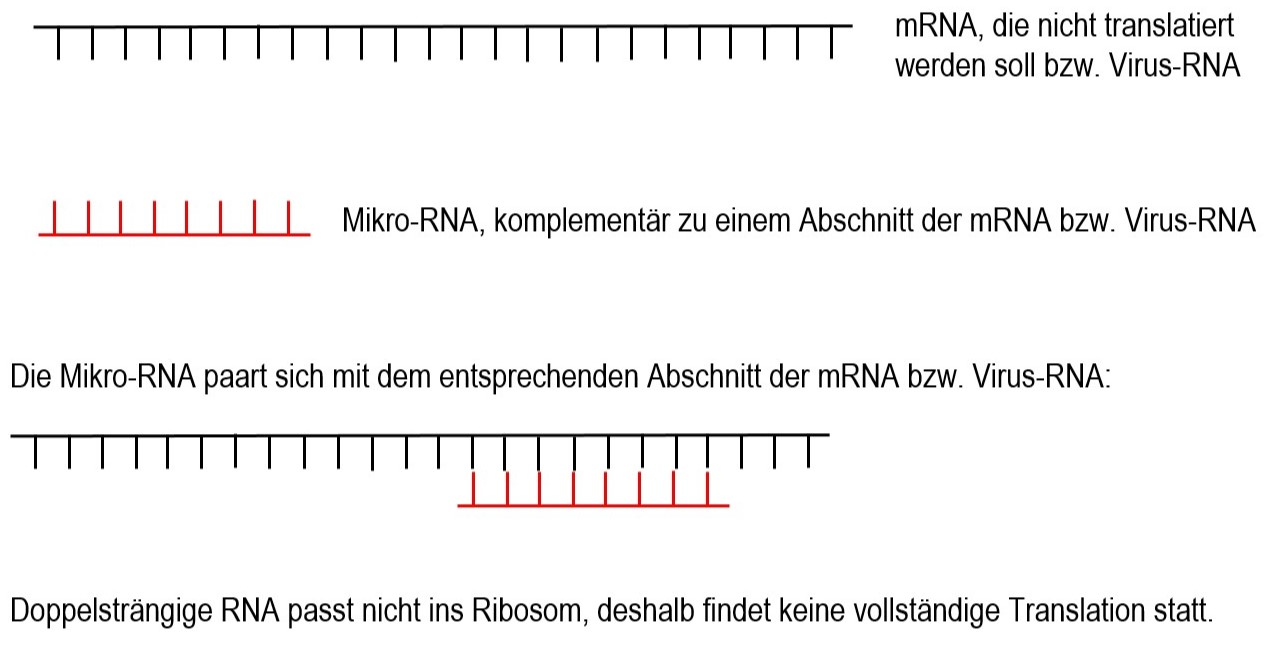
von Nikolaus Machuy (MPI für Infek­tions­biologie): kurze Erklärung mit Tafelbild, warum die RNA-Inter­ferenz für die zellbiologische Forschung so interessant ist, sowie das Grundprinzip des Mechanismus.

**Erklärvideo „RNA-Interferenz“** (4:38)

<https://studyflix.de/biologie/rna-interferenz-2557>

Im Unterricht gut einsetzbar bis 1:37. In diesem ersten Abschnitt wird die RNA-Interferenz in den Gesamt­ablauf der Proteinbio­syn­these eingeordnet und danach ihr Zweck erklärt: Schutz vor eingedrungener Virus-RNA bzw. Genregulation im Anschluss an die Transkription. Der Mechanismus wird nicht dar­gestellt.

(Die Darstellung des Ablaufs der RNA-Interferenz geht weit über den Anspruch der Schule hinaus (mit siRNA, miRNA und RISC-Komplex), die Anwendung in der Forschung wird dagegen nur sehr oberfläch­lich angerissen.)



*Die Kursteilnehmer sol­len anschließend in ei­ge­nen Worten den Film­inhalt formulieren und ggf. den Vorgang an­hand einer Serie von Skizzen darstellen, die etwas detaillierter aus­fal­len als im Film, z. B. wie nebenstehend.*

**Abbildung** [[docx](https://www.bio-nickl.de/wordpress/wp-content/uploads/2023/11/MolGenLP22_RNA-Interferenz.docx)] [[pdf](https://www.bio-nickl.de/wordpress/wp-content/uploads/2023/11/MolGenLP22_RNA-Interferenz.pdf)] [[jpg](https://www.bio-nickl.de/wordpress/wp-content/uploads/2023/11/MolGenLP22_RNA-Interferenz.jpg)]

Ergänzung durch die Lehrkraft: Die RNAs werden nach kurzer Zeit von Enzymen der Zelle zerstört.

Vorschlag für den Lerninhalt:

Die RNA-Interferenz ist ein weiterer Mechanismus zur Verhinderung der Translation.

Dadurch kann sich die Zelle vor eingedrungener Virus-RNA schützen oder die Aktivität eigener Gene regulieren.

Es werden kurze RNA-Stücke (Mikro-RNA, miRNA\*) erzeugt, die komplementär zu einem Abschnitt auf einer mRNA sind, die nicht translatiert werden soll.

Diese kurzen RNA-Stücke paaren sich mit dem entsprechenden Abschnitt auf der mRNA.

Dadurch wird verhindert, dass die Translation im Ribosom vollständig stattfinden kann, die nur mit einsträngiger RNA abläuft.

Die untaugliche RNA wird relativ bald abgebaut.

Zweck: Abfedern zufälliger Schwankungen bei der Genexpression; Inaktivierung uner­wünschter RNA

\* Diese Bezeichnungen müssen keinen Lerninhalt darstellen

Beim Menschen gibt es schätzungsweise um die 1000 verschiedene miRNA-Typen, welche die Aktivität von etwa 30 Prozent der menschlichen Gene kontrollieren. Die RNA-Interferenz hat somit eine ähnliche Bedeutung wie die Transkrip­tionsfaktoren. Das betrifft auch zahlreiche Funktionen des Immunsystems. Durch RNA-Interferenz werden gezielt bestimmte mRNA-Moleküle inaktiviert, so dass ihr Genprodukt nicht hergestellt wird. Die miRNAs sind meist 21-23 Nukleotide lang.

In der Forschung wird RNA-Interferenz gezielt zur Herstellung von Knockout-Organismen ein­gesetzt. In der Medizin sind bereits die ersten Medikamente zugelassen, die auf RNA-Inter­ferenz beruhen.

*Auf weitere Details der RNA-Interferenz (wie ursprüngliche Doppelsträngigkeit der miRNA, siRNA, Dicer, Argonautenprotein usw.) würde ich im Unterricht ver­zichten, denn es kommt nur auf das Grundprin­zip an, für das neben der vom LehrplanPLUS verlangten Regulationsfunktion immerhin noch die Virenabwehr genannt ist.*

Vorkommen der RNA-Interferenz (fakultativ):

* RNA-Interferenz ist nachgewiesen in allen eukaryotischen Reichen (deshalb dürfte die RNA-Interferenz ein erdgeschichtlich sehr alter Mechanismus sein; dafür spricht auch, dass die Proteine des Enzymkomplexes hochkonservativ sind, d. h. sie haben eine ex­trem kleine Mutationsrate).
* RNA-Interferenz ist bei Pflanzen sehr wichtig bei der Abwehr von fremder RNA (v. a. von Virus-RNA).
* Bei Prokaryoten existiert mit dem CRISPR/Cas9-System ein Abwehrmechanismus, der große Ähnlichkeiten mit der RNA-Interferenz hat. (Das CRISPR/Cas9-System wird thematisiert im Abschnitt 4.4.4 des Lernbereichs 4 Neukombination und Veränderung genetischer Information.)

Anwendung: Am LOEWE-Zentrum für Translationale Biodiversitätsgenomik in Frankfurt am Main (TBG) arbeitet man 2023 an der Bekämpfung der eingewanderten Asiatischen Tiger­mücke (*Aedes albopictus*), die Krankheitserreger wie das Ebola- oder das West-Nil-Virus über­trägt. In einem ersten Schritt wird das Vorkommen dieser Mücke überprüft, indem Gewässer­proben auf Mücken-DNA untersucht werden (die Mückenlarven entwickeln sich in Stillgewäs­sern, auch in sehr kleinen wie wassergefüllten Eimern oder Schalen). In einem zweiten Schritt wird den Larven Nahrung angeboten, die doppel­strängige Interferenz-RNA enthält. Diese gelangt über den Darm in Zellen der Larven und schaltet dort einige überlebenswichtige Gene aus. Das Gemisch aus Nahrungsstoffen und Inter­ferenz-RNA wird per Spray ausgebracht.

[nach einem Kurzbericht in Biologie in unserer Zeit 3|2023, S. 208 f.]

2006 erhielten die US-Wissenschaftler Andrew Z. Fire und Craig C. Mello den Nobelpreis für Physiologie oder Medizin für ihre Erforschung des Mechanismus der RNA-Interferenz.

*Manche Lehrkräfte würden in besonders interessierten Kursen den RISC-Komplex ansprechen; ich rate davon ab. RISC (RNA-induced silencing complex) ist ein Komplex aus siRNA (small interfering RNA) bzw. miRNA (micro RNA) und Proteinanteilen, welche die Ziel-RNA enzyma­tisch zerstören. Allerdings kann es sinnvoll sein, wenn die Kursteilnehmer in der Lernphase mit ihnen unbekannten und etwas sperrigen Akronymen (und deren Worterklärungen) konfrontiert werden, weil solche auch in Abituraufgaben vorkommen können. Ausdrücke wie Dicer oder RISC stellen dabei keine Lerninhalte dar, sondern dienen ausschließlich der Einübung geistiger Fertigkeiten. (Vgl. z. B. Abbildung B2, S. 76 im Buchnerbuch)*

**2.2.5 Histonmodifikation** (nur eA)

*Ich habe in diesem Abschnitt die biochemischen Aspekte anhand von Formeln dargestellt. Sie sollten nur in einem Kurs verwendet werden, dessen Teilnehmer gute chemische Vorkenntnisse aufweisen und Interesse an Biochemie haben. Das Acetyl-CoenzymA (Ac-CoA) kann in diesem Zusammenhang ein­geführt werden, weil es in Jahrgangsstufe 13 ggf. beim Acetylcholin (Neuro­biologie) und beim abbauenden Stoffwechsel wieder auf­taucht. Man kann auf die For­meln auch ganz verzichten.*

*Im Erklärvideo von simple biology wird zwar dargestellt, dass Acetylierung und Phosphory­lie­rung von Histonen zu einer lockeren Wicklung der DNA und damit erhöhter Transkription führe, während Methylierung eine enge Wicklung und damit erniedrigte Transkription bewirke. Ganz so einfach scheint es aber nicht zu sein (vgl. Tabelle im wikipedia-Artikel „Histonmodifi­kation“).*

*Die Darstellung zu Histon-Modifikationen in Unterricht Biologie kompakt 414 (April 2016) „Genregulation bei Eukaryo­ten“ auf Seite 11 geht weit über die Anforderungen des Lehrplan­PLUS hinaus!*

Histone (das Histon) sind spulenförmige Proteinkomplexe, um welche die DNA gewickelt ist. *(Den Begriff Nukleosom halte ich für verzichtbar.)*

Histonmodifikationen sind chemische Veränderungen an Histon-Komplexen. Von der Modifi­ka­tion der Histone hängt ab, wie locker bzw. wie dicht die Packung des DNA-Histon-Komp­lexes (des Chromatins) ist. Ist diese Pa­ckung dicht, kann sich der Proteinkomplex für die Transkription nicht an die DNA anlagern und das jeweilige Gen ist stumm geschaltet, und umgekehrt. Histon­modifikationen dienen also der Regulation der Genaktivität (im Vorfeld der Transkription). Den umfassenden und sehr differenzierten Einfluss der Histone auf die Tran­skription bezeich­net man deshalb auch als „Histon-Code“. *(Evtl. führen Sie die Begriffe Hetero­chromatin für die dicht gepackten und Euchromatin für die locker gepackten Abschnitte der DNA ein.)*

Es genügt, wenn nur eine Möglichkeit der Modifikation angesprochen wird, z. B. die Acety­lierung von Lysin-Resten in Histonen. Dabei fügt das Enzym Histon-Acetyl-Transferase eine Acetyl­gruppe (H3C–CO–) an die endständige Aminogruppe des Ami­nosäurerestes von Lysin an. Dieser Vorgang ist reversibel: Mit Hilfe des Enzyms Histon-Deacetylase kann die Acetylgrup­pe wieder entfernt werden.

Die Lage des acetylierten Lysinrests im Histonmolekül sowie die Nachbarschaft weiterer Modi­fi­kationen legt fest, ob die Acetylierung eine Verdichtung oder eine Lockerung der DNA-Wick­lung bewirkt.

Ggf. wird angesprochen, dass auch andere Gruppen an Histone gebunden werden können wie Methylgruppen bzw. Phosphatgruppen. Auch bei ihnen hängt die Wirkung vom Gesamt­kontext ab. *(Im Buchnerbuch ist in Abbildung B3, Seite 63, nur dargestellt, dass Histon-Acety­lierung zur Lockerung und Histon-Methylierung zur Verdichtung des DNA-Histon-Komplexes führt. Aber ganz so einfach sind die Verhältnisse nicht, denn ob die Acetylierung bzw. Methylierung eine Verdichtung oder Lockerung bewirkt, hängt noch von weiteren Faktoren ab. Ich würde hier keine Regel ableiten, wie sie in B3 suggeriert wird.)*

**Fakultativ: Besprechung biochemischer Aspekte mit Formeln**

*Hinweise: Die unterschiedlichen Varianten von Acetyl-Transferase und Deacetylase fallen der didaktischen Reduktion zum Opfer. Allerdings würde ich an dieser Stelle (wenn der Kurs mit­zieht) die chemischen Vor­gänge der Acetyl-Bildung und der Acetylierung anhand von Struktur­formeln darstellen, die allerdings sorgfältig und einfühlsam inter­pretiert werden müs­sen. Dabei geht es aber nur um Edukte und Produkte, nicht um Zwischen­schritte oder gar Reaktions­mechanismen. Zugleich wird Vorwissen zu Aminosäuren und Protei­nen wiederholt und ange­wandt.*

Die Acetylgruppe:

Essigsäure spielt im Stoffwechsel eine zentrale Rolle (*acetum*, lateinisch: Essig). Für eine Über­tragung auf ein anderes Molekül wird die Essigsäure an das sogenannte Coenzym A gebunden. Dabei verbindet sich die OH-Gruppe\* aus der Carboxygruppe mit einem Wasserstoffatom aus der Thiol-Gruppe des Coenzym A zu einem Wasser-Molekül. Damit ist die Acetylgruppe an das Coenzym A gebunden. Diese Bindung erfolgt über ein Schwefel­atom des Coenzyms A. Ein Coenzym ist ein Molekül, das obligat an einer enzymatisch kataly­sier­ten Reaktion beteiligt und nicht dauerhaft an das Enzym gebunden ist.

\* Ich lehne es ab, diese spezielle OH-Gruppe als Hydroxygruppe zu bezeichnen, weil sie Bestandteil einer Carb­oxy­gruppe ist und somit völlig andere Eigenschaften hat als eine isolierte Hydroxygruppe.

Bildung von Acetyl-Coenzym A:

|O| |O|

|| ||

H3C–C–OH + H–S–CoA H2O + H3C–C–S–CoA

Essigsäure Coenzym A Wasser Acetyl-Coenzym A

(Ethansäure)

Ac-OH + HS-CoA H2O + Ac-CoA

Die Acetylgruppe wird abgekürzt durch Ac, das Coenzym A durch HS-CoA. Das mit einer Acetylgruppe beladene Coenzym A heißt Acetyl-CoA oder aktivierte Essigsäure.

**Abbildung** Acetyl-CoA [[jpg](https://www.bio-nickl.de/wordpress/wp-content/uploads/2023/11/MolGenLP23-Acetyl-CoA.jpg)]

*Hinweise: Achten Sie darauf, dass alle freien Elektronenpaare geschrieben werden. Damit die Atom-Umlagerungen besser zu sehen sind, würde ich – wie dargestellt – die nur wenig verein­fachten Strukturformeln verwenden, nicht die stark vereinfachten, bei denen die Kohlen­stoff-Atome durch Enden und Ecken dargestellt sind und die Wasserstoff-Atome nicht geschrie­ben werden. In der unteren Zeile ist die selbe Reaktion dargestellt, aber in symbolischer Schreib­weise.*

Lysin:

Wie alle Aminocarbonsäuren trägt das zweite Kohlenstoff-Atom (das α-Atom) von Lysin eine Carboxy- (COOH-) und eine Aminogruppe (H2N-). Die Kettenlänge beträgt insgesamt 6 Koh­len­stoff-Atome, von denen das letzte (C6 bzw. ε-Atom; fakultative Bezeichnung) eine weitere Amino­gruppe trägt. Die Kursteilnehmer können die in der Formel dargestellten funktionellen Gruppen sowie die Länge des Moleküls aufgrund ihres Vorwissens beschreiben.

COOH

Kopf der Aminosäure

Aminosäure-

rest

|

H2N–C–H

|

CH2

|

CH2

|

CH2

|

CH2

|

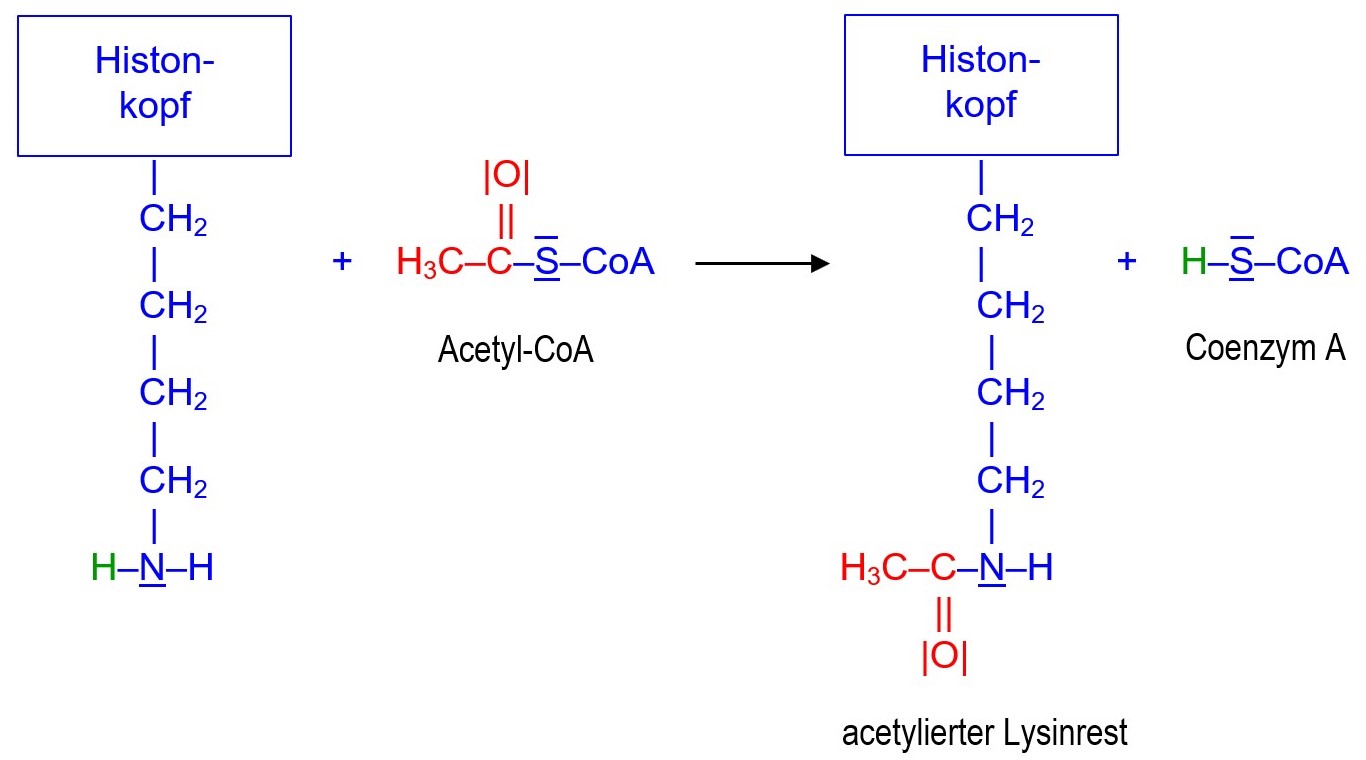
H–N–H

**Abbildung** Lysin Formel [[jpg](https://www.bio-nickl.de/wordpress/wp-content/uploads/2023/11/MolGenLP24_Lysin.jpg)]

*Hinweis: Hier und in der folgenden Abbildung ist nicht berücksichtigt, dass die Aminogruppe meist in protonierter Form, also mit positiver Ladung vorliegt.*

Vorgang der Histon-Acetylierung:

Mit Hilfe des Enzyms Histon-Acetyl-Transferase wird ein Wasserstoff-Atom der endständigen Aminogruppe eines Lysin-Restes ausgetauscht durch eine Acetylgruppe, die von Acetyl-CoA geliefert wird. (Die andere Aminogruppe und die Carboxygruppe sind über Peptid-Bindungen mit den benachbarten Aminosäuren verbunden.) *Der Name des Enzyms stellt keinen Lerninhalt dar. Die Kursteilnehmer betrachten die folgende Abbildung und verbalisieren den dort vorge­stellten Vorgang.*



**Abbildung** Lysin Acetylierung [[jpg](https://www.bio-nickl.de/wordpress/wp-content/uploads/2024/03/MolGenLP25_Lysin_Acetylg.jpg)]

**Graphik**: Lysin allein und Acetylierung zum Bearbeiten [[docx](https://www.bio-nickl.de/wordpress/wp-content/uploads/2024/03/MolGenLP25a_Lys_Acet.docx)]

Wirkung (nur **Begabtenförderung**):

Im Protein liegt die endständige Aminogruppe des Lysin-Restes in protonierter Form vor und trägt deshalb eine positive Ladung:

|

H–N–H

|

H

+

Wenn eines der Wasserstoff-Atome dieser Gruppe durch einen Acetylrest ersetzt ist, kann sich dort kein Proton (Wasserstoff-Ion) mehr anlagern. Deshalb ist die acetylierte Aminogruppe elektrisch neutral.

Die positive Ladung der protonierten Aminogruppe steht in elektrostatischer Wechselwirkung mit der negativen Ladung der Phosphatreste der DNA (Ionenbindung). Dies hat zur Folge, dass sich bestimmte Regionen des DNA-Histon-Komplexes verdichten. Damit wird eine Bindung zwischen Transkriptionsfaktoren und DNA erschwert und dadurch die Transkription behindert (ggf. Fachbegriff Heterochromatin).

Die acetylierte Aminogruppe ist nicht geladen, die oben genannte elektrostatische Wechsel­wirkung entfällt. Dies hat zur Folge, dass sich der DNA-Histon-Komplex lockert, damit den Zutritt von Transkriptionsfaktoren erleichtert und dadurch die Transkription fördert (ggf. Fach­begriff Euchromatin).

Methylierung (nur **Begabtenförderung**):

Das Enzym Histon-Methyl-Transferase kann Methylgruppen (H3C–) auf die Aminosäurereste von Lysin bzw. Arginin übertragen, wobei Lysin bis zu drei, Arginin bis zu zwei Methylreste erhalten kann. Ob die Wirkung der Histon-Methylierung die Transkription fördert oder hemmt, hängt von der Lage der Aminosäure innerhalb des Histonproteins ab. Histon-Demethylasen machen den Vorgang rückgängig, indem sie Methylgruppen abspalten.

*Hinweise: Die Phosphorylierung von Histonen sowie den Begriff Histon-Code würde ich auf aus dem Unterricht heraus lassen.*

Deaktivierte X-Chromosomen (nur Information für die Lehrkraft):

In Barr-Körperchen, also stark kondensierten und damit deaktivierten X-Chromosomen, liegen bestimmte Histone methyliert und andere Histone deacetyliert vor.

*Es ist sinnvoll, an dieser Stelle zusammenfassend die wichtigsten Mechanismen der Epigenetik innerhalb der Proteinbiosynthese zu verorten, auch Mechanismen aus Abschnitt 1. Dabei sollte noch einmal die Grundfrage aufgegriffen werden: Warum sind Zellen trotz identischer gene­tischer Ausstattung so unterschiedlich? Die Blitz-Symbole bedeuten: Hemmung.*

Histon- DNA- RNA- Antisense-

modifikation methylierung Interferenz RNA

Länge des Poly-A-Schwanzes der mRNA: Abbau\*

DNA

Protein

mRNA

**Transkription Translation**

*\* 2024 wurde entdeckt, dass mRNA in Bakterien (konkret: Salmonella enterica) schneller abge­baut wird als bislang vermutet und zwar nach durchschnittlich 1 Minute.*

**2.3 Stammzellen** (ca. 2 Stunden)

|  |  |
| --- | --- |
| **Inhalte zu den Kompetenzen** | **Kompetenzerwartungen: Die Sch. ...** |
| embryonale und adulte Stammzellen als noch undifferenzierte Zellen | beurteilen die Bedeutung von Stammzellen für die Forschung und für medizi­ni­sche Anwendungen und bewerten deren Einsatz aus ethischer Sicht. |
| ***Vorwissen:***  (Stammzellen waren zwar im G8 Thema in der 9. Jgst., aber nicht mehr im LehrplanPLUS.) | |

*Der wikipedia-Eintrag wie auch der Artikel im Spektrum Lexikon der Biologie zu Stammzellen sind zu komplex und wissenschaftssprachlich zu hoch, um als Quellentexte für Schülerrecher­chen dienen zu können. Schülerzentriertes Arbeiten bietet sich an dieser Stelle zwar an, benötigt aber Texte auf altersgemäßem Niveau (z. B. Schulbücher).*

*Die reinen Fakten zu Stammzellen sollten rasch abgehandelt werden (ca. 1 Stunde), damit genug Zeit für Recherchen und Diskussion bei der Bewertung bleibt (vgl. Kompetenzerwartun­gen).*

**2.3.1 Begriffsklärung**

Die öffentliche Diskussion um mögliche medizinische Anwendungsbereiche für Stammzellen weckt bei den einen große Hoffnungen, stößt aber bei anderen auf kompromisslose Ablehnung, so dass der Begriff „Stammzelle“ nicht immer neutral im biologischen Sinn verwendet wird, sondern durchaus ideologisch negativ besetzt sein kann. Dem muss der Biologie-Unterricht sachliche Information entgegen setzen, damit eine ethische Diskussion sachlich geführt werden kann.

Ausdifferenzierte Zellen wie Blut-, Muskel-, Nerven- oder Drüsenzellen können sich unter normalen Umständen weder teilen, noch in andere Zelltypen umwandeln. Stammzellen sind als undifferenzierte Zellen dagegen zur Zellteilung fähig, wobei die eine Tochterzelle in der Regel weiterhin Stammzelle bleibt, während sich die andere ausdifferenziert.

Nach der Entwicklungsphase des Organismus unterscheidet man embryonale und adulte Stamm­zellen (Gewebestammzellen), welche unterschiedliche Eigenschaften besitzen.

*Die Einteilung der Stammzellen in totipotent (Zellen bis zum 8-Zell-Stadium), pluripotent (embry­onale Stammzellen aus dem Bläschenkeim) und multipotent (Gewebestammzellen) halte ich – zumindest als obligate Lerninhalte – für überflüssig. Das Multiplikatorenteam vom Januar 2024 in Dillingen empfiehlt allerdings die obligate Verwendung der Begriffe pluripotent und multipotent.*

**2.3.2 Embryonale Stammzellen**

Abkürzung: ES-Zellen

Sie stammen aus einem sehr frühen embryonalen Stadium:

Die befruchtete Eizelle (die Zygote) teilt sich, so dass ein Keim aus zwei identischen Zellen entsteht. Weitere Zellteilungen führen zum 4-, 8-, 16-Zell-Stadium usw. Nach weiteren Teilun­gen liegen die Zellen in einem Haufen aufeinander, der an eine Maulbeere erinnert und deshalb Maulbeer-Stadium (die Morula) genannt wird. Nach 3-4 Tagen ist nach weiteren Zellteilungen daraus der Bläschenkeim (die Blastozyste) entstanden, bei dem die Zellen eine Kugeloberfläche bilden, an deren Innenseite an einer Stelle ein Zellhaufen klebt (der Embryoblast). Dieser Zell­haufen enthält die embryonalen Stammzellen.

*Diese Stadien sollten in Projektion bzw. durch Modelle dargestellt werden. Die Bezeichnungen der Stadien stellen keinen Lerninhalt dar. Die Begegnung mit ihnen ist an dieser Stelle aber sinnvoll, weil die Ontogenese im LehrplanPLUS nirgends explizit berücksichtigt wird. Auf die Ein­teilung der Keimblätter (Ekto-, Meso- und Entoderm) würde ich allerdings verzichten.*

Eigenschaften embryonaler Stammzellen:

* Sie teilen sich rasch und häufig.
* Sie sind unbegrenzt teilungsfähig.
* Sie können sich zu jedem Zelltyp des Organismus differenzieren. Diese Eigenschaft bezeichnet man als Pluripotenz (Adjektiv: pluripotent; *plus*, lateinisch: mehr; *potentia*, lateinisch: Vermögen, Kraft). *Der Begriff Pluripotenz muss keinen Lerninhalt darstel­len.*
* Embryonale Stammzellen kommen natürlicherweise nur im frühen Embryo vor.

Der Mensch besitzt über 300 verschiedene Zelltypen, darunter auch die Keimzellen (Ei- und Spermienzelle), die letztlich alle auf seine embryonale Stamm­zellen zurückgehen.

**2.3.3 Adulte Stammzellen**

Auch im erwachsenen (adulten) Körper sind Stammzellen für den Ersatz zerstörter oder gealter­ter Zellen bzw. für das Wachstum von Organen (z. B. Muskeln) zuständig. Die neuen Zellen gehen im herangewachsenen Körper aus adulten Stammzellen hervor. Bisher wurden beim Menschen in 20 verschiedenen Geweben adulte Stammzellen entdeckt.

Eigenschaften adulter Stammzellen:

* Sie teilen sich nicht mehr so oft wie embryonale Stammzellen.
* Aus ihren Tochterzellen entstehen nur wenige Zelltypen. Diese Eigenschaft be­zeichnet man als Multipotenz (Adjektiv: multipotent; *multus*, lateinisch: viel). *Der Begriff Multi­potenz muss keinen Lerninhalt darstel­len.*
* Sie befinden sich in dem Organ, dessen Zelltypen sie erzeugen können.

Beispiele:

* Knochenmark: Etwa ab dem vierten Embryonalmonat bilden adulte Stammzellen des Knochenmarks rote sowie die unterschiedlichen Typen der weißen Blutzellen.
* Haut: Die adulten Stammzellen der Haut (epidermale Stammzellen) sitzen in deren innerster Schicht (der Basalschicht). Sie produzieren neue Epidermis-Zellen. Die alten Epidermis-Zellen an der Hautoberfläche fallen ab, die neuen folgen von innen her nach.
* Gehirn: Aus adulten Stammzellen im Gehirn (neuronale Stammzellen) bilden sich ver­schiedene Typen von Nervenzellen sowie sogenannten Gliazellen, die zwischen den Nervenzellen sitzen. *Das ist eine relativ neue Erkenntnis, früher ging man davon aus, dass beim Erwachsenen keine neuen Nervenzellen entstehen würden.*

Induzierte Stammzellen (nur zur **Begabtenförderung**):

2007 wurden in differenzierte menschliche Hautzellen die Gene für vier Transkriptionsfaktoren eingebracht. Daraufhin dedifferenzierten diese Zellen und erlangten einen Status ähnlich wie pluripotente embryonale Stammzellen. [aus Stryer: Biochemie]

**2.3.4 Induzierte pluripotente Stammzellen (iPS)**

*Induzierte pluri- bzw. multipotente Stammzellen gehen durch bestimmte Manipulationen aus differen­zier­ten Zellen hervor und könnten die ethische Debatte weitgehend überflüssig machen. Es ist allerdings noch nicht so weit, dass wir beispielsweise individuelle Knochenmarks-Stammzellen aus Hautzellen eines Patienten herstellen könnten.*

*Im LehrplanPLUS tauchen induzierte Stammzellen nicht auf und sollten nach meinem Dafür­halten von der Lehrkraft auch nicht in die Diskussion ein­gebracht werden. Diesem Standpunkt widersprechen allerdings andere Stimmen, die argumentieren, die Schüler stoßen in der Recherche ohnehin auf induzierte pluripotente Stammzellen (iPS), bei denen zudem die gesellschaftlich-ethische Bewertung besonders wichtig ist. Ich nehme sie also mit auf.*

Durch bestimmte Manipulationen gelingt es, ausdifferenzierte Gewebszellen (auch vom Men­schen) in induzierte pluripotente Stammzellen umzuwandeln:

* induziert: hervorgerufen durch künstliche Eingriffe
* pluriopotent: Sie können zu fast allen Körperzellen differenzieren.
* Stammzellen: Sie sind teilungsfähig, wenn auch schlechter als embryonale Stammzellen.

Wenn sie denn einmal einsatzfähig und zugelassen sein sollten, verspricht man sich, mit ihnen Gewebeschäden (z. B. nach einem Herzinfarkt) oder bei Verletzung von Nervenzellen heilen zu können.

**2.3.5 Stammzellen in der Forschung**

*Hinweis: In den Abschnitten 2.3.4 und 2.3.5 habe ich versucht, aus den meist unübersichtlichen Quelltexten einige wesentliche Beispiele herauszukristallisieren. Aus diesen Zusammenstel­lungen wählen Sie für den Unterricht einige aus. Auch hierbei gilt: Weniger ist Mehr!*

Knockout-Mäuse:

In der Stammzellen-Forschung bilden Labormäuse das wichtigste Modell für Säugetiere. Knockout-Mäuse werden u. a. dadurch hergestellt, dass aus dem Bläschenkeim (Blastozyste) embryonale Stammzellen entnommen werden, in denen anschließend bestimmte Gene ausge­schaltet werden. Die auf diese Weise gentechnisch veränderten Stammzellen werden dann in frühe Mäuseembryonen eingeführt. Auf ähnliche Weise werden auch „Knockin“-Mäuse herge­stellt, bei denen ansonsten stillgelegte Gene aktiviert sind. Durch beide Methoden lässt sich untersuchen, welche Aufgaben einzelne Proteine im Körper haben.

Stammzellen-Forschung:

Ein anderer Forschungszweig der Stammzellen-Forschung versucht, aus embryonalen bzw. adulten Stammzellen verschiedene differenzierte Zelltypen herzustellen. Damit wird ange­strebt, letztendlich menschliches Gewebe als Ersatzmaterial zu gewinnen.

Embryonale Stammzellen werden aus dem Bläschenkeim (Blastozyste) von 3-4 Tage alten menschlichen Emb­ry­onen gewonnen, die dabei zerstört werden. Diese Methode ist beim Men­schen in Deutschland nach dem Embryonenschutzgesetz verboten. Allerdings dürfen im Aus­land er­zeug­te embryonale Stammzellen unter Auflagen importiert werden (Stammzellgesetz vom Juli 2002); so müssen sie vor dem 1. Mai 2007 gewonnen worden sein (Beschluss des Bundestags vom 11.4.2008).

*Die ethische Diskussion über Stammzellen-Forschung ist im Abschnitt 2.3.6 vorgesehen.*

Pharmazie:

Neue pharmazeutische Wirkstoffe müssen vor ihrer Zulassung ausführlich getestet werden. In Zukunft könnten dabei Zellhaufen oder Organoide (kleiner und viel einfacher gebaut als das eigentliche Organ), die aus menschlichen Stammzellen gewonnen werden, als Testgewebe die­nen, bevor Tests an kompletten Organismen vorgenommen werden. Damit könnten Tierver­su­che stark eingeschränkt werden.

**2.3.6 Adulte Stammzellen in der Medizin**

Im Mittelpunkt steht die Gewinnung von Ersatzmaterial bei Organschädigungen. Bis jetzt wer­den dafür adulte Stammzellen aus dem entsprechenden Organ des Patienten selbst gewonnen, weil dann keine Abstoßungsreaktionen des Immunsystems zu erwarten sind:

* Blutzellen (bei Leukämie, also Mangel an roten Blutzellen; bei der Therapie von Lymph­­knoten-Tumoren, s. u.): Entnahme von Stammzellen aus dem Knochenmark durch Punktion des Beckenknochens unter Vollnarkose (bei der Punktion wird der Knochen mit einer Nadel durchstochen und ein Teil des Knochenmarks herausgesaugt); stationär. Alternative: Aus dem Knochenmark treten neben den reifen Blutzellen auch wenige Blut­stammzellen aus, die dann im Blut schwimmen. Um sie zu gewinnen, erhält der Patient zunächst ein Wachstumshormon, das die Bildung dieser Zellen beschleunigt; dann wird ihm über einen Venenkatheter Blut abgenommen, das Blut filtriert (dabei werden die Blutstammzellen abgetrennt und entnommen) und über einen zweiten Ka­the­ter wieder zurückgeführt. *Hinweise: Eigentlich werden sogenannte Progenitorzellen gewonnen, die das Entwicklungsstadium nach den eigentlichen Stammzellen darstellen. Den Be­griff würde ich aber nicht einführen. Die Gewinnung aus dem Blut heißt Stammzell-Apherese und wird bevorzugt, weil sie nicht invasiv ist. Der Begriff Punktion kann ein­geführt werden.*
* Behandlung von Lymphknoten-Tumoren: Bei der Chemotherapie von Tumoren werden bevorzugt Zellen getötet, die schnell wachsen, wie Tumorzellen, aber auch Stamm­zellen. Deshalb werden zunächst Blutstammzellen des Patienten gewonnen, bevor die Chemotherapie einsetzt. Nach deren Abschluss werden dem Patienten die Blutstamm­zellen wieder injiziert und sorgen für die Produktion roter und weißer Blutzellen. Diese Methode wird seit mehreren Jahrzehnten praktiziert.
* Blutgefäße / Herz: Die innere Lage der Blutgefäße heißt Endothel. Endothel-Vorläufer­zellen schwimmen im Blut und können daraus gewonnen werden (s. o.). Derzeit wird unter­sucht, inwiefern sie bei Herz- und Gefäßerkrankungen zur Erneuerung des Gewe­bes beitragen können.
* Vorsorge: Bereits bei der Geburt eines Kindes können dessen Blutstammzellen aus dem Blut in der Nabelschnur und in der Plazenta (Mutterkuchen) gewonnen und für spätere Anwendungen vorsorglich aufbewahrt werden.
* Hautzellen (z. B. nach schweren Verbrennungen): Entnahme von epidermalen Stamm­zellen (Hautstammzellen) aus der Unterhaut durch Biopsie mit örtlicher Betäu­bung, ambulant. Bei der Biopsie wird ein kleines Stück Unterhautgewebe mit einer Kanüle entnommen. Daraus werden die Hautstammzellen isoliert und ein Teil von ihnen auf­bewahrt, um für spätere Anwendungen zur Verfügung zu stehen.

Für die Zukunft erhofft man sich, geschädigte Organe mit Hilfe von adulten Stammzellen zu reparieren bzw. aus ihnen Teile von Organen herzustellen und sie dem Patienten einzusetzen (z. B. Hautstücke, auch wenn diese keine Schweißdrüsen, Sinneszellen, Talgdrüsen oder Haar­follikel usw. enthalten). Es wird auch versucht, bereits differenzierte Zellen so umzu­pro­gram­mieren, dass sie die Eigenschaften embryonaler Stammzellen erhalten (induzierte pluri­po­tente Stammzellen). Es ist im Tierversuch bereits gelungen, daraus Herzmuskel- bzw. Nerven­zellen zu gewinnen. Ebenso hofft man, bei degenerativen Erkrankungen (wie der Parkinson­schen Krankheit), Diabetes oder bestimmten Formen von Krebs durch Stammzelltherapie defekte Zellen durch gesunde zu ersetzen.

vgl. „Menschliche Embryonen als Ersatzteillager?“ von der Bundeszentrale für politische Bildung [[pdf](https://www.bpb.de/shop/materialien/themenblaetter/36866/menschliche-embryonen-als-ersatzteillager/)]

**2.3.7 Ethische Diskussion**

*Der ethischen Diskussion über den Einsatz von Stammzellen sollte viel Zeit eingeräumt werden, am besten eine ganze Unterrichtsstunde. Voraussetzung dafür sind die entsprechenden bio­logischen Vorkenntnisse. Sachinformation und ethische Diskussion nebeneinander statt nach­ein­ander durchzuführen, halte ich für problematisch. Ebenso sollte man sich auf ein Haupt­thema konzentrieren (wie im Anschluss dargestellt). Diese Diskussion muss im Biologie-Unter­richt geführt werden, weil Lehrkräfte anderer Fächer die dafür nötige Sachkenntnis in der Regel nicht besitzen.*

**Bewertung:**

Gewinnung menschlicher embryonaler Stammzellen:

Ein wesentlicher Gesichtspunkt der ethischen Diskussion im Rahmen der Verwendung von menschlichen embryonalen Stammzellen betrifft deren Gewinnung: Bei künstlicher Befruch­tung (in-vitro-Fertilisation) werden mehrere Eizellen mit Spermienzellen außerhalb des Kör­pers befruchtet. Nur wenige der daraus entstehenden Keime werden der künftigen Mutter einge­setzt, die überzähligen werden normalerweise tiefgefroren. Aus solchen überzähligen Keimen wurden in der Vergangenheit 3-4 Tage nach der Befruchtung aus dem Keimbläschen (Blasto­zyste) die embryonalen Stammzellen isoliert, wobei der Keim zerstört wurde.

Der zentrale Begriff für eine ethische Bewertung dieses Vorgangs ist die Würde des Menschen. Sie ist durch die „Allgemeine Erklärung der Menschenrechte“ geschützt, die am 10. Dezember 1948 durch die UN-Generalversammlung verkündet wurde. In Deutschland ist die Menschen­würde durch das Grundgesetz geschützt. Auf die Stammzellen-Forschung angewendet, läuft dies auf die Frage hinaus: Besitzt ein 4 Tage alter menschlicher Keim bereits die Menschen­würde oder nicht? Dazu existieren unterschiedliche Standpunkte:

a) Gegner der Stammzellforschung argumentieren, dass die Zellen, die aus einer befruchteten Eizelle hervorgehen, von Anfang an dem Würdeschutz unterliegen und deshalb eine Zerstörung des Keims zur Gewinnung von Stammzellen nicht zulässig ist. Ihre Argumentation wird mit dem Akronym SKIP bezeichnet (ein Akronym ist ein Kunstwort aus mehreren Anfangsbuch­staben):

S = Spezies-Argument: Alle Angehörigen der Spezies (Art) Homo sapiens besitzen den Würde­schutz. Auch Embryonen gehören dieser Spezies an und müssen deshalb ge­ schützt werden.

K = Kontinuitäts-Argument: Die Entwicklung von der Zygote über den Embryo und den Fetus zum Säugling usw. verläuft kontinuierlich. Auch alle kleinen Entwicklungs­schrit­ te in den ersten Tagen des Keimes verlaufen kontinuierlich. Kein einziger dieser Schritte bildet eine objektive Grenze, ab der der Embryo als schutzbedürftig gelten würde. Des­ halb gilt der Schutz von Anfang an.

I = Identitäts-Argument: Der Embryo und die Person, die sich aus ihm entwickeln kann, sind identisch. Wenn die Person Würdeschutz genießt, dann auch der Embryo.

P = Potentialitäts-Argument: Embryonen besitzen Würde, weil sie das Potential (die Mög­ lichkeit) besitzen, sich zu einer Person zu entwickeln.

Dazu passt die ethische Regel: „Behandle andere so, wie du selbst behandelt werden willst.“ bzw. im Speziellen: „Wir würden uns nicht wünschen, abgetrieben worden zu sein. Deshalb soll­ten wir dies auch anderen nicht zufügen.“

*Diese Formulierungen sind gegenüber dem wikipedia-Artikel „SKIP-Argumentation“ bereits stark vereinfacht. Sie werden die Schüler trotzdem herausfordern.*

b) Befürworter der Stammzellenforschung argumentieren dagegen mit dem hohen Wert menschlicher embryonaler Stammzellen für die (künftige) Heilung schwerer Krankheiten durch Ersatz defekter oder fehlender Zellen (z. B. Gehirnzellen bei Parkinson-Krankheit, Nerven­zellen des Rückenmarks bei Querschnittlähmung oder Zellen der Bauchspeicheldrüse bei Dia­be­tes). Nachdem ein Schwangerschaftsabbruch in Deutschland innerhalb der ersten 12 Wochen vom Gesetz her möglich ist, gilt dies auch für 4 Tage alte Embryonen. Der ethische Nutzen sei höher zu bewerten, auch wenn der medizinische Einsatz noch auf sich warten lässt (entspre­chende Forschungsergebnisse gibt es erst bei Nagetieren (Mäusen), nicht aber bei größeren Säugetieren).

Eine Möglichkeit, diesen ethischen Konflikt zu umgehen, könnte darin bestehen, menschliche embryonale Stammzellen aus unbefruchteten Eizellen zu gewinnen, die ohnehin anfallen, wenn Eizellen für künstliche Befruchtung entnommen werden. Durch bestimmte Maßnahmen könnten diese haploiden Zellen veranlasst werden, ihren Chromosomen-Bestand zu verdoppeln und sich dann zu teilen.

*(Religiöse Standpunkte werden im wikipedia-Artikel „Stammzelle“ dargestellt. Ich habe sie hier herausgelassen, weil sich die Religionsgemeinschaften ohnehin der SKIP-Argumente bedie­nen und zusätzliche theologische Argumentationen, z. B. über die Seele, den Rahmen sprengen würden.)*

Beispielaufgabe „Stammzellen“ im Mebis-Raum

„Wenn die Leber versagt – Lebensrettung durch Stammzellen“

Übungsaufgabe zum bioethischen Bewertungsprozess, insbesondere zum praktischen Syllogis­mus