



Co-funded by
the European Union

Was ist das Humangenomprojekt?



BIOS4YOU
AR 2.0

BIO-INSPIRED STEM TOPICS FOR ENGAGING YOUNG GENERATIONS
THANKS TO THE USE OF AUGMENTED REALITY

Project Number: 2023-1-DE03-KA220-SCH-000126516

"Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them."

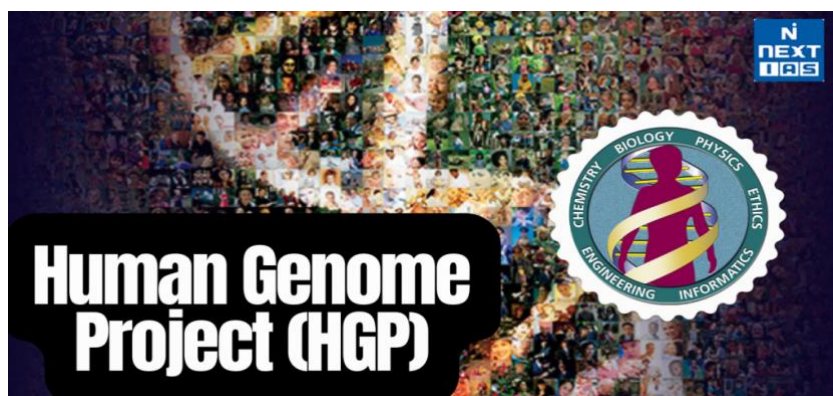




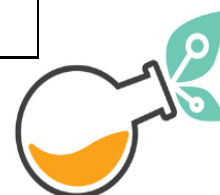
Inhaltsverzeichnis

Einleitung:	4
1: Entdecken	5
Warum das menschliche Genom erforschen?	5
Große Ziele, große Teamarbeit	5
Wie wurde die DNA sequenziert?	6
Woher stammte die DNA?	7
Ethische Überlegungen	7
Bleibendes Vermächtnis	8
2: Umsetzung	9
3: Verbessern	11
AR-Elemente für Delightex – Lernziele und Quellen	13
Fazit	16
Referenzen	18





Allgemeines Thema des Lernpfads	Das Humangenomprojekt und die Genommedizin
Spezifischer Name der Lerneinheit	Was ist das Humangenomprojekt?
Alter der Zielgruppe	14–18 Jahre
Anforderungen an die Lernenden	Grundkenntnisse über DNA, Gene und Molekularbiologie; Vertrautheit mit wissenschaftlicher Forschung; Interesse an Wissenschaftsgeschichte und biomedizinischer Forschung
Beschreibung der Lerneinheit	Diese Einheit führt die Schüler in das Humangenomprojekt (HGP) ein, eine bahnbrechende internationale Forschungsinitiative, die erfolgreich das menschliche Genom entschlüsselt hat. Die Lernenden setzen sich mit den Zielen, Technologien, wichtigsten Mitwirkenden sowie den sozialen und ethischen Implikationen auseinander. Durch interaktive Inhalte, darunter AR-Erlebnisse und historische Fallstudien, verstehen die Schüler die wissenschaftliche Bedeutung und das bleibende Vermächtnis des HGP.
Thema: Beteiligte Parteien	Lehrer für Naturwissenschaften, Biologielehrer, IKT-/AR-Moderatoren, Schüler, optionale Gäste aus dem Bereich der biomedizinischen Forschung oder Genomik





Stichworte	Humangenomprojekt, DNA-Sequenzierung, Genomik, Biotechnologie, internationale Zusammenarbeit, Ethik in der Forschung, Datenaustausch, biomedizinische Innovation
Wichtige Qualifikationen, Fähigkeiten und Kenntnisse, die erworben werden können	Verständnis der Errungenschaften des Humangenomprojekts und seiner Durchführung Einblick in die globale wissenschaftliche Zusammenarbeit und wissenschaftliche Meilensteine Bewusstsein für Datenethik, Datenschutz und Genomik Vertrautheit mit Genomsequenzierungstechnologien (z. B. Sanger-Sequenzierung) Entwicklung digitaler Kompetenz durch AR-Tools Kritische Reflexion über die gesellschaftlichen Auswirkungen genomischer Erkenntnisse
Verwendete Ressourcen und didaktische Hilfsmittel	Archiv und Informationsblätter des NHGRI-Projekts zur Erforschung des menschlichen Genoms Visuelle Zeitleisten, Fotos aus dem NHGRI-Fotoarchiv Augmented-Reality-App (z. B. MolecularAR oder GenomeAR) Interaktive Arbeitsblätter, Präsentationen und Quizfragen Gruppenaktivitäten zur Simulation der HGP-Planung oder der Ethikkommission
Bewertungskriterien und Evaluierung	Verständnis der wichtigsten Meilensteine des HGP Fähigkeit, Sequenzierungsmethoden und -ergebnisse zu beschreiben Kritische Antworten auf ethische Fragen Beteiligung an AR-Lernmodulen Gruppenarbeit und Teilnahme am Unterricht





Einführung:

Das Humangenomprojekt (HGP) war eines der wichtigsten wissenschaftlichen Projekte des 20. Jahrhunderts. Es wurde zwischen 1990 und 2003 durchgeführt und hatte zum Ziel, das gesamte menschliche Genom zu kartieren und zu sequenzieren – also die gesamte DNA, die Informationen darüber enthält, wie der menschliche Körper aufgebaut ist und funktioniert. Wissenschaftler aus vielen Ländern, darunter den Vereinigten Staaten, Großbritannien, Frankreich, Deutschland, Japan und China, arbeiteten gemeinsam an diesem großen internationalen Projekt. Ihre Zusammenarbeit legte den Grundstein für die moderne Genomik und veränderte die Art und Weise, wie Wissenschaftler die menschliche Biologie erforschen (National Human Genome Research Institute [NHGRI], 2024).

Das Humangenomprojekt hat das wissenschaftliche Verständnis von Vererbung, genetischen Krankheiten und menschlichen Variationen erheblich verbessert. Es hat auch die Art und Weise verändert, wie wissenschaftliche Forschung betrieben wird, indem es den offenen Datenaustausch und die Zusammenarbeit zwischen verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen gefördert hat (Collins, Morgan & Patrinos, 2003). Diese Prinzipien sind nach wie vor von wesentlicher Bedeutung für die moderne Genomforschung und biomedizinische Innovation.

In dieser Lerneinheit untersuchen die Schüler, was das Humangenomprojekt war, warum es wichtig war und wie Wissenschaftler die menschliche DNA erfolgreich entschlüsselt haben. Sie befassen sich auch mit ethischen Herausforderungen im Zusammenhang mit der Genomforschung, wie z. B. genetischer Privatsphäre und verantwortungsvollem Umgang mit genetischen Daten (Green & Guyer, 2015). Mithilfe von Augmented-Reality-Tools (AR) interagieren die Schüler mit DNA-Modellen und Sequenzierungsprozessen, wodurch sie die wissenschaftlichen Methoden und Entdeckungen, die aus dem Humangenomprojekt hervorgegangen sind, besser verstehen können.





1: Erkunden

Warum das menschliche Genom erforschen?

Jeder lebende Organismus hat ein Genom – einen vollständigen Satz von DNA-Anweisungen. Das menschliche Genom lässt sich mit einem sehr umfangreichen Handbuch vergleichen, das erklärt, wie unser Körper aufgebaut ist und wie er funktioniert. Es sagt den Zellen, wie sie wachsen, sich entwickeln und auf die Umwelt reagieren sollen.

Anfang der 1990er Jahre verfügten Wissenschaftler bereits über fortschrittliche Mikroskope und genetische Werkzeuge, aber sie hatten noch nie das gesamte menschliche Genom als eine vollständige Sequenz gelesen. Deshalb war das Humangenomprojekt (HGP) so wichtig – sein Hauptziel war es, erstmals die gesamte menschliche DNA zu sequenzieren (NHGRI, 2024).

Durch die Erforschung des menschlichen Genoms können Wissenschaftler besser verstehen, warum manche Menschen Krankheiten wie Krebs, Diabetes oder vererbte genetische Störungen entwickeln. Dieses Wissen hilft Forschern auch dabei, Behandlungen zu verbessern und neue Medikamente zu entwickeln. Darüber hinaus trägt die Genomforschung dazu bei, die menschliche Evolution zu erklären und zu verstehen, warum jeder Mensch genetisch einzigartig ist (Green & Guyer, 2015).

Große Ziele, große Teamarbeit

Das Humangenomprojekt wurde 1990 offiziell ins Leben gerufen und hatte fünf Hauptziele:

- Identifizierung aller Gene in der menschlichen DNA
- Bestimmung der Sequenz von etwa 3 Milliarden DNA-Basenpaaren
- Genetische Informationen in öffentlichen Datenbanken speichern
- Verbesserung der Instrumente zur Analyse genetischer Daten
- Behandlung ethischer, rechtlicher und sozialer Fragen (ELSI) im Zusammenhang mit der Genomforschung (Collins et al., 2003)





Das Projekt war eine globale Zusammenarbeit. Wissenschaftler aus den Vereinigten Staaten, dem Vereinigten Königreich, Frankreich, Deutschland, Japan und China arbeiteten zusammen. Mehr als 20 Forschungseinrichtungen beteiligten sich und bildeten das Internationale Konsortium zur Sequenzierung des menschlichen Genoms. Diese groß angelegte Zusammenarbeit zeigte, wie internationale Teamarbeit den wissenschaftlichen Fortschritt beschleunigen kann.



Abbildung 2: Präsident Bill Clinton und Dr. Francis Collins im Jahr 2000 im Weißen Haus bei der Bekanntgabe des Entwurfs des menschlichen Genoms. Quelle: NHGRI-Fotoarchiv.

Wie wurde die DNA sequenziert?

Die DNA-Sequenzierung lässt sich mit dem Lesen der Buchstaben eines sehr langen Buches vergleichen. Während des Humangenomprojekts verwendeten Wissenschaftler hauptsächlich eine Methode namens Sanger-Sequenzierung. Bei dieser Technik werden kleine DNA-Fragmente viele Male kopiert. Es wurden spezielle Chemikalien hinzugefügt, sodass jede DNA-Base – A, T, C oder G – ein Signal erzeugte, das mit Lasern erkannt





werden konnte. Computer lasen dann diese Signale und rekonstruierten die DNA-Sequenz (Collins et al., 2003).

Obwohl die Sanger-Sequenzierung im Vergleich zu den heutigen Methoden langsam war, gelang es Wissenschaftlern bis 2003, mehr als 90 % des menschlichen Genoms zu sequenzieren. Dank neuer Technologien kann dieselbe Aufgabe heute in nur wenigen Stunden und zu wesentlich geringeren Kosten durchgeführt werden – oft unter 1.000 US-Dollar pro Genom (T2T Consortium, 2022).

Woher stammt die DNA?

Um eine „Referenz“ für das menschliche Genom zu erstellen, verwendeten die Forscher anonyme DNA-Proben. Der Großteil der DNA stammte von Freiwilligen aus Buffalo, New York. Etwa 70 % der endgültigen Sequenz stammten von einem Spender, während die restlichen Daten von 19 anderen Personen stammten. Alle Proben wurden anonymisiert, um die Privatsphäre der Spender zu schützen und den Missbrauch persönlicher genetischer Informationen zu verhindern (NHGRI, 2024).



Abbildung 3: Einrichtung eines DNA-Sequenzierungslabors zur Zeit des Humangenomprojekts. Quelle: NHGRI-Fotoarchiv.





Ethische Überlegungen

Von Anfang an war den am Humangenomprojekt beteiligten Wissenschaftlern bewusst, dass Genomdaten schwerwiegende ethische Fragen aufwerfen könnten. Könnten genetische Daten beispielsweise dazu verwendet werden, Menschen am Arbeitsplatz oder bei der Krankenversicherung zu diskriminieren? Sollten Gentests für ungeborene Kinder erlaubt sein?

Um diesen Bedenken Rechnung zu tragen, schuf das HGP das ELSI-Programm (Ethical, Legal, and Social Implications) und widmete etwa 5 % des Gesamtbudgets des Projekts der ethischen Forschung. Dies war eines der ersten großen wissenschaftlichen Projekte, bei dem Ethik als Kernkomponente der Arbeit berücksichtigt wurde (Green & Guyer, 2015).

Bleibendes Vermächtnis

Das Humangenomprojekt endete nicht im Jahr 2003. Seine Ergebnisse öffneten die Tür zu personalisierter Medizin, Gentests, Ahnenforschung und vielen modernen biomedizinischen Technologien. Das Projekt förderte auch die offene Wissenschaft durch Richtlinien wie die Bermuda-Prinzipien, die Wissenschaftler dazu ermutigten, genetische Daten schnell und frei zu teilen, anstatt sie bis zur Veröffentlichung geheim zu halten (Collins et al., 2003).

Im Jahr 2022 haben Forscher mithilfe fortschrittlicher Sequenzierungstechnologien die erste wirklich vollständige Sequenzierung des menschlichen Genoms abgeschlossen. Diese Errungenschaft füllte Lücken, die während des ursprünglichen HGP nicht gelesen werden konnten, und zeigte, wie weit die Genomwissenschaft seit 2003 fortgeschritten ist (T2T Consortium, 2022).





2: Ausführen

In dieser Phase wenden die Schüler ihr Wissen über das Humangenomprojekt in interaktiven und praxisorientierten Lernaktivitäten an, die für die Verwendung in Delightex entwickelt wurden. Der Schwerpunkt liegt darauf, zu verstehen, wie Genomdaten in realen wissenschaftlichen und sozialen Kontexten untersucht, erklärt und verwendet werden, ohne dass die Schüler komplexe Laboraufgaben ausführen müssen.

Mit Delightex erkunden die Schüler dreidimensionale Modelle von DNA und Chromosomen, die direkt in die Lernumgebung eingebettet sind. Diese visuellen Modelle helfen den Lernenden, die Doppelhelixstruktur der DNA, die Basenpaarung und die Chromosomenorganisation klar zu erkennen. Durch Drehen und Vergrößern der Modelle vertiefen die Schüler ihr Verständnis der Genomstruktur und verbinden abstraktes Lehrbuchwissen mit visuellen Darstellungen (NHGRI, 2024). Als visuelle Unterstützung können Lehrer Links zu kurzen Animationsvideos wie „DNA Structure and Function“ (DNA-Struktur und -Funktion) von Khan Academy einfügen, in denen die Bestandteile der DNA auf klare und altersgerechte Weise erklärt werden: <https://www.khanacademy.org/science/ap-biology/gene-expression-and-regulation/dna-and-rna-structure/v/dna-structure-and-function>

Um das Verständnis dafür zu fördern, wie das Humangenomprojekt die DNA sequenziert hat, sehen sich die Schüler kurze Erklärvideos an, die in Delightex eingebettet oder verlinkt sind. Diese Videos vermitteln die Grundidee der Sanger-Sequenzierung und zeigen, wie Wissenschaftler DNA-Fragmente lesen und zu einem vollständigen Genom zusammenfügen. Ein empfehlenswertes Beispiel ist das NHGRI-Lehrvideo „How the Human Genome Was Sequenced“ (Wie das menschliche Genom sequenziert wurde), das den Prozess in einfachen Worten erklärt und ihn direkt mit dem HGP in Verbindung





bringt (NHGRI, 2024):

<https://www.genome.gov/education/educational-resources>

Nachdem sie das Video angesehen haben, beantworten die Schüler Reflexionsfragen in Delightex, beispielsweise warum die DNA in kleinen Stücken sequenziert werden musste und wie Computer den Wissenschaftlern dabei halfen, das gesamte Genom zusammenzusetzen. Dies hilft den Lernenden, die Informationen aktiv zu verarbeiten, anstatt den Inhalt nur passiv anzusehen (Collins et al., 2003).

Anschließend erkunden die Schüler anhand interaktiver Genbeispiele die praktische Anwendung von Genomdaten. In Delightex-Szenen enthalten Chromosomenbilder hervorgehobene Genregionen, wie beispielsweise das BRCA1-Gen, das mit dem Brustkrebsrisiko in Verbindung steht. Durch Auswahl dieser Marker lesen die Lernenden kurze Erklärungen zur Genfunktion und dazu, wie genetische Mutationen die Entwicklung von Krankheiten beeinflussen können. Diese Aktivität verbindet das Humangenomprojekt mit der modernen Genommedizin und zeigt, wie Genomdaten die medizinische Forschung unterstützen (Green & Guyer, 2015). Eine optionale Zusatzressource ist die NHGRI-Seite „Was ist BRCA?“, die für ein allgemeines Publikum geschrieben wurde:

<https://www.genome.gov/genetics-glossary/BRCA>

Ethisches Denken ist ein wichtiger Bestandteil der Ausführungsphase. Den Schülern werden kurze, szenariobasierte Situationen im Zusammenhang mit der Nutzung genomischer Daten präsentiert, wie z. B. Gentests, Datenschutz oder Zugang zu medizinischen Informationen. Diese Szenarien erscheinen als Informationstafeln in Delightex und fordern die Schüler auf, sich mit Fragen zu beschäftigen, wie z. B. wer Zugang zu genetischen Daten haben sollte und wie Missbrauch zu Diskriminierung führen könnte. Jedes Szenario ist mit dem Programm „Ethical, Legal, and Social Implications“ (ELSI) des Humangenomprojekts verknüpft, das einen Teil seines Budgets für die Untersuchung dieser Fragen bereitgestellt hat (Green & Guyer, 2015). Weitere Informationen finden die Schüler auf der Übersichtsseite des NHGRI ELSI: <https://www.genome.gov/about-genomics/policy-issues/ELSI>





Um die Bedeutung der Zusammenarbeit in der groß angelegten Wissenschaft hervorzuheben, nehmen die Schüler an einer angeleiteten, rollenbasierten Diskussion teil, die vom ursprünglichen Humangenomprojekt inspiriert ist. Die Lernenden übernehmen vereinfachte Rollen wie Wissenschaftler, Datenmanager oder Ethiker und diskutieren Herausforderungen im Zusammenhang mit internationaler Zusammenarbeit und Datenaustausch. Dies spiegelt wider, wie Wissenschaftler aus verschiedenen Ländern zusammenarbeiteten und offene Datenprinzipien wie die Bermuda-Prinzipien befolgten, die einen schnellen Datenaustausch förderten (Collins et al., 2003).

Während der gesamten Durchführungsphase erhalten die Schüler Feedback durch kurze Quizfragen, Reflexionsaufgaben und von Lehrern geleitete Diskussionen. Diese Aktivitäten tragen dazu bei, das Verständnis von „ „ zu festigen und wissenschaftliche Erkenntnisse mit ethischer und sozialer Verantwortung zu verknüpfen. Am Ende dieser Phase haben sich die Lernenden aktiv mit realen Beispielen, Technologien und Herausforderungen im Zusammenhang mit dem Humangenomprojekt auseinandergesetzt und sind damit auf tiefere Reflexionen und Vertiefungen im nächsten Abschnitt vorbereitet.

3: Vertiefen

In dieser Phase wird das Gelernte durch Reflexion, visuelle Verstärkung und sinnvolle Verbindungen zur realen Wissenschaft vertieft und erweitert. Augmented Reality (AR) spielt dabei eine wichtige Rolle, indem sie den Schülern hilft, von einem grundlegenden Verständnis zu kritischem Denken und einer persönlichen Interpretation des Genomwissens überzugehen.

Mit Delightex wiederholen die Schüler wichtige Konzepte aus dem Humangenomprojekt anhand interaktiver 3D-Modelle und kurzer Medienressourcen. So werden beispielsweise DNA- und Chromosomenmodelle erneut untersucht, diesmal jedoch mit Schwerpunkt auf Funktion und Anwendung und nicht nur auf der Struktur. Die Schüler können Chromosomen drehen und untersuchen und dabei darüber nachdenken, wie die Genomkartierung die Identifizierung von Genen ermöglicht hat, die mit Krankheiten und





Merkmale in Verbindung stehen (NHGRI, 2024). Diese wiederholte Interaktion fördert das langfristige Behalten und das konzeptionelle Verständnis.

Um das Verständnis zu vertiefen, sehen sich die Lernenden kurze, hochwertige Erklärvideos an, die innerhalb der AR-Umgebung verlinkt sind. Ein gutes Beispiel hierfür ist das Video „The Human Genome Project Explained“ von TED-Ed, das die Ziele, Herausforderungen und Ergebnisse des Projekts auf visuell ansprechende Weise zusammenfasst und für Schüler der Sekundarstufe geeignet ist: <https://ed.ted.com/lessons/the-human-genome-project-tania-simoncelli>

Nach dem Anschauen beantworten die Schüler Reflexionsfragen, beispielsweise wie das Wissen über das Genom die Medizin verändert hat und ob ähnliche Großprojekte in Zukunft finanziert werden sollten (Collins et al., 2003).

Genombezogene AR-Aufgaben helfen den Schülern auch dabei, wissenschaftliche Inhalte mit der modernen Medizin zu verknüpfen. Beispielsweise untersuchen die Lernenden hervorgehobene Gene, die mit Gesundheitszuständen in Verbindung stehen, und diskutieren, wie die Genomsequenzierung die Früherkennung und personalisierte Behandlung unterstützt. Dies stellt eine direkte Verbindung zwischen dem Humangenomprojekt und der Genommedizin her und hilft den Schülern, dessen Relevanz über die Geschichte hinaus zu erkennen (Green & Guyer, 2015). Zur Vertiefung können die Schüler die NHGRI-Seite „Genomik und Medizin“ besuchen, auf der reale Anwendungen in leicht verständlicher Sprache erklärt werden: <https://www.genome.gov/health/genomics-and-medicine>

Gamifizierte Lernelemente steigern die Motivation zusätzlich. In Delightex können Lehrkräfte kurze „Genom-Missionen“ entwerfen, in denen die Schüler Informationen sammeln, Inhalte freischalten oder Herausforderungen bewältigen, wie beispielsweise die richtige Funktion von Genomdatenbanken zu identifizieren oder Sequenzierungstechnologien ihrem Zweck zuzuordnen. Diese Aktivitäten fördern aktives Lernen und halten gleichzeitig die kognitive Belastung für Lernende der Niveaustufen B1–B2 überschaubar.





Auch die ethische Reflexion wird in dieser Phase verstärkt. Die Schüler beschäftigen sich erneut mit zuvor behandelten ethischen Fragen, wie beispielsweise dem Schutz genetischer Daten oder dem Zugang zu Genomdaten, und setzen diese in Beziehung zu aktuellen Debatten. AR-Panels können kurze Fallbeispiele und Leitfragen im Zusammenhang mit dem ELSI-Programm des Humangenomprojekts enthalten, die die Lernenden dazu anregen, sich eine eigene Meinung zu bilden und diese zu begründen (Green & Guyer, 2015).

Eine weitere Referenzquelle ist die NHGRI-ELSI-Übersicht:

<https://www.genome.gov/about-genomics/policy-issues/ELSI>

Um ihre Lernergebnisse zu demonstrieren, können die Schüler kurze Erklärungen mit Screenshots aus AR-Szenen erstellen oder kurze Video-Reflexionen aufzeichnen, in denen sie beschreiben, was sie über Genomsequenzierung oder ethische Verantwortung gelernt haben. Diese Ergebnisse tragen dazu bei, wissenschaftliches Verständnis, digitale Kompetenz und Kommunikationsfähigkeiten zu verbinden.

Insgesamt fördert die Vertiefungsphase ein tieferes Verständnis, Reflexion und Wissenstransfer. Durch die Kombination von AR-Erkundung, zuverlässigen wissenschaftlichen Ressourcen und angeleiteter Reflexion stärken die Schüler ihre Fähigkeit, Genomik sowohl als wissenschaftliches als auch als gesellschaftliches Feld zu verstehen. Dies bereitet sie auf das zukünftige Lernen in den Bereichen Biologie, Medizin und Biotechnologie vor und fördert gleichzeitig ein fundiertes und verantwortungsbewusstes Denken über genetische Daten.





AR-Elemente für Delightex – Lernziele und Quellen

AR-Element (Delightex)	Lernziel	Quelle/Link
3D-Modell der DNA-Doppelhelix	Grundlegende Struktur der DNA und Basenpaarung (A–T, C–G) verstehen	Khan Academy. <i>Struktur und Funktion der DNA</i> . https://www.khanacademy.org/science/ap-biology/gene-expression-and-regulation/dna-and-rna-structure
3D-Chromosomenmodell	Verstehen Sie, wie DNA in Chromosomen organisiert ist und wie das Genom strukturiert ist	National Human Genome Research Institute (NHGRI). <i>Humangenomprojekt</i> . https://www.genome.gov/human-genome-project
Interaktive Genomkarte (AR-Panel)	Identifizieren Sie Gene auf Chromosomen und verstehen Sie das Konzept eines Referenzgenoms	NHGRI. <i>Grundlagen des Genoms</i> . https://www.genome.gov/genetics-glossary/Genome
Kurzes Erklärvideo (eingebetteter Link)	Verstehen Sie die Ziele, den Zeitplan und die Bedeutung des Humangenomprojekts	TED-Ed. <i>Das Humangenomprojekt</i> . https://ed.ted.com/lessons/the-human-genome-project-tania-simoncelli





AR-Element (Delightex)	Lernziel	Quelle/Link
3D-Modell der DNA-Doppelhelix	Grundlegende Struktur der DNA und Basenpaarung (A–T, C–G) verstehen	Khan Academy. <i>Struktur und Funktion der DNA</i> . https://www.khanacademy.org/science/ap-biology/gene-expression-and-regulation/dna-and-rna-structure
3D-Chromosomenmodell	Verstehen Sie, wie DNA in Chromosomen organisiert ist und wie das Genom strukturiert ist	National Human Genome Research Institute (NHGRI). <i>Humangenomprojekt</i> . https://www.genome.gov/human-genome-project
Beispiel für ein Gen (z. B. BRCA1)	Verbindung zwischen Genomsequenzierung, Krankheitsrisiko und Genommedizin	NHGRI. <i>BRCA-Gene</i> . https://www.genome.gov/genetics-glossary/BRCA
Ethik-Szenario-Panel (ELSI)	Reflektieren Sie über ethische, rechtliche und soziale Fragen im Zusammenhang mit Genomdaten (Datenschutz, Diskriminierung).	NHGRI. <i>Ethische, rechtliche und soziale Implikationen (ELSI)</i> . https://www.genome.gov/about-genomics/policy-issues/ELSI





AR-Element (Delightex)	Lernziel	Quelle/Link
3D-Modell der DNA-Doppelhelix	Grundlegende Struktur der DNA und Basenpaarung (A–T, C–G) verstehen	Khan Academy. <i>Struktur und Funktion der DNA</i> . https://www.khanacademy.org/science/ap-biology/gene-expression-and-regulation/dna-and-rna-structure
3D-Chromosomenmodell	Verstehen Sie, wie DNA in Chromosomen organisiert ist und wie das Genom strukturiert ist	National Human Genome Research Institute (NHGRI). <i>Humangenomprojekt</i> . https://www.genome.gov/human-genome-project
Gamifizierte AR-Mission „ ” (von Lehrern erstellt)	Steigern Sie die Motivation und festigen Sie wichtige HGP-Konzepte durch aktives Lernen	Von Lehrern entworfene Aufgabe in Delightex
Reflexions-/Selbstbewertungsfeld	Entwicklung von kritischem Denken und persönlicher Reflexion über Genomik und Gesellschaft	Basierend auf den Inhalten der Lerneinheit und der Diskussion im Unterricht





Fazit:

Das Humangenomprojekt (HGP) war eine der bedeutendsten wissenschaftlichen Errungenschaften der modernen Wissenschaft. Es hat unser Verständnis der menschlichen Biologie verändert und zur Entwicklung neuer Bereiche wie Präzisionsmedizin, Bioinformatik und ethischer Regeln für den Austausch genetischer Daten beigetragen (Collins et al., 2003). In dieser Lerneinheit befassten sich die Schüler nicht nur mit den wichtigsten wissenschaftlichen Ergebnissen des HGP, sondern auch mit dem weiteren Kontext, in dem das Projekt durchgeführt wurde. Dazu gehörten die globale Zusammenarbeit zwischen Ländern, der rasante technologische Fortschritt und ethische Herausforderungen im Zusammenhang mit groß angelegten Forschungsvorhaben.

Mithilfe von Augmented-Reality-Tools wie MolecuLAR und Genome AR konnten die Schüler komplexe genomische Konzepte auf interaktive Weise erkunden. Diese Tools halfen den Lernenden, DNA-Strukturen zu visualisieren, Sequenzierungsprozesse zu verstehen und Theorie mit realen biomedizinischen Beispielen zu verknüpfen. Aktivitäten mit Schwerpunkt auf ethischen Dilemmata, Genomforschung und internationaler Zusammenarbeit ermöglichten es den Schülern, die wissenschaftlichen und sozialen Herausforderungen zu erleben, denen das Humangenomprojekt gegenüberstand.

Infolgedessen förderte diese Einheit die Entwicklung von wissenschaftlicher Kompetenz, kritischem Denken, ethischem Bewusstsein und digitalen Fähigkeiten. Die Schüler lernten, wie Genomdaten gesammelt, analysiert und weitergegeben werden und warum diese Informationen in der modernen Medizin und Biotechnologie verantwortungsbewusst genutzt werden müssen (Green & Guyer, 2015). Das Humangenomprojekt beeinflusst weiterhin viele Bereiche, darunter das Gesundheitswesen, die Landwirtschaft und die Ahnenforschung.





Am Ende der Einheit werden die Schüler dazu angeregt, darüber nachzudenken, wie aktuelle Themen wie Genbearbeitung, Datenschutz und gleichberechtigter Zugang zu medizinischen Technologien mit dem Erbe des HGP zusammenhängen. Das Verständnis dieses Zusammenhangs hilft den Lernenden, sich zu informierten und verantwortungsbewussten Teilnehmern an zukünftigen Diskussionen über Wissenschaft, Technologie und Gesellschaft zu entwickeln.





Phase	Beschreibung
Erkunden	– Forschung und Entdeckung: Die Schüler erkunden das Humangenomprojekt anhand von NHGRI-Informationsblättern, kurzen Lehrvideos und visuellen Zeitachsen. Diese Materialien stellen die Hauptziele, den Zeitplan und die wissenschaftliche Bedeutung des HGP vor.
	- Inhaltsentwicklung: Die Lehrkräfte leiten Diskussionen mithilfe interaktiver Zeitleisten und historischer Beispiele. Es werden ethische Fragen im Zusammenhang mit Genomforschung, Datenschutz und Datennutzung vorgestellt, um die Schüler auf spätere Reflexionen vorzubereiten.
	- Bedarfsanalyse: Die Vorkenntnisse der Schüler zu DNA, Genen und Genomik werden durch kurze Diskussionen oder diagnostische Fragen bewertet. Dies hilft den Lehrern, Verständnislücken zu erkennen und Erklärungen und AR-Aktivitäten entsprechend anzupassen.
Durchführung	- Umsetzung des Lehrplans: Die Schüler nehmen an geführten Unterrichtseinheiten teil, die durch AR-Module unterstützt werden. Mit Tools wie MolecularAR und Genome AR untersuchen sie die DNA-Struktur, Sequenzierungsprozesse und Genomregionen anhand von Beispielen aus der realen Welt.
	- Interaktive Übungen: Die Lernenden absolvieren ein virtuelles Sequenzierungslabor, nehmen an Ethikdebatten teil und beteiligen sich an AR-basierten Rollenspielaktivitäten. Bei Genjagd-Missionen können die Schüler bestimmte Gene lokalisieren und sie mit Merkmalen oder Krankheiten in Verbindung bringen, wodurch wichtige Konzepte aus der Erkundungsphase vertieft werden.
	- Feedback-Erfassung: Das Verständnis wird durch Reflexionen der Schüler, Feedback von Mitschülern während Gruppenaufgaben und Feedback der Lehrer nach Diskussionen und AR-Aktivitäten gefördert.
Verbessern	- AR-Integration: MolecularAR und Genome AR werden eingesetzt, um das Verständnis durch interaktive 3D-Erkundung von DNA, Proteinen und Genomregionen zu vertiefen. Die Schüler können Modelle drehen, zoomen und manipulieren, um ihr räumliches und konzeptionelles Verständnis zu stärken.
	- Interaktives Lernen: Die Lernenden erkunden AR-Inhalte selbstständig in ihrem eigenen Tempo und beschäftigen sich erneut mit komplexen Themen wie Sequenzierung, Genfunktion und Genomorganisation.
	Punkte und Abzeichen Die Schüler verdienen Abzeichen für das Erfüllen von AR-Aufgaben, das Lösen von Herausforderungen und das korrekte Identifizieren von Genommerkmalen. Ranglisten im Klassenzimmer können zur Steigerung der Motivation genutzt werden.
	Ranglisten Visuelle Ranglisten zeigen den Fortschritt und die Erfolge basierend auf abgeschlossenen AR-Aktivitäten und Herausforderungen.
	Quests und Levels Es wird missionsbasiertes Lernen eingesetzt, bei dem die Schüler im Laufe der Levels neue genomische Aufgaben und Herausforderungen freischalten.
	Belohnungen für Erkundungen Zusätzliche AR-Inhalte oder Datensätze werden freigeschaltet, wenn die Schüler optionale Erkundungs- oder Reflexionsaufgaben abschließen.
	Kollaborative gamifizierte Aufgaben Die Studierenden arbeiten in Teams an Genomanalyseaufgaben oder Simulationen.





	wodurch Kommunikation, Zusammenarbeit und gemeinsame Problemlösung gefördert werden.
	Die Bewertung umfasst AR-basierte visuelle Walkthroughs, von Gleichaltrigen begutachtete Gruppenprojekte und multimediale Reflexionen. Diese Formate ermöglichen es den Schülern, ihr Verständnis durch Erklärungen, visuelle Belege und Diskussionen statt allein durch Auswendiglernen unter Beweis zu stellen.

Referenzen

1. Collins, F. S., Morgan, M. & Patrinos, A. (2003). Das Humangenomprojekt: Lehren aus der groß angelegten Biologie. *Science*, 300(5617), 286–290. <https://doi.org/10.1126/science.1084564>
2. Green, E. D., & Guyer, M. S. (2015). Charting a course for genomic medicine from base pairs to bedside. *Nature*, 470(7333), 204–213. <https://doi.org/10.1038/nature09764>
3. Nationales Institut für Humangenomforschung. (2024). Informationsblatt zum Humangenomprojekt. <https://www.genome.gov/human-genome-project>
4. National Human Genome Research Institute. (2024). Forschungsprogramm zu ethischen, rechtlichen und sozialen Implikationen (ELSI). <https://www.genome.gov/about-nhgri/what-we-do/elsi-research-program>
5. T2T (Telomere-to-Telomere) Consortium. (2022). Die vollständige Sequenz eines menschlichen Genoms. *Science*, 376(6588), 44–53. <https://doi.org/10.1126/science.abj6987>
6. Sanger, F., Nicklen, S., & Coulson, A. R. (1977). DNA-Sequenzierung mit Kettenabbruchinhibitoren. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 74(12), 5463–5467. <https://doi.org/10.1073/pnas.74.12.5463>





7. NHGRI-Fotoarchiv. (o. J.). Historische Bilder des Humangenomprojekts. National Human Genome Research Institute. <https://www.genome.gov/about-nhgri/who-we-are/photo-archive>
8. MolecularAR. (o. J.). MolecularAR: Augmented Reality für die Molekularbiologie. <https://molecularweb.org>
9. Genome AR. (o. J.). Genome AR – Bildungsanwendung. <https://genomear.org> (Verwenden Sie bei Bedarf die genaue URL, die von Ihrer Einrichtung/Ihrem App Store bereitgestellt wird.)
10. YouTube. (o. J.). Das Humangenomprojekt erklärt [Video]. Empfohlene Quelle: Offizieller Kanal des National Human Genome Research Institute.
<https://www.youtube.com/@genomegov>
(Lehrkräfte sollten für den Unterricht altersgerechte Videos auswählen.)





Co-funded by
the European Union



BIOS4YOU AR 2.0

BIO-INSPIRED STEM TOPICS FOR ENGAGING YOUNG GENERATIONS
THANKS TO THE USE OF AUGMENTED REALITY

Project Number: 2023-1-DE03-KA220-SCH-000126516

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.