

DAS LERNMODUL ÜBER CRISPR/CAS

PLAY

DAS LERNMODUL ZUR CRISPR/CAS-METHODE

Einführung

Definitionen

Begriffserklärung

Kurzgeschichte

Test



Theorie

CRISPR/Cas
„in freier Wildbahn“

Der CRISPR/Cas
DNA-Abschnitt

Die drei Phasen

Test



Theorie

CRISPR/Cas
im Labor

Modifikationen

Einfache DNA-
Veränderungen

Komplexe DNA-
Veränderungen

Test



Praxis

Probleme und Hürden

Einsatzbeispiele

Die geCRISPRte Zukunft

Ethische Fragen

Test



Definitionen

CRISPR/Cas ist...

„... ein bakterieller Abwehrmechanismus, der DNA von Viren zerschneidet“

Kapitel 2: CRISPR/Cas „in freier Wildbahn“

„... eine molekularbiologische Methode, um DNA gezielt zu zerschneiden und zu verändern“

Kapitel 3: CRISPR/Cas im Labor

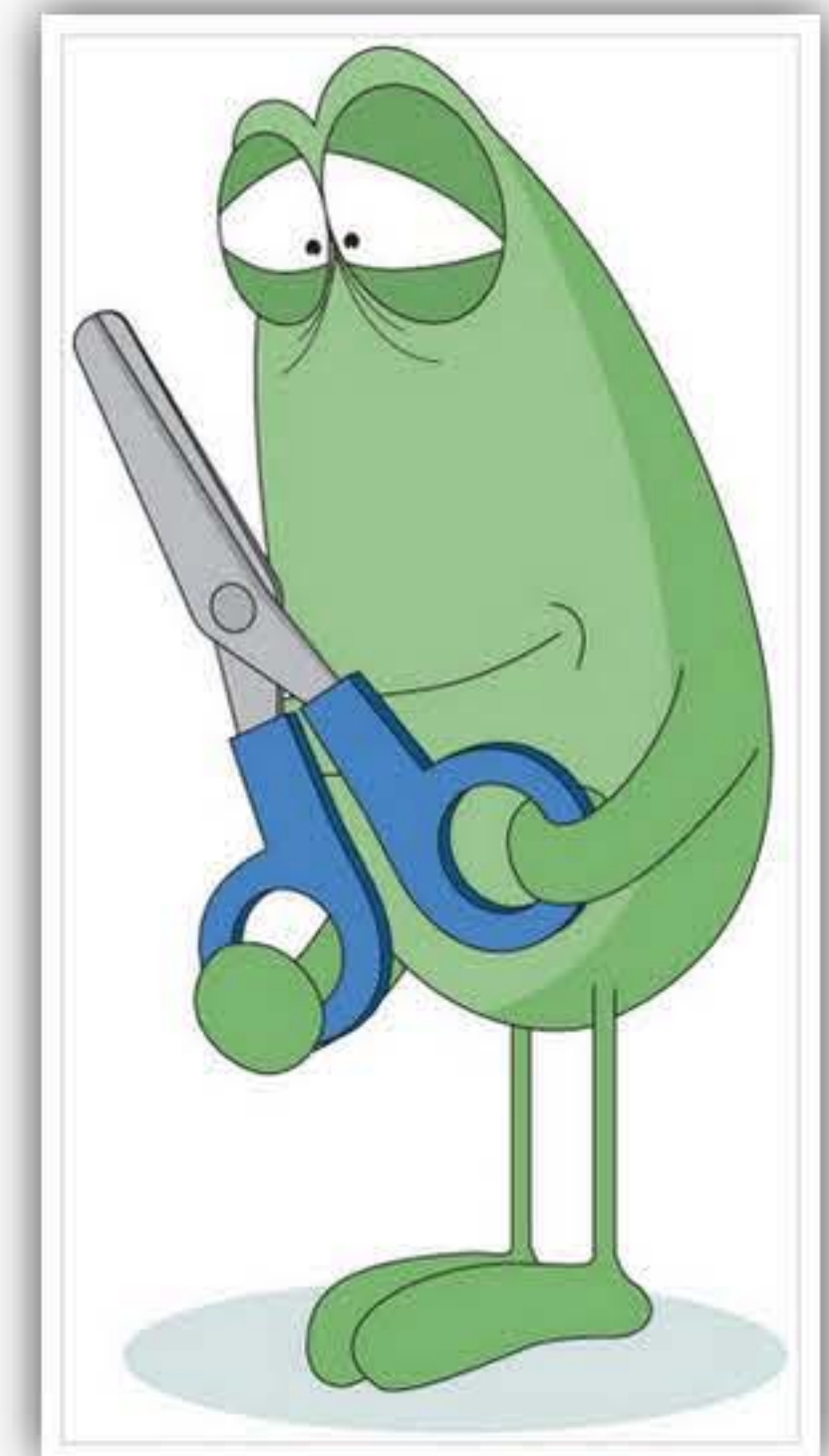


Abb. 1 Darstellung eines Cas9-Proteins

weiter

Definitionen

Das Einführungsvideo gibt einen Überblick über den Theorie-Teil des Lernmoduls.

Es lohnt sich, das Video (Dauer: 1:45 min) bei Bedarf öfter als einmal anzuschauen.

Klicke danach auf weiter.

zurück

weiter

Definitionen



Video überspringen

↺ Video neu starten

weiter

Definitionen

Take-Home Message:

CRISPR/Cas ist ein natürlich vorkommendes Abwehrsystem von Bakterien, das im Labor zu einer Genschere modifiziert wurde.

zurück

weiter

Begriffserklärung

Am einfachsten ist es, beim Begriff selbst zu starten: CRISPR/Cas.

Die Abkürzung beschreibt bereits die wichtigsten Bestandteile des Systems hinter der Gen-Schere. Erst schauen wir auf CRISPR, dann auf Cas. Die Abkürzung CRISPR steht für „Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats“.

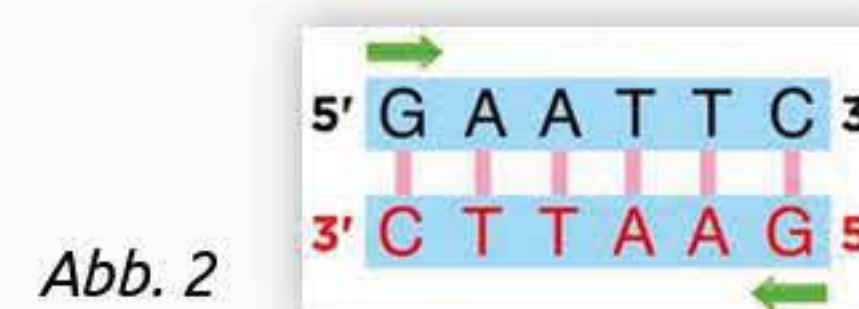
Übersetzt heißt das: „gehäuft auftretende, regelmäßig unterbrochene, kurze palindromische Wiederholungen“.

Nehmen wir diese lange Abkürzung auseinander:

weiter

Begriffserklärung

gehäuft auftretende	regelmäßig	unterbrochene	kurze	palindromische	Wiederholungen	
Clustered	Regularly	Interspaced	Short	Palindromic	Repeats	/ Cas
„gehäuft auftretend“: CRISPR sind DNA-Stücke, die „gehäuft auftreten“.	„regelmäßig unterbrochen“: Die CRISPR DNA-Stücke sind „regelmäßig unterbrochen“.	„Kurz“: Die gehäuft auftretenden DNA-Stücke sind kurz.	„Palindromisch“: Palindrome sind Wörter, die sich vorwärts und rückwärts gleich lesen lassen, z.B. Otto.	„Wiederholungen“: In gewisser Hinsicht eine Doppelung „gehäuft auftretende [...] Wiederholungen“.	„Cas“: steht für „CRISPR-assoziiertes“ Protein.	
Welche Eigenschaften haben diese „gehäuft auftretenden“ DNA-Stücke?	Wodurch? Durch Virus-DNA-Fragmente (<u>Spacer</u>), die von zurückliegenden Angriffen auf das Bakterium stammen.		Die DNA-Stücke sind palindromisch, das heißt, sie haben vorwärts und rückwärts gelesen die selbe Basenfolge.	Jedoch werden CRISPR DNA-Stücke fast immer nur abgekürzt als <u>Repeats</u> bezeichnet!	Sie führen die Abwehrreaktion auf Grundlage des CRISPR-DNA-Abschnitts aus.	



weiter

Begriffserklärung

Take-Home Message:

CRISPR sind DNA-Stücke, die „gehäuft auftreten, regelmäßig unterbrochenen sind und aus kurzen palindromischen Wiederholungen“ bestehen. Sie sind in Bakterien an einem speziellen Abwehrmechanismus gegen Viren beteiligt, der durch die Cas-Proteine ausgeführt wird.

weiter

Kurzgeschichte

- **1987**: CRISPR-DNA im Modellbakterium *E. coli* entdeckt. Die Funktion ist unbekannt.
- **2005**: Formulierung der Hypothese, dass das CRISPR-System eine Verteidigung gegen Viren ist.
- **2007**: CRISPR/Cas-Systeme sind eine adaptive Immunabwehr von Bakterien gegen Viren.
- **2010**: CRISPR/Cas-System schneidet doppelsträngige DNA im Labor.
- **2012**: Das System kann umprogrammiert werden und ist als Genschere in Eukaryoten funktionsfähig.
- **2013-2015**: CRISPR/Cas9 erweist sich als ein revolutionäres Werkzeug für die Genom-Editierung.
- **2020**: Chemie-Nobelpreis für die Erfindung der CRISPR/Cas-Methode.

weiter

Quelle: Bearbeitet aus Doudna & Charpentier (2014), *Science* 346(6213):1258096.

Test

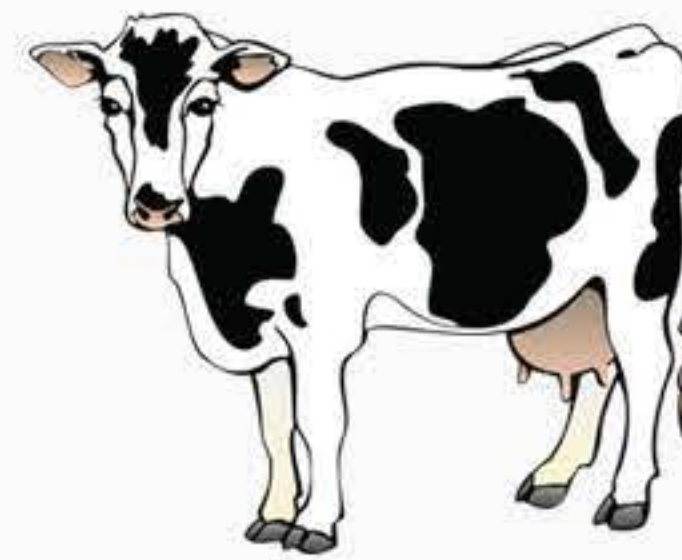
1. Wo findet man CRISPR/Cas hauptsächlich? Klicke die richtige(n) Antwort(en) an.



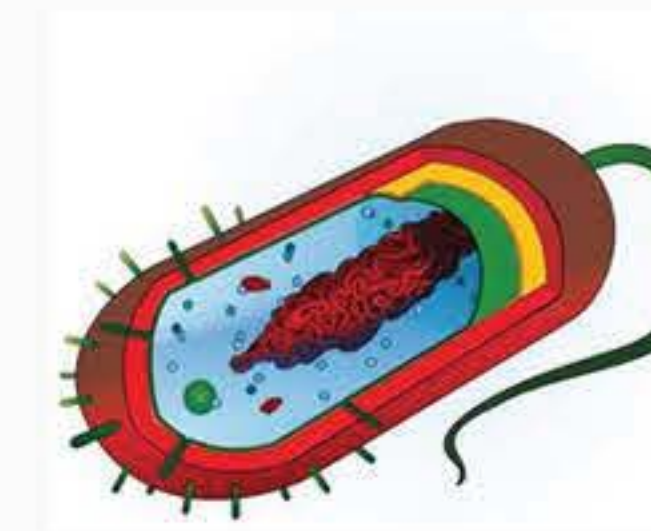
Sonne/Wolke



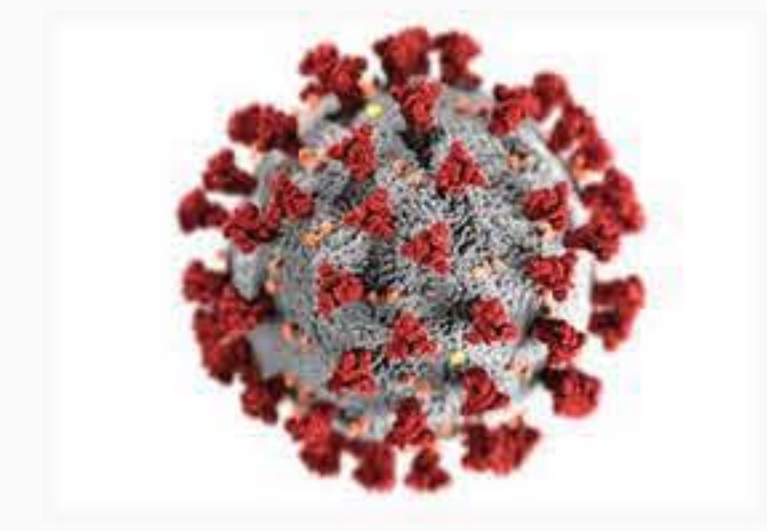
Labor



Kuh



Bakterium



Virus

Antwort überprüfen

Test

2. Was beschreibt die Abkürzung CRISPR?

- ☐ bakterielles Abwehrsystem
- ☐ Ein Protein
- ☐ DNA-Abschnitt
- ☐ palindromische DNA-Stücke

Antwort überprüfen

Test

3. Wofür steht die Abkürzung CRISPR?

- ☐ Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats
- ☐ Clustered Ridiculously Interspaced Short Problematic Repeats
- ☐ Cooperating Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats
- ☐ Capitalisticly Recognised Interspaced Short Palindromic Repeats

Antwort überprüfen

Test

4. In welcher Zeit konnte das CRISPR/Cas9-System zum ersten Mal als Genschere genutzt werden?
Klicke auf die richtige Stelle im Zeitstrahl.



Tipp: Schaue über den Home-Button auf der Folie „Kurzgeschichte“ nach.
Kehre dann über den Zurück-Button unten links auf diese Folie zurück.

KAPITEL 1

abgeschlossen

[WEITER ZU KAPITEL 2](#)

[PDF](#)

CRISPR/Cas in „freier Wildbahn“

Start

In diesem Kapitel betrachten wir den Abwehrmechanismus, der das CRISPR/Cas-System in Bakterien „in freier Wildbahn“ ist. Als Gegenstück wird danach die Funktionsweise der CRISPR/Cas-Methode im Labor erklärt.

Voraussetzung für diesen Abschnitt ist die Kenntnis des Aufbaus von DNA, der Proteinbiosynthese und Grundlagen zu Bakterien und Viren.

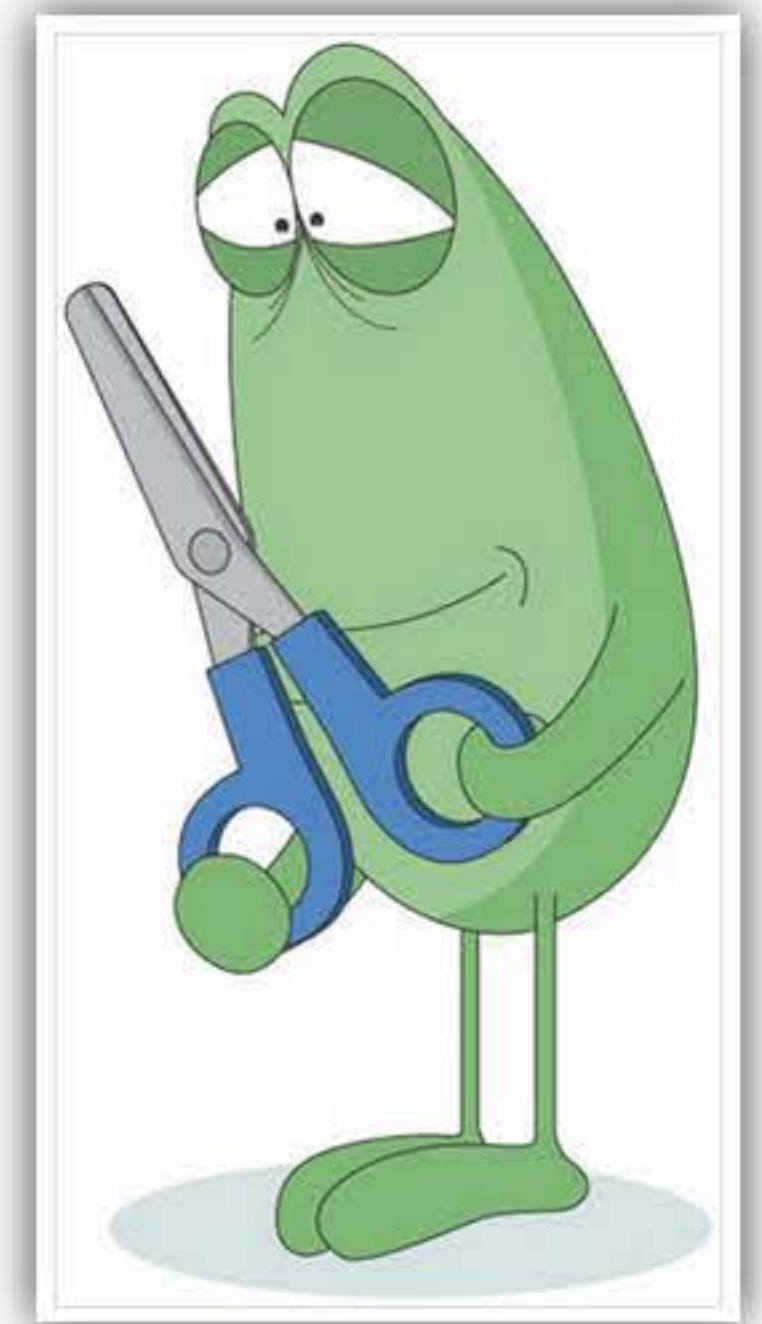


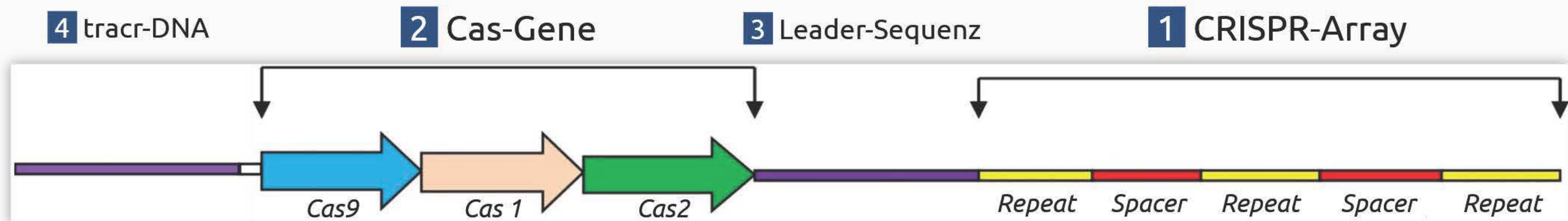
Abb. 1 Darstellung eines Cas9-Proteins

weiter

CRISPR/Cas in „freier Wildbahn“

Der CRISPR/Cas-DNA-Abschnitt

Zu Beginn schauen wir uns den DNA-Abschnitt genauer an, auf dem das bakterielle Abwehrsystem CRISPR/Cas beruht:



tracrRNA:

dient der Verknüpfung von CRISPR-RNA (crRNA) und dem Cas9-Protein

Cas-Gene:

codieren für die Cas-Proteine:
Cas1 und 2 = erkennen Fremd-DNA und bauen sie in das CRISPR-Array ein
Cas9 = schneidet Fremd-DNA auf Grundlage der DNA des CRISPR-Arrays

Leader-Sequenz:

ist der Promotor für das CRISPR-Array.

Repeats:

sich palindromisch wiederholende DNA. Namensgebend für das gesamte System.

Spacer:

DNA von Viren aus zurückliegenden Attacken

weiter

Die drei Phasen des Abwehrmechanismus

Die Funktion des adaptiven „Immunsystems“ von Bakterien

Einleitung: Das Wirkprinzip des bakteriellen CRISPR/Cas-Systems beruht auf der schnellen Wiedererkennung und Zerstörung von Virus-DNA. Obwohl noch nicht alle Schritte dieses „Immunsystems“ bekannt und auch die Funktionen seiner Elemente noch nicht vollständig verstanden sind, hat man die wesentlichen Etappen grundlegend erforscht: Wird ein Bakterium von einem Virus angegriffen, unterteilt sich die Immunreaktion in drei Schritte.

Aufgabe: Lese zuerst den Text und versuche, die drei Phasen des bakteriellen Abwehrmechanismus zu verstehen. Markiere Stellen, die noch unklar sind. Schaue dir danach das Erklärvideo zu den drei Phasen an und entferne die Markierungen im Text, die sich dadurch geklärt haben.

weiter

Die drei Phasen des Abwehrmechanismus

Die Funktion des adaptiven „Immunsystems“ von Bakterien

1) Adaption 2) Expression 3) Interferenz

Injiziert ein Virus einem Bakterium seine DNA, werden die Enzyme **Cas1 und Cas2** aktiv. Cas1 und Cas2 erkennen Virus-DNA und schneiden DNA-Fragmente aus dieser heraus („Protospacer“). Dabei schneiden die Enzyme lediglich an ganz bestimmten Stellen, den so genannten PAM-Sequenzen.

PAM-Sequenzen bestehen aus der Basenabfolge NGG, wobei N eine der vier möglich Basen Adenin, Guanin, Cytosin oder Thymin sein kann. Eine derartige Basenfolge kommt häufig vor. Dort binden Cas1 und Cas2 und schneiden das DNA-Fragment vor dem PAM-Motiv aus. Auf diese Weise wird eine Selbstzerstörung des CRISPR/Cas-Systems vermieden, denn: Das Resultat der Aktivität von Cas1 und Cas2 sind Virus-DNA-Fragmente, die keine PAM-Sequenz mehr enthalten.

Im nächsten Schritt bauen Cas1 und Cas2 die Protospacer in das **CRISPR-Array** des eigenen Genoms ein. Die Abschnitte werden ohne das PAM-Motiv in das CRISPR-Array eingebaut. Dadurch können die Cas-Proteine die im CRISPR-Array eingebaute Virus-DNA nicht zerschneiden. Das CRISPR-Array besteht nun aus den CRISPR, also den „Repeats“, zwischen denen die ursprüngliche Virus-DNA, nun „Spacer“ genannt, eingebaut wurde.

Die drei Phasen des Abwehrmechanismus

Die Funktion des adaptiven „Immunsystems“ von Bakterien

1) Adaption 2) Expression 3) Interferenz

Die Expressions-Phase ist der zweite Schritt des Abwehrmechanismus. Sie hat ein funktionales **Cas9**-Protein als Endprodukt. Cas9 ist in der Lage, aus früheren Attacken bekannte Virus-DNA in kurzer Zeit wiederzuerkennen und zu zerstören.

Strukturell handelt es sich bei einem funktionalen Cas9-Protein um ein Assemblierungsprodukt aus zwei RNA-Sequenzen, der CRISPR-RNA (crRNA), der trans-activating-RNA (tracrRNA) und dem Cas9-Protein. Während die crRNA einen Teil der CRISPR-Array-Informationen, nämlich die eines Spacers, trägt, besteht die Funktion der tracrRNA darin, crRNA und Cas9 miteinander zu verbinden. Dazu ist die tracrRNA in der Lage, mit ihrem 5'-Ende über komplementäre Basenpaarungen mit einem Teil der crRNA zu hybridisieren und sich mit ihrem 3'-Ende an Cas9 anzulagern.

Die drei Phasen des Abwehrmechanismus

Die Funktion des adaptiven „Immunsystems“ von Bakterien

1) Adaption 2) Expression 3) Interferenz

Im dritten Schritt der Abwehrreaktion, der Interferenz-Phase, wird bekannte parasitische DNA identifiziert und gezielt zerschnitten. Dabei erfolgt die Zerstörung dieser DNA durch Cas9 nicht an zufälligen Stellen. Die PAM-Sequenz ist die Erkennungsstelle für die molekulare Schere. Wenn die Virus-DNA vor dem PAM-Motiv mit der gespeicherten DNA-Vorlage, dem Spacer, übereinstimmt, dann zerschneidet Cas9 den viralen DNA-Strang. Durch die PAM-Sequenz wird sichergestellt, dass nur fremde DNA geschnitten wird.

Im folgenden Erklärvideo wird der Mechanismus noch einmal vereinfacht dargestellt.

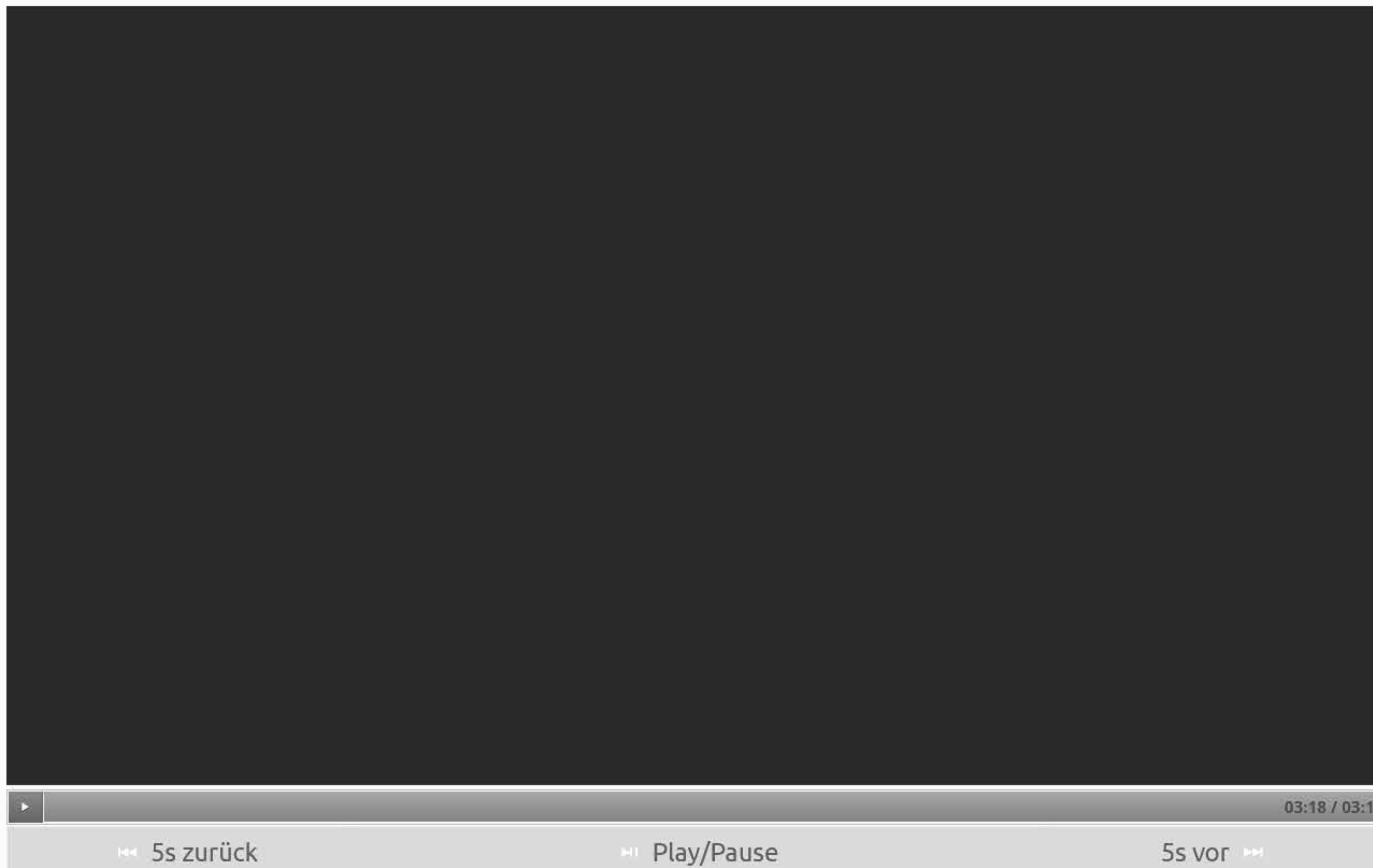
[Video jetzt anschauen](#)

[weiter](#)

CRISPR/Cas in „freier Wildbahn“

Die drei Phasen des Abwehrmechanismus

Die Funktion des adaptiven „Immunsystems“ von Bakterien



Das PAM-Motiv habe ich nicht verstanden:
<https://youtu.be/b4c2sqLtlbs?t=10>

Mir sind die drei Phasen unklar:

Verständnishilfe anzeigen

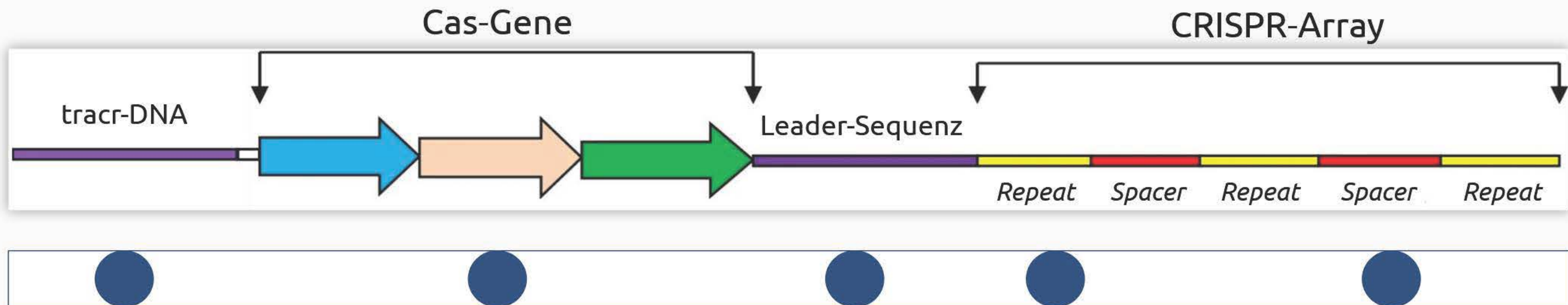
weiter

Video neu starten

CRISPR/Cas in „freier Wildbahn“

Test

1. Ordne den Bestandteilen des CRISPR/Cas DNA-Abschnitts ihre richtige Funktion zu. Ziehe die Beschriftungen dafür auf die blauen Punkte im Kasten unter der Abbildung (Abb. 3).



sich wiederholende DNA-Stücke, dienen als Speicherort für das Bakterium

DNA-Fragmente von Viren

codieren für die CRISPR-assoziierten (Cas) - Proteine

Promotorfunktion

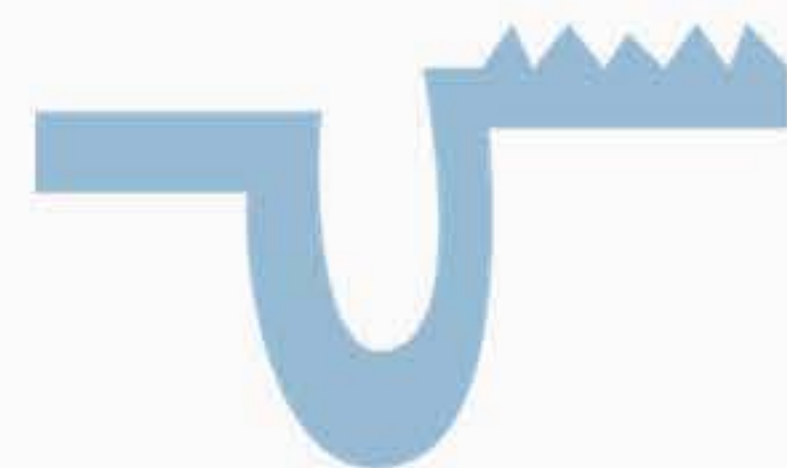
stellt Verbindung zwischen crRNA und Cas9 her

überprüfen

CRISPR/Cas in „freier Wildbahn“

Test

2. Baue das vollständig funktionale Cas9-Protein („Cas9-Endonuklease“) nach.
Ziehe die Bestandteile an die richtige Stelle im Protein.

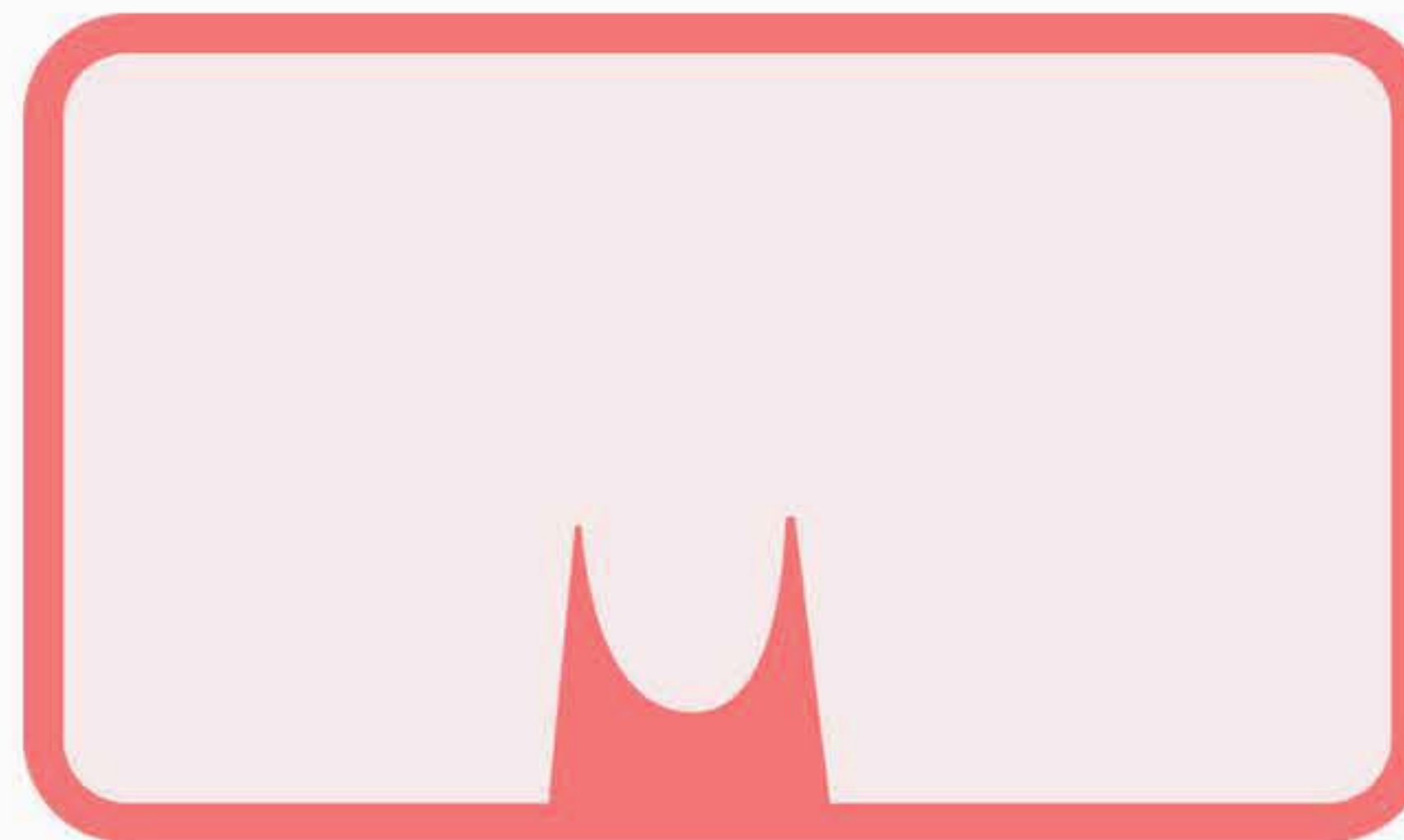


tracrRNA



Spacer Repeat

crRNA



prüfen

DU BIST FERTIG MIT

KAPITEL 2

[WEITER ZU KAPITEL 3](#)

[PDF](#)

Start

Es galt lange Zeit das Dogma: CRISPR/Cas ist für gentechnische Anwendungen viel zu komplex.¹ Doch 2012 schafften es die zwei Wissenschaftlerinnen Emanuelle Charpentier und Jennifer Doudna das System erfolgreich fürs Labor anzupassen.

Seitdem hat sich die CRISPR/Cas-Methode mit rasender Geschwindigkeit in Laboren weltweit verbreitet. Im dritten Kapitel geht es jetzt darum, welche Anpassungen für die Nutzung als Gen-Schere durchgeführt wurden und wie Gen-Editierung mit CRISPR/Cas9 funktioniert.

weiter

¹Czepel u. Dalheimer, „Ich hatte zwei Heureka-Momente“ (Interview mit Emanuelle Charpentier, 2016, URL: <https://science.orf.at/v2/stories/2773282/>)

Modifikationen am System

Im Labor wurde eine Reduktion des Systems herbeigeführt: Die crRNA und die tracrRNA wurden zur sgRNA (single guide RNA) zusammengefasst. Die sgRNA kann synthetisch hergestellt werden. Mithilfe der sgRNA kann das Cas9-Protein an beliebige DNA-Stellen dirigiert werden und dort Doppelstrangbrüche erzeugen.

Das revolutionäre Potenzial (z. B. der Einbau neuer Gene) der CRISPR/Cas9-Methode eröffnet sich jedoch erst durch die Nutzung natürlich vorkommender Reparaturmechanismen in Bakterien: Die NHEJ („Nicht-homologe Endverknüpfung“) und die HR (Homologe Rekombination). Beide Reparaturmechanismen werden im Folgenden kurz erklärt.

weiter

Einfache DNA-Veränderungen (durch NHEJ)

Die erste Möglichkeit stellt die NHEJ („Nicht-homologe Endverknüpfung, engl. non-homologous end-joining) dar. Die Neuverknüpfung eines defekten DNA-Strangs erfolgt zufällig und damit nicht-homolog zur Ursprungsbasenfolge. NHEJ ist in den meisten Fällen mit dem Verlust oder der Insertion eines oder mehrerer Nukleotide verbunden. Das betroffene Gen kann dann nicht mehr richtig abgelesen werden. Es wird inaktiviert.

Im Labor können Gene auf diese Weise zu Forschungszwecken durch Cas9 zielgerichtet ausgeschaltet werden.

weiter

Komplexe DNA-Veränderungen (durch HR)

Der DNA-Reparatur-Mechanismus der homologen Rekombination (HR) ermöglicht Wissenschaftler:innen, neue DNA-Fragmente gezielt an der durch Cas9 hervorgerufenen Schnittstelle einzubauen. Bei der homologen Rekombination nutzt die Zelle einen intakten DNA-Strang, der homolog („gleich“) zum beschädigten DNA-Strang ist. Der homologe DNA-Strang dient bei der Reparatur als Vorlage. Das funktioniert wie folgt: Der intakte DNA-Strang lagert sich an die beschädigte DNA-Stelle an. Die fehlenden Nukleotide des beschädigten Strangs werden nach dem Muster des intakten Strangs neu synthetisiert.

Um Gene einzufügen, wird künstliche DNA in die Zelle gegeben. Diese DNA ist einerseits homolog zur gewünschten Zielsequenz und enthält andererseits ein zusätzliches Gen. Die Zelle greift nun bei der Reparatur automatisch auf die scheinbar homologe DNA zurück. Durch diesen genetischen „Trick“ wird ein vorher nicht vorhandenes Gen in den DNA-Strang eingebaut.

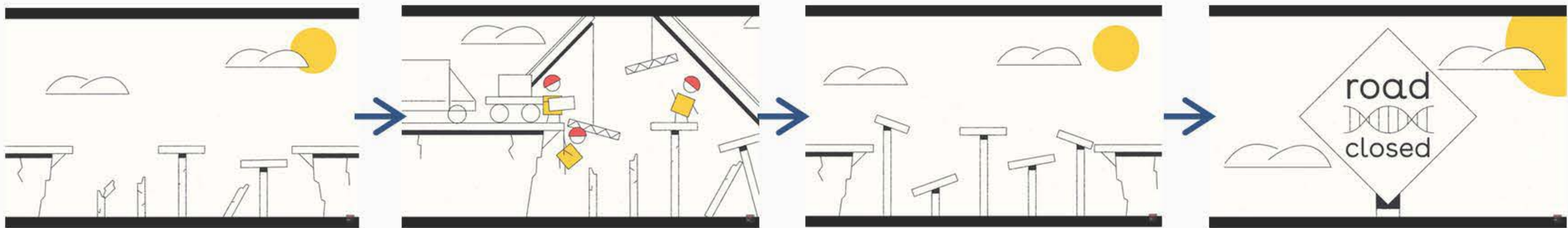
weiter

CRISPR/Cas im Labor

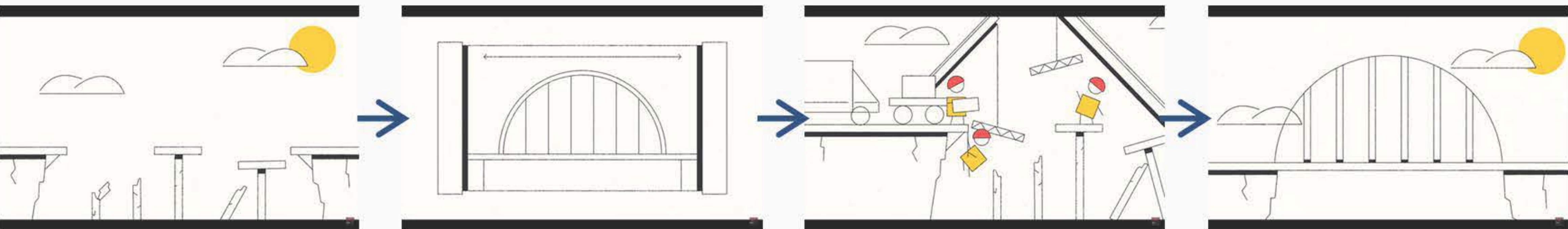
Test

Aufgabe: Die folgenden Bilder stellen die Reparaturmechanismen der Zelle im übertragenen Sinne dar, die beim Gen-Editing mit CRISPR/Cas9 genutzt werden. Ordne den Bilderfolgen den richtigen Reparaturmechanismus zu.

a)



b)



☐ NHEJ (Nicht homologe Endverknüpfung)

☐ HR (Homologe Rekombination)

weiter

Andrea M. Henle, How CRISPR lets you edit DNA, 2019, URL: https://youtu.be/6tw_JVz_IEc?t=198



DU BIST FERTIG

KAPITEL 3

WEITER ZU KAPITEL 4

PDF

Start

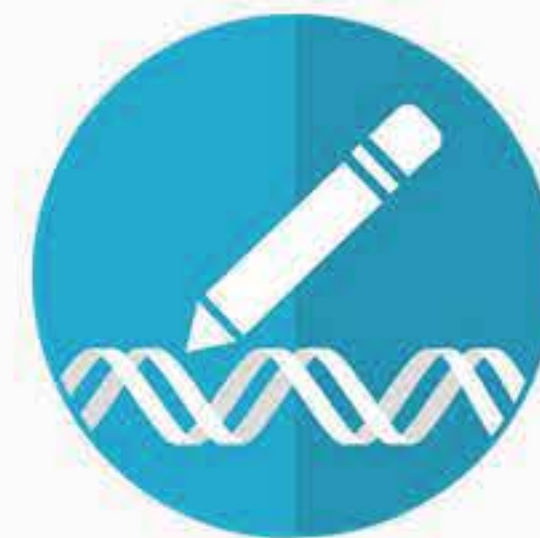
Die Fragen, die der Einsatz der CRISPR/Cas-Methode aufwirft, sind vielfältig:

Welche Probleme und Hürden gibt es beim Einsatz?

Welche praktischen Beispiele für den Einsatz gibt es bereits?

Wie wird ein so mächtiges biologisches Werkzeug unsere Zukunft beeinflussen?

Auch um die ethische Frage, wie wir ein solches Werkzeug einsetzen wollen, wird es in diesem Kapitel gehen.



weiter

Probleme und Hürden

1 Off-target Effekte

- Problem: „Es werden weitere Schnitte an nicht gewünschten Stellen des Genoms durchgeführt.“
- Lösungsansatz: Es werden bereits Methoden entwickelt, die Schnitten an falschen Stellen vorbeugen sollen.

Quelle: Hardt 2019, S. 22, <https://doi.org/10.1515/9783110624472>

2 Mosaikbildung

- Problem: „Die genetische Modifikation betrifft nur Teile aller Zellen, es entstehen genetisch differente Zellen innerhalb eines Organismus.“
- Lösungsansatz: Editierungen so früh wie möglich in der Entwicklung eines Organismus durchführen.

3 Immunität gegen Cas9

- Problem: „Es gibt Menschen mit Antikörpern gegen Cas9. Durch die Immunität kann es zu ungewollten Immunreaktionen bei einer Anwendung von CRISPR/Cas in der Gentherapie kommen.“
- Lösungsansatz: Einsatz alternativer Cas-Proteine, Immunsuppression

Quelle: Anderson et al. 2019, <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09693-x>

weiter

Einsatzbeispiele

Pflanzen



- Tomaten konnten durch eine Genmanipulation durch CRISPR/Cas9 dahingehend verändert werden, dass sie schneller reif werden.

(Lippmann et al. 2017)

Zusammenfassung: <https://www.eurekalert.org/news-releases/502309>

Publikation: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymthe.2017.03.012>

Tiere



- Mäusen konnte eine Immunität gegen HIV verliehen werden, indem ein Gen durch CRISPR/Cas9 deaktiviert wurde.

(Yin et al. 2017)

Publikation: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cell.2017.04.032>

weiter

Einsatzbeispiele

Menschen



- Im Fokus sind derzeit monogene (= auf einem Gen beruhende) Erbkrankheiten. Beispiele: Sichelzellanämie, Mukoviszidose¹
- Erste illegale Anwendung in der Keimbahn (He Jiankui, 2018)
 - Experiment wurde 2018 bekannt und löste weltweite Reaktionen aus
 - Jiankui veränderte das Gen für den Rezeptor CCR5 in Embryonen von Zwillingen, um sie gegen HIV zu immunisieren.²
 - Erste bekannte Anwendung von CRISPR/Cas in der menschlichen Keimbahn.

¹ Hardt 2017, S. 22ff., URL: <https://doi.org/10.1515/9783110624472>

² Marx 2022, URL: <https://www.spektrum.de/news/gentechnik-die-crispr-kinder/1965646>

weiter

Die geCRISPRte Zukunft

Die Forschung zu CRISPR/Cas befindet zurzeit für viele Anwendungen in der Anfangsphase. Darunter wird zu Gentherapien für Sichelzellanämie, Bluterkrankheit, Mukoviszidose, Krebs und HIV/AIDS geforscht.

Aussagen über die Zukunft und Sicherheit von CRISPR/Cas:

Politologin Ingrid Schneider

vs.

Pharmakologe Martin Lohse



Hintergrund: <https://www.leopoldina.org/themen/genomchirurgie/genomchirurgie-pro-und-contra/>

weiter

Ethische Fragen

Aufgabe: Was hältst du für angemessen? Ziehe die nachfolgenden Aussagen auf die Felder „erlaubt“, „unklar“ oder „verboten“. Auf der nächsten Folie kann die eigene Einordnung mit der aktuellen rechtlichen Lage verglichen werden.

„Pflanzen dürfen mit CRISPR/Cas verändert werden“

„Durch CRISPR/Cas veränderte Lebensmittel dürfen verkauft werden (USA)“

„An somatischen Zellen darf für die Gentherapie geforscht werden“

„Durch CRISPR/Cas veränderte Lebensmittel dürfen verkauft werden (Deutschland)“

„An menschlichen Embryonen darf mit CRISPR/Cas geforscht werden“

„Bei monogenen Erbkrankheiten wie HIV darf in die menschliche Keimbahn eingegriffen werden“

erlaubt

unklar

verboten

weiter

Ethische Fragen

Auflösung:

Auflösung mit den eigenen Antworten vergleichen

„An somatischen Zellen darf für die Gentherapie geforscht werden“

„Pflanzen dürfen mit CRISPR/Cas verändert werden“

„Durch CRISPR/Cas veränderte Lebensmittel dürfen verkauft werden (USA)“

erlaubt

„An menschlichen Embryonen darf mit CRISPR/Cas geforscht werden“

unklar

„Durch CRISPR/Cas veränderte Lebensmittel dürfen verkauft werden (Deutschland)“

„Bei monogenen Erbkrankheiten wie HIV darf in die menschliche Keimbahn eingegriffen werden“

verboten

Erörterung ethischer Fragen:

<https://www.forschung-und-lehre.de/zeitfragen/ethische-reflexionen-zur-crispr-technologie-184>
(Dabrock, P. & Braun, M., 2017)

weiter

Praxis: Heutiger Einsatz

Test

Wiederholung: Wähle für die unten stehenden praktischen Probleme beim Einsatz von CRISPR/Cas9 die richtige Beschreibung aus.

Off-target-Effekt

--Auswählen--

Mosaik-Effekt

--Auswählen--

Cas9-Immunität

--Auswählen--

prüfen

DU BIST FERTIG

KAPITEL 4

LERNMODUL BEENDEN PDF

Literaturverzeichnis

- Anderson, K. S., Kiani, S., Ebrahimkhani, M. R., Park, J. G., Krishna, S., Moghadam, F., Ewaisha, R. & Ferdosi, S. R. (2019). Multifunctional CRISPR-Cas9 with engineered immunosilenced human T cell epitopes. *Nature Communications*, 10(1842). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09693-x>
- Barman, A., Deb, B. & Chakraborty, S. (2020). A glance at genome editing with CRISPR-Cas9 technology. *Current Genetics*, 2020(66), 447-462. <https://doi.org/10.1007/s00294-019-01040-3>
- Czepel, R. & Dalheimer, B. (2016), Ich hatte zwei Heureka-Momente. Interview mit Emmanuelle Charpentier. <https://science.orf.at/v2/stories/2773282/>
- Doudna, J. A., Charpentier, E., Chylinski, K., Jinek, M., Fonfara, I. & Hauer, M. (2012). A Programmable Dual-RNA-Guided DNA Endonuclease in Adaptive Bacterial Immunity, 337(6096), 816-821. <https://doi.org/10.1126/science.1225829>
- Hardt, A. (2019). Technikfolgenabschätzung des CRISPR/Cas-Systems: Über die Anwendung in der menschlichen Keimbahn. De Gruyter. <https://doi.org/10.1515/9783110624472>
- Lippmann, Z. B. et al. (2017). Bypassing Negative Epistasis on Yield in Tomato Imposed by a Domestication Gene. *Cell*(169), 1142-1155. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cell.2017.04.032>
- Marx, V. (2022). Die CRISPR-Kinder. <https://www.spektrum.de/news/gentechnik-die-crispr-kinder/1965646> (Abruf am 04.07.2022).
- Yin, C., Zhang, T., Qu, X., Zhang, Y., Putatunda, R., Xiao, X., Li, F., Xiao, W., Zhao, H., Dai, S., Qin, X., Mo, X., Young, W.-B., Khalili, K. & Hu, W. (2017). In Vivo Excision of HIV-1 Provirus by saCas9 and Multiplex Single-Guide RNAs in Animal Models. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymthe.2017.03.012>

weiter



Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1 Du Toit, A. (2014). Activating and guiding Cas9. Nat Rev Microbiol 12, 237. <https://doi.org/10.1038/nrmicro3237>
Abb. 2 Professor Dave Explains (2021), CRISPR-Cas9 Genome Editing Technology. <https://youtu.be/liPL5HgPehs?t=86>
Abb. 3 Barman, A. (2020), A glance at genome editing with CRISPR–Cas9 technology, S. 449. <https://doi.org/10.1007/s00294-019-01040-3>
Abb. 4 Barman, A. (2020), A glance at genome editing with CRISPR–Cas9 technology, S. 451. <https://doi.org/10.1007/s00294-019-01040-3>

Alle weiteren Abbildungen sind über Articulate Storyline 360 lizenziert.

weiter

