



Co-funded by
the European Union

Laser in der Medizin: Wie Licht bei der Diagnose von Krankheiten hilft



BIO4YOU
AR 2.0

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

Project Number: KA220-BW-23-30-126516

"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.....	2
· Grundlagen der Licht- und Lasertechnologie.....	3
· Prinzipien der Wechselwirkung zwischen Laser und Gewebe.....	5
· Medizinische diagnostische Anwendungen der Lasertechnologie	7
· Bioinspirierte Innovationen in der Laserdiagnostik	10
· Vorteile und Grenzen der Laserdiagnostik	12
· Integration der Laserdiagnostik in die Ausbildung: Praxisnahe Unterrichtsprojekte	13
· Wissenschaftliche Grundlagen für die Integration von Augmented Reality in die Ausbildung in der Laserdiagnostik	15
· Fazit.....	17
· Ressourcen.....	20





Fachgebiet	Inhalt
Allgemeines Thema des Lernpfads	Licht, Laser und medizinische Diagnostik
Spezifischer Name der Lerneinheit	Laser in der Medizin: Wie Licht bei der Diagnose von Krankheiten hilft
Zielgruppe	14–18 Jahre
Voraussetzungen für Lernende	Grundkenntnisse in Optik (Reflexion/Brechung), menschlicher Anatomie und allgemeiner Physik/Biologie
Beschreibung der Lerneinheit	Diese interdisziplinäre Einheit führt die Schüler in die Grundprinzipien von Licht und Lasern ein und untersucht, wie diese Technologien in der modernen Medizin zur Diagnose von Krankheiten eingesetzt werden. Der Lernpfad beleuchtet, wie Laser-Gewebe-Wechselwirkungen in Techniken wie OCT, Fluoreszenzbildgebung und nicht-invasivem Scannen angewendet werden. Augmented-Reality-Tools (AR) werden verwendet, um optische Phänomene zu simulieren, sodass die Schüler visualisieren können, wie sich Laserlicht in biologischen Systemen verhält, und diagnostische Konzepte, die für das menschliche Auge normalerweise unsichtbar sind, praktisch erforschen können.
Beteiligte Fächer	Physik, Biologie, Chemie, Mathematik
Stichworte	Laser, Wechselwirkung zwischen Licht und Gewebe, Optik, Diagnostik, AR, Visualisierung, nicht-invasive Bildgebung, Bioinspiration
Wichtige Fähigkeiten, Fertigkeiten und Kenntnisse, die erworben werden können	- Verständnis der Wechselwirkung von Laserlicht mit biologischem Gewebe (Absorption, Streuung, Fluoreszenz)





Einführung

Der Einsatz von Lasern in der Medizin hat in den letzten Jahrzehnten dramatische Fortschritte gemacht und eine Reihe von diagnostischen und therapeutischen Verfahren ermöglicht, die präzise, minimal invasiv und oft den herkömmlichen Techniken überlegen sind. Ein Laser, definiert als ein Gerät, das durch den Prozess der optischen Verstärkung auf der Grundlage der stimulierten Emission elektromagnetischer Strahlung Licht emittiert, erzeugt kohärente, monochromatische und hochgradig kollimierte Lichtstrahlen. Diese Eigenschaften ermöglichen eine außergewöhnliche Kontrolle über die Energieabgabe, wodurch Laser in einzigartiger Weise für die Wechselwirkung mit biologischem Gewebe sowohl auf makroskopischer als auch auf mikroskopischer Ebene geeignet sind.

In der medizinischen Diagnostik werden Laser in erster Linie aufgrund ihrer Fähigkeit eingesetzt, Echtzeit-Bildgebung und biochemische Analysen in hoher Auflösung zu liefern, ohne dass Gewebe entnommen werden muss. Ihre Anwendungsbereiche umfassen verschiedene Fachgebiete, darunter Augenheilkunde, Onkologie, Dermatologie und Herz-Kreislauf-Medizin. Beispielsweise hat sich die optische Kohärenztomographie (OCT), die mit niedrigkohärentem Nahinfrarot-Laserlicht arbeitet, zu einem Standardbildgebungsverfahren in der Augenheilkunde entwickelt, das mikrometergenaue Querschnittsbilder der Netzhaut liefert (Barsom et al., 2016). In ähnlicher Weise ermöglicht die laserinduzierte Fluoreszenz (LIF) die Erkennung abnormaler Gewebestoffwechselprozesse durch Analyse des Emissionsspektrums fluoreszierender Moleküle und unterstützt so die Früherkennung von Krebs (Albrecht et al., 2013).

Auf Gewebeebene hängt die Wechselwirkung zwischen Laser und Materie stark von den Absorptionsspektren biologischer Chromophore wie Hämoglobin, Melanin und Wasser ab. Durch sorgfältige Auswahl der Laserwellenlänge können bestimmte Gewebekomponenten gezielt behandelt werden, ohne die umgebenden Strukturen zu schädigen. Die nichtionisierende Natur des Laserlichts macht es auch sicherer als ionisierende Diagnoseverfahren wie Röntgenstrahlen oder CT-Scans, insbesondere für wiederholte Überwachungen oder den Einsatz in der Pädiatrie (Zafar et al., 2021). Darüber hinaus entwickeln sich die Lasertechnologien weiter und werden mit optischen Sensoren, Photonik und KI-gestützten Bildgebungssystemen integriert, um die Diagnosegenauigkeit, Geschwindigkeit und Dateninterpretation zu verbessern.

Neuere Forschungsarbeiten konzentrieren sich auf die Kombination von Laserdagnostik mit spektroskopischen Verfahren wie Raman-Spektroskopie, diffuser Reflektionsspektroskopie und photoakustischer Bildgebung, die Informationen auf molekularer Ebene in vivo liefern können. Diese Hybridsysteme sind vielversprechend für nicht-invasive „optische Biopsien“, die in bestimmten Kontexten die traditionelle Histopathologie ersetzen könnten (De Miguel & Martínez, 2023). Mit dem technologischen Fortschritt wird erwartet, dass laserbasierte Diagnosesysteme kompakter, erschwinglicher und intelligenter werden und somit sowohl in klinischen als auch in abgelegenen Umgebungen leichter zugänglich sind.





Parallel zu diesen technologischen Fortschritten bietet die Integration von Augmented Reality (AR) in die biomedizinische Ausbildung und in Simulationsumgebungen neue Möglichkeiten zur Visualisierung, Interaktion und zum Verständnis komplexer optischer Phänomene. AR ermöglicht die Überlagerung virtueller Objekte wie Laserstrahlen, Gewebe, Diagnosegeräte oder molekulare Reaktionen auf die reale Welt in Echtzeit und hilft Studenten und Auszubildenden, ein räumliches und funktionales Verständnis abstrakter Prozesse zu erlangen. Beispielsweise kann AR einen virtuellen OCT-Scan simulieren, bei dem Benutzer eine Lasersonde über ein 3D-Modell des menschlichen Auges bewegen und die schichtweise Bilderzeugung beobachten können. In ähnlicher Weise können fluoreszenzbasierte Laserinteraktionen mithilfe von Farbüberlagerungen visualisiert werden, die metabolische oder strukturelle Veränderungen im Gewebe zeigen. Diese Erfahrungen gehen über statische Illustrationen oder Videos hinaus, da sie eine dynamische Manipulation, Rückmeldung und Echtzeit-Erkundung ermöglichen – Funktionen, die nachweislich die Lernmotivation und das Behalten von Wissen erheblich steigern (Akçayır & Akçayır, 2017; Bacca et al., 2014).

Darüber hinaus kann AR interdisziplinäre Verbindungen unterstützen, indem es veranschaulicht, wie von der Natur inspirierte visuelle Systeme, wie z. B. die Polarisationsempfindlichkeit von Fangschreckenkreben oder Nanostrukturen in Schmetterlingsflügeln, das Design der Laserdiagnostik beeinflusst haben. In einer gut gestalteten AR-Lernumgebung können die Schüler sowohl den biologischen Organismus als auch sein technologisches Pendant virtuell nebeneinander untersuchen und so ihr Verständnis von Bio-Inspiration als Designprinzip verbessern. Diese Art der Interaktion fördert nicht nur das konzeptionelle Lernen, sondern auch das systemische Denken und kreative Problemlösen.

Zusammen bilden die Konvergenz von Laserdiagnostik und AR-gestützter Visualisierung eine leistungsstarke Plattform für Bildung, Ausbildung und Entdeckung, die Lernenden die Möglichkeit bietet, die unsichtbaren, aber grundlegenden Wechselwirkungen zwischen Licht und Leben aktiv zu erforschen.

1. Grundlagen der Licht- und Lasertechnologie

1.1 Die Natur des Lichts

Licht ist eine Form elektromagnetischer Strahlung, die sich sowohl wie eine Welle als auch wie ein Teilchen (Photon) verhält. Es umfasst ein Spektrum von Wellenlängen, von hochenergetischen Gammastrahlen und Röntgenstrahlen bis hin zu niederenergetischen Radiowellen. Das sichtbare Spektrum, das von etwa 400 bis 700 Nanometern (nm) reicht, stellt den Teil des elektromagnetischen Spektrums dar, der für das menschliche Auge wahrnehmbar ist. Jede Wellenlänge entspricht einer Farbe, von Violett (kürzere Wellenlänge) bis Rot (längere Wellenlänge). Für viele medizinische Diagnoseanwendungen sind jedoch nicht sichtbare Wellenlängen, insbesondere Nahinfrarot (NIR, 700–1400 nm) und Ultraviolett (UV, <400 nm), aufgrund ihrer spezifischen Wechselwirkungen mit biologischem Gewebe effektiver (Barsom et al., 2016).

Die Wechselwirkung von Licht mit Materie, insbesondere mit biologischem Gewebe, hängt von Eigenschaften wie Absorption, Streuung, Reflexion und Transmission ab. Diese Wechselwirkungen werden durch die molekulare Zusammensetzung und Struktur von Geweben beeinflusst und variieren mit der Wellenlänge. Beispielsweise kann Nahinfrarotlicht mit minimaler Absorption mehrere Millimeter tief in Gewebe eindringen, was es besonders nützlich für die Bildgebung von tiefem Gewebe und die Blutflussanalyse macht (Zafar et al., 2021).





1.2 Was ist ein Laser?

Ein Laser – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung) – ist ein Gerät, das durch einen Prozess der optischen Verstärkung Licht emittiert. Im Gegensatz zu gewöhnlichen Lichtquellen, die inkohärentes und breitbandiges Licht emittieren, erzeugt ein Laser einen Strahl, der

- monochromatisch ist: aus einer einzigen Wellenlänge oder Farbe besteht,
- kohärent ist: Die Lichtwellen sind phasengleich und bewegen sich in die gleiche Richtung.
- kollimiert ist: Der Strahl bleibt über große Entfernungen schmal und fokussiert.

Dank dieser Eigenschaften können Laser konzentrierte Energie präzise abgeben, was sie besonders nützlich für diagnostische und therapeutische medizinische Anwendungen macht. Laserlicht kann auf bestimmte Gewebe gerichtet werden, ohne benachbarte Bereiche zu beeinträchtigen, was gezielte Eingriffe auf zellulärer oder subzellulärer Ebene ermöglicht (Akçayır & Akçayır, 2017; Albrecht et al., 2013).

1.3 Arten von Lasern, die in der Medizin verwendet werden

Lasers unterscheiden sich durch das zur Erzeugung des Lichts verwendete Medium, das ihre Wellenlänge und Energieabgabe beeinflusst. Zu den wichtigsten Arten gehören:

- Gaslaser (z. B. Argon, CO₂): Werden häufig in der Augenheilkunde und Dermatologie eingesetzt. Argonlaser emittieren blaugrünes Licht, das für die Photokoagulation der Netzhaut nützlich ist.
- Festkörperlaser (z. B. Nd:YAG): Erzeugen nahes Infrarotlicht und werden häufig für die Gewebeablation, Koagulation und Bildgebung eingesetzt.
- Diodenlaser: Kompakt, effizient und über den gesamten NIR-Bereich abstimmbare. Werden zunehmend in tragbaren Diagnosegeräten eingesetzt.
- Excimer-Laser (UV-Bereich): Werden aufgrund ihrer Präzision bei der Entfernung von Hornhautgewebe ohne Beschädigung der umliegenden Bereiche bei refraktiven Augenoperationen wie LASIK eingesetzt.

Die Wellenlänge bestimmt, mit welcher Art von Gewebe oder Molekül der Laser interagiert. Beispielsweise absorbieren Melanin und Hämoglobin sichtbares Licht stark, während Wasser der Hauptabsorber im Infrarotbereich ist (Bacca et al., 2014).

1.4 Wechselwirkung zwischen Laser und Gewebe in der Diagnostik

Die Art und Weise, wie ein Laser mit Gewebe interagiert, ist ausschlaggebend für seinen diagnostischen Wert. Diagnostische Laser arbeiten in der Regel mit geringer Leistung, um Schäden zu vermeiden und gleichzeitig die Datenerfassung durch optische Signale zu maximieren. Zu den gängigen Interaktionsmechanismen gehören:

- Elastische Streuung: Licht wird ohne Energieänderung vom Gewebe zurückgeworfen und kommt in Techniken wie der diffusen optischen Bildgebung zum Einsatz.
- Inelastische Streuung (Raman-Effekt): Licht verliert oder gewinnt an Energie und offenbart so die molekulare Zusammensetzung – nützlich in der Raman-Spektroskopie.





- **Fluoreszenz:** Licht regt Gewebemoleküle an, die sekundäres Licht emittieren. Dies wird in der laserinduzierten Fluoreszenz (LIF) genutzt, um abnormale Stoffwechselaktivitäten zu identifizieren.
- **Interferenz:** Wird in der optischen Kohärenztomographie (OCT) verwendet, um interne Strukturen auf der Grundlage von Phasenverschiebungen reflektierter Wellen zu rekonstruieren (Barsom et al., 2016).

Das Verständnis dieser Wechselwirkungen ermöglicht es Forschern und Klinikern, nicht-invasive Diagnosewerkzeuge zu entwickeln, mit denen Krankheiten wie Krebs, Makuladegeneration und Herz-Kreislauf-Erkrankungen erkannt werden können, ohne dass Gewebe geschnitten oder Proben entnommen werden müssen.

1.5 Zukünftige Trends in lichtbasierten medizinischen Technologien

Die Konvergenz von Photonik, Biosensorik und KI eröffnet der Laserdiagnostik neue Horizonte. Miniaturisierte optische Chips, multimodale Bildgebungssysteme und intelligente tragbare Lasersensoren werden entwickelt, um Biomarker wie Glukose-, Laktat- oder Sauerstoffwerte in Echtzeit durch die Haut zu überwachen (Zafar et al., 2021; De Miguel & Martínez, 2023). Diese Systeme nutzen sowohl die Präzision des Lasers als auch die intelligente Datenverarbeitung, um die Diagnostik näher an den Point-of-Care und sogar an die häusliche Umgebung zu bringen.

Parallel dazu werden die Ausbildung und Schulung im Bereich der Lasertechnologien durch immersive Tools wie Augmented Reality (AR) verbessert. Durch die Überlagerung von Laser-Gewebe-Wechselwirkungen, Strahleigenschaften und Molekülmodellen auf 3D-Simulationen kann AR ein erfahrungsbasiertes Verständnis komplexer optischer Prinzipien vermitteln. Dies ist besonders wertvoll für Lernende, die zum ersten Mal mit Konzepten wie Streuung, Kohärenz oder spektraler Absorption in Berührung kommen (Akçayır & Akçayır, 2017).

2. Prinzipien der Laser-Gewebe-Interaktion

2.1 Überblick über die Wechselwirkungsmechanismen

Wenn Laserlicht mit biologischem Gewebe interagiert, können je nach Gewebetyp, Wellenlänge, Energie, Pulsdauer und Expositionszeit des Lasers verschiedene physikalische Prozesse auftreten. Die vier wichtigsten Interaktionsmechanismen sind:

- **Absorption:** Photonen werden von Molekülen (Chromophoren) im Gewebe aufgenommen.
- **Streuung:** Das Licht wird beim Durchgang durch das Gewebe umgelenkt.
- **Reflexion:** Ein Teil des einfallenden Lichts wird an der Oberfläche zurückgeworfen.
- **Transmission:** Ein Teil des Lichts durchdringt das Gewebe vollständig.

Diese Wechselwirkungen schließen sich nicht gegenseitig aus und treten oft gleichzeitig auf, was sich darauf auswirkt, wie tief der Laser eindringt und welche diagnostischen oder therapeutischen Effekte erzielt werden. Das Verständnis und die Kontrolle dieser Prozesse sind für die Entwicklung sicherer und wirksamer laserbasierter Diagnosewerkzeuge von entscheidender Bedeutung (Barsom et al., 2016; Zafar et al., 2021).





2.2 Rolle von Chromophoren und Wellenlängenabhängigkeit

Die Reaktion des Gewebes auf Laserlicht wird weitgehend durch das Vorhandensein von Chromophoren bestimmt – Molekülen, die bestimmte Wellenlängen absorbieren. Zu den wichtigsten Chromophoren in biologischem Gewebe gehören:

- Hämoglobin (absorbiert im sichtbaren Bereich),
- Melanin (breite Absorption von UV bis NIR),
- Wasser (starke Absorption im mittleren bis fernen Infrarotbereich).

Die Auswahl der Laserwellenlänge ist daher von entscheidender Bedeutung. Beispielsweise werden grüne und blaue Laser (Wellenlängen um 488–532 nm) leicht von Hämoglobin absorbiert, wodurch sie sich ideal für die Visualisierung und das Anvisieren von Blutgefäßen eignen. Nahinfrarotlicht (700–1400 nm) dringt aufgrund seiner geringeren Absorption und Streuung tiefer in das Gewebe ein und eignet sich daher gut für die Bildgebung subkutaner Strukturen, beispielsweise in der optischen Kohärenztomographie (OCT) oder der Laser-Doppler-Flowmetrie (LDF) (Albrecht et al., 2013; De Miguel & Martínez, 2023).

2.3 Diagnostische vs. therapeutische Interaktionsschwellen

Bei der Wechselwirkung zwischen Laser und Gewebe spielt das Energieniveau eine entscheidende Rolle dabei, ob die Wirkung diagnostisch oder therapeutisch ist. Diagnostische Anwendungen erfordern energiearme, zerstörungsfreie Wechselwirkungen, die optische Signale liefern, ohne Zellen oder Gewebe zu schädigen. Zu diesen Signalen können gehören:

- Elastische Streuung, verwendet bei diffuser Reflexion und OCT;
- Fluoreszenz, die in der LIF zur Erkennung von Stoffwechselerkrankungen oder Krebs eingesetzt wird;
- Raman-Streuung, die zur Identifizierung molekularer Zusammensetzungen über inelastische Photonenverschiebung verwendet wird.

Im Gegensatz dazu treten therapeutische Effekte wie Photokoagulation, Ablation oder photomechanische Störung bei höheren Energieniveaus auf und beruhen häufig auf thermischen oder mechanischen Veränderungen im Gewebe (Zafar et al., 2021).

2.4 Lichtstreuung und Bildgebungstiefe

Streuung tritt auf, wenn Photonen aufgrund der Wechselwirkung mit Gewebemikrostrukturen wie Zellmembranen oder Organellen ihre Richtung ändern. Der Streukoeffizient hängt von der Wellenlänge und der Heterogenität des Gewebes ab. Kürzere Wellenlängen (z. B. blaues Licht) streuen stärker, wodurch die Bildgebungstiefe verringert, aber die Auflösung in der Nähe der Oberfläche verbessert wird. Umgekehrt streuen längere Wellenlängen (z. B. NIR) weniger und dringen tiefer ein, allerdings mit geringerer räumlicher Auflösung.

Dieser Kompromiss ist eine grundlegende Herausforderung bei der Entwicklung optischer Diagnosegeräte. Technologien wie zeitaufgelöste Spektroskopie, Frequenzbereichsbildgebung und Multiphotonenmikroskopie nutzen das Streuverhalten, um nützliche diagnostische Signale aus Geweben in unterschiedlichen Tiefen zu extrahieren (Barsom et al., 2016).





2.5 Anwendungen in der optischen Biopsie und Echtzeitüberwachung

Die Wechselwirkung zwischen Laser und Gewebe bildet auch die Grundlage für die Entwicklung nicht-invasiver optischer Biopsien – Techniken, die molekulare oder strukturelle Informationen liefern, ohne Gewebe zu schneiden oder zu entfernen. Dazu gehören:

- Raman-Spektroskopie, die chemische Fingerabdrücke von Geweben in vivo erfasst;
- die photoakustische Bildgebung, die laserinduzierte Ultraschallwellen nutzt, um hybride optisch-akustische Bilder zu erzeugen;
- Laser-Doppler-Flowmetrie, die den mikrovaskulären Blutfluss anhand von Doppler-Verschiebungen im zurückgestreuten Licht erfasst.

Solche Instrumente werden zunehmend in der Onkologie, Neurologie und Dermatologie eingesetzt und für die Echtzeit-Diagnostik am Krankenbett untersucht (De Miguel & Martínez, 2023).

2.6 Sicherheitsaspekte und Dosimetrie

Ein entscheidender Aspekt der Wechselwirkung zwischen Laser und Gewebe ist die Einhaltung sicherer Expositionswerte. Die Dosimetrie, also die Berechnung und Messung der vom Gewebe absorbierten Energie, ist in diagnostischen Anwendungen unerlässlich, um unbeabsichtigte thermische oder mechanische Schäden zu vermeiden. Sicherheitsstandards werden von Gremien wie dem American National Standards Institute (ANSI) und der International Electrotechnical Commission (IEC) festgelegt. Diese Standards kategorisieren Laser anhand ihrer Leistung und ihres Risikograds in Sicherheitsklassen und geben damit Leitlinien für ihre Verwendung in klinischen und Ausbildungsumgebungen vor.

Augen- und Hautschutz, die genaue Auswahl der Wellenlänge und die Kontrolle der Expositionszeit sind sowohl in der klinischen Praxis als auch in Ausbildungsumgebungen von grundlegender Bedeutung. Mit neuen AR-basierten Simulationsplattformen können Anwender diese Wechselwirkungen nun sicher im virtuellen Raum untersuchen und so die Prinzipien der Dosimetrie ohne physische Risiken vertiefen (Akçayır & Akçayır, 2017).

3. Medizinische diagnostische Anwendungen der Lasertechnologie

3.1 Überblick über laserbasierte Diagnostik

Laserbasierte Diagnostik nutzt die präzise, wellenlängenspezifische Wechselwirkung von Licht mit Gewebe, um physiologische und pathologische Zustände zu erkennen, abzubilden und zu analysieren. Diese Methoden sind nicht-invasiv, bieten eine hohe räumliche Auflösung und können in Echtzeit funktionelle und strukturelle Daten liefern. Durch die gezielte Ausnutzung von Gewebeschromophoren und optischen Phänomenen wie Streuung, Fluoreszenz und Doppler-Verschiebungen ermöglichen diese Technologien Ärzten die Überwachung des Krankheitsverlaufs, die Steuerung chirurgischer Eingriffe und die Erstellung frühzeitiger Diagnosen bei minimalen Beschwerden für die Patienten (Barsom et al., 2016; Zafar et al., 2021).





3.2 Optische Kohärenztomographie (OCT)

Die OCT ist eines der am häufigsten verwendeten laserbasierten Diagnosewerkzeuge, insbesondere in der Augenheilkunde. Sie nutzt Licht mit niedriger Kohärenz im nahen Infrarotbereich, um hochauflösende Querschnittsbilder von Gewebemikrostrukturen zu erzeugen. Die Technik basiert auf Interferometrie, bei der das von verschiedenen Gewebetiefen zurückgestreute Licht mit einem Referenzstrahl verglichen wird, wodurch detaillierte Bilder entstehen, die in ihrer Struktur dem Ultraschall ähneln, jedoch Licht anstelle von Schall verwenden. Mit OCT lassen sich Schichten der Netzhaut sichtbar machen, Makuladegeneration erkennen und das Fortschreiten des Glaukoms mit Mikrometeregenauigkeit verfolgen.

Über die Augenheilkunde hinaus wird die OCT zunehmend in der Kardiologie (z. B. zur Darstellung von Koronarplaques), der Dermatologie (Hautkrebsvorsorge) und der Zahnmedizin (zur Beurteilung des Zahnschmelzes oder zur Erkennung von Karies) eingesetzt (Albrecht et al., 2013). Dank ihrer berührungslosen, schnellen Bildgebung ist sie ein bevorzugtes Werkzeug für empfindliche oder sensible anatomische Regionen.

3.3 Laserinduzierte Fluoreszenz (LIF)

Laserinduzierte Fluoreszenz (LIF) ist eine Diagnosetechnik, bei der Gewebe mit einem Laser angeregt wird, um Fluoreszenz zu induzieren. Diese Emission kann von natürlich vorkommenden Substanzen (endogenen Fluorophoren) wie NADH, FAD oder Porphyrinen oder von extern applizierten Fluoreszenzmarkern stammen. Die Fluoreszenzintensität und die Spektralverschiebung spiegeln die biochemische Zusammensetzung des Gewebes wider und ermöglichen so den Nachweis von Stoffwechselaktivität, Tumorgrenzen oder bakteriellen Biofilmen.

LIF hat vielversprechende Ergebnisse bei der Identifizierung von präkanzerösen Läsionen, beispielsweise in der Mundhöhle oder am Gebärmutterhals, gezeigt und wird intraoperativ zur Steuerung der Tumoresektion eingesetzt. Die Hauptvorteile sind die schnelle Signalerfassung, die hohe Empfindlichkeit und die Möglichkeit, dynamische Veränderungen im Stoffwechsel zu überwachen (Zafar et al., 2021; De Miguel & Martínez, 2023).

3.4 Laser-Doppler-Flowmetrie (LDF)

Die Laser-Doppler-Flowmetrie misst den mikrovaskulären Blutfluss unter Verwendung des Doppler-Effekts. Wenn ein Laser mit geringer Leistung bewegliche rote Blutkörperchen beleuchtet, erfährt das zurückgestreute Licht eine Frequenzverschiebung, die proportional zur Geschwindigkeit und zum Volumen des Blutflusses ist. Diese Daten werden dann verarbeitet, um Karten der Gewebedurchblutung, Entzündung oder Wundheilungsdynamik zu erstellen.

Die LDF wird häufig bei der Beurteilung von Verbrennungen, der Überwachung peripherer Arterienerkrankungen und der Untersuchung von diabetischen Füßen eingesetzt und bietet Ärzten eine nicht-invasive Methode zur Echtzeit-Bewertung der Mikrozirkulationsfunktion (Barsom et al., 2016). Jüngste Fortschritte haben die räumliche Auflösung der LDF verbessert (), und hybride Systeme kombinieren nun die LDF mit Wärmebildgebung oder Nahinfrarotspektroskopie für die multimodale Diagnostik.



3.5 Raman-Spektroskopie

Obwohl sich die Raman-Spektroskopie noch in der klinischen Entwicklung befindet, entwickelt sie sich zu einem wertvollen laserbasierten Werkzeug für die Diagnostik auf molekularer Ebene. Sie basiert auf der unelastischen Streuung von Laserlicht, wobei Energieverschiebungen in den gestreuten Photonen die Schwingungsmoden von Molekülen im Gewebe offenbaren. Da jedes Molekül einen einzigartigen spektralen Fingerabdruck erzeugt, kann die Raman-Spektroskopie bereits in frühen Stadien zwischen gesundem und krebsartigem Gewebe unterscheiden.

Die Technik wurde für die Abgrenzung von Hirntumoren, die Erkennung von Hautkrebs und die Mundkrebsvorsorge getestet und bietet eine hohe chemische Spezifität, ohne dass Farbstoffe oder Kontrastmittel erforderlich sind. In Verbindung mit faseroptischen Sonden und miniaturisierten Geräten werden Raman-Systeme in Diagnoseplattformen am Krankenbett und in robotergestützten Operationsumgebungen integriert (De Miguel & Martínez, 2023).

3.6 Photoakustische Bildgebung

Die photoakustische Bildgebung ist eine Hybridtechnik, die Laseroptik und Ultraschall kombiniert. Kurze Laserimpulse werden von Chromophoren im Gewebe absorbiert, was zu einer schnellen thermischen Ausdehnung und der Erzeugung von Schallwellen führt. Ultraschallwandler erfassen diese Wellen und rekonstruieren daraus kontrastreiche Bilder von Strukturen wie Blutgefäßen, Tumoren oder Sauerstoffsättigungsmustern.

Diese Methode ermöglicht die Bildgebung von tiefem Gewebe mit optischem Kontrast und ist besonders nützlich in der Onkologie und der vaskulären Bildgebung, einschließlich der Früherkennung von Brustkrebs, Melanomen und atherosklerotischen Plaques. Photoakustische Systeme werden auch für handgeführte Diagnosegeräte und tragbare Sensoren entwickelt (Zafar et al., 2021).

3.7 Vorteile der Laserdiagnostik in klinischen Umgebungen

Laserbasierte Diagnostik bietet zahlreiche Vorteile:

- Hohe Auflösung und Empfindlichkeit, geeignet zur Erkennung von Erkrankungen im Frühstadium
- Nicht-invasiv und schmerzfrei, was die Compliance der Patienten verbessert
- Echtzeitüberwachung, nützlich bei chirurgischen Eingriffen
- Keine ionisierende Strahlung, wodurch sie sicherer für den wiederholten Einsatz sind,
- Tragbar und skalierbar, mit Potenzial für Fern- und Point-of-Care-Anwendungen.

Darüber hinaus werden viele dieser Systeme mit Algorithmen für maschinelles Lernen verbessert, was eine automatisierte Mustererkennung und eine schnellere, genauere Diagnose ermöglicht. Diese intelligenten Lasersysteme stehen für einen Wandel hin zur personalisierten Medizin, bei der Diagnosen schneller, präziser und auf individuelle biologische Profile zugeschnitten sind (Albrecht et al., 2013).





4. Bioinspirierte Innovationen in der Laserdagnostik

4.1 Einführung in bioinspiriertes Design

Bio-Inspiration, auch als Biomimikry bezeichnet, ist die Praxis, biologische Systeme, Prozesse und Organismen zu untersuchen, um die Entwicklung neuer Materialien, Technologien und Lösungen für menschliche Herausforderungen anzuregen. Im Bereich der medizinischen Diagnostik, insbesondere bei laserbasierten Technologien, hat sich die Natur als unschätzbares Vorbild erwiesen. Viele Tiere haben hochspezialisierte optische Systeme entwickelt, um Licht für das Überleben, die Orientierung, die Jagd oder die Tarnung zu erkennen, zu manipulieren und zu interpretieren. Diese evolutionären Anpassungen bieten neuartige Ansätze für die Sensorik, Bildgebung und Lichtsteuerung, die in technischen Systemen nachgebildet und verfeinert werden können (Vincent et al., 2006).

4.2 Fangschreckenkrebe und polarisationsempfindliche Bildgebung

Die Fangschreckenkrebe verfügen über eines der fortschrittlichsten Sehsysteme, die in der Natur bekannt sind. Sie können linear und zirkular polarisiertes Licht sowie ultraviolette Strahlung erkennen. Ihre Facettenaugen enthalten bis zu 16 Arten von Photorezeptorzellen, verglichen mit nur 3 beim Menschen. Diese Polarisationsempfindlichkeit ermöglicht es den Kreben

Ingenieure und Physiker haben diese Fähigkeit nachgeahmt, um polarisationsempfindliche optische Geräte zu entwickeln, insbesondere für die Krebsdiagnostik. Tumorgewebe streut und polarisiert Licht aufgrund von Unterschieden in der Zellausrichtung und -dichte oft anders als gesundes Gewebe. Inspiriert von der Augenstruktur der Fangschreckenkrebe haben Forscher kompakte, polarisationsbasierte Bildsensoren entwickelt, die Krebserkrankungen im Frühstadium mit verbessertem Kontrast und höherer Spezifität erkennen können (Pang et al., 2016; Zafar et al., 2021). Diese Sensoren können in Endoskope oder handgeführte Diagnosegeräte integriert werden und ermöglichen so eine nicht-invasive Untersuchung von Gewebe in klinischen Umgebungen.

4.3 Schmetterlingsflügel und nanostrukturierte Biosensoren

Schmetterlinge wie die Gattung Morpho weisen nicht aufgrund von Pigmentierung, sondern aufgrund von Nanostrukturen auf ihren Flügelschuppen, die Licht reflektieren und streuen, leuchtende, metallisch anmutende Farben auf. Diese Mikrostrukturen interagieren mit Licht durch Interferenz, Beugung und selektive Reflexion. Ihre Fähigkeit, Licht auf nanoskopischer Ebene zu verändern, hat die Entwicklung von optischen Biosensoren und photonischen Kristallen inspiriert.

Diese bioinspirierten Materialien können winzige Veränderungen des Brechungsindex einer Oberfläche erkennen, die häufig auftreten, wenn Biomoleküle wie Glukose, Antikörper oder Krebsmarker an Sensoroberflächen binden. Durch die Nachahmung der Nanostrukturen von Schmetterlingen haben Wissenschaftler kolorimetrische Biosensoren entwickelt, die als Reaktion auf biologische Bindungsereignisse ihre Farbe ändern und so eine visuelle Echtzeitdiagnostik ohne Stromversorgung oder komplexe Auslesesysteme ermöglichen (Kolle et al., 2010). Solche Systeme sind ideal für Point-of-Care-Tests in ressourcenarmen Umgebungen.





4.4 Nachtaktive Tiere und Lichtverstärkungssysteme

Viele nachtaktive Tiere, wie Katzen, Eulen und Tiefseefische, haben anatomische Anpassungen entwickelt, die das Sehen bei schlechten Lichtverhältnissen verbessern. Ein wichtiges Merkmal bei Tieren wie Katzen ist das Tapetum lucidum, eine reflektierende Schicht hinter der Netzhaut, die das Licht durch die Photorezeptoren zurückwirft, wodurch die Wahrscheinlichkeit der Photonenabsorption erhöht und die Nachtsicht verbessert wird.

Dieses Prinzip wurde in die Konstruktion licht effizienter Netzhautbildgebungssysteme übertragen, wie sie beispielsweise in der Fundusfotografie bei schlechten Lichtverhältnissen und in der adaptiven optischen Scanning-Laser-Ophthalmoskopie zum Einsatz kommen. Diese Instrumente maximieren die Sammlung von gestreutem und reflektiertem Licht aus den Netzhautschichten, reduzieren den Bedarf an intensiver Beleuchtung und verbessern so den Komfort und die Sicherheit der Patienten während der diagnostischen Bildgebung (Barsom et al., 2016).

4.5 Bioinspirierte optische Beschichtungen und Lichtmanipulation

Die Natur hat auch Innovationen bei optischen Beschichtungen und der Lichtsteuerung inspiriert. Die Antireflexbeschichtungen in den Augen von Motten beispielsweise bestehen aus mikroskopisch kleinen Oberflächenmustern, die Reflexionen über einen breiten Wellenlängenbereich unterdrücken. Diese Eigenschaft wurde nachgebildet, um biomimetische Antireflexfolien für Lasersensorsysteme herzustellen, die die Signalklarheit durch Reduzierung von Hintergrundlichtstörungen verbessern.

In ähnlicher Weise nutzt die Familie der Kopffüßer (z. B. Tintenfische und Kraken) aktive Tarnung, indem sie die Anordnung reflektierender Proteine in ihrer Haut dynamisch verändert. Diese biologischen photonischen Systeme haben zu abstimmbaren Laserkomponenten, intelligenten Filtern und Sensoren geführt, die sich an unterschiedliche Umgebungs- oder Diagnosebedingungen anpassen können (Tian et al., 2019).

4.6 Integration in die Ausbildung und AR-Visualisierung

Die Einbeziehung von Bio-Inspiration in die Ausbildung im Bereich der Laserdagnostik bietet eine einzigartige interdisziplinäre Brücke zwischen Biologie, Physik, Ingenieurwesen und Design Thinking. Augmented Reality (AR) bietet eine leistungsstarke Plattform, um diese Zusammenhänge visuell zu erkunden. Beispielsweise können Schüler mit 3D-Modellen des Auges einer Fangschreckenkrebsart interagieren und sofort sehen, wie polarisationsempfindliche Sensoren diese Fähigkeit bei der Tumordiagnostik nachahmen. In ähnlicher Weise können AR-Umgebungen die Lichtstreuung auf Schmetterlingsflügeln simulieren oder die Reflexion von Licht durch eine Tapetum-Lucidum-Schicht demonstrieren, sodass die Lernenden die Mechanismen aus erster Hand erleben können (Akçayır & Akçayır, 2017; De Miguel & Martínez, 2023).

Eine solche Integration vertieft nicht nur das konzeptionelle Verständnis, sondern regt auch kreatives Problemlösen und Systemdenken an – Fähigkeiten, die für Innovationen in biomimetischen Technologien und der Medizintechnik von entscheidender Bedeutung sind.





5. Vorteile und Grenzen der Laserdiagnostik

5.1 Vorteile der laserbasierten Diagnostik

Laserbasierte Diagnostik bietet gegenüber herkömmlichen Bildgebungs- und Sensortechnologien eine Vielzahl von Vorteilen. Ihr Hauptvorteil liegt in der Präzision und Selektivität der Wechselwirkung zwischen Licht und Gewebe, die durch die monochromatische, kohärente und kollimierte Natur des Lasers ermöglicht wird. Diese Eigenschaften ermöglichen es, mit hochfokussierten Strahlen bestimmte biologische Strukturen mit minimaler Streuung anzusteuern, wodurch Gewebe auf mikroskopischer oder molekularer Ebene analysiert oder abgebildet werden kann (Barsom et al., 2016).

Ein wesentlicher Vorteil ist die Nicht-Invasivität. Techniken wie die optische Kohärenztomographie (OCT), die Laser-Doppler-Flowmetrie (LDF) und die laserinduzierte Fluoreszenz (LIF) erfordern keine ex e Gewebeentnahme oder Kontakt mit der Haut, wodurch das Infektionsrisiko und die Beschwerden für den Patienten reduziert werden. Diese Instrumente sind besonders vorteilhaft in empfindlichen Bereichen wie dem Auge, dem Gehirn und den Schleimhäuten (Zafar et al., 2021).

Laserdiagnostik ist auch für ihre hohe räumliche und zeitliche Auflösung bekannt. Beispielsweise liefert die OCT mikrometergenaue Querschnittsbilder mit einer Geschwindigkeit, die für die Echtzeitvisualisierung ausreicht, was für Anwendungen wie Netzhautscans und intraoperative Führung von entscheidender Bedeutung ist (Albrecht et al., 2013). Darüber hinaus arbeiten Lasersysteme im Gegensatz zu Röntgenstrahlen oder CT-Scans oft ohne ionisierende Strahlung, wodurch sie für den wiederholten Einsatz sicherer sind, insbesondere in der pädiatrischen Versorgung oder bei der Überwachung chronischer Erkrankungen.

Moderne laserbasierte Geräte werden dank der Fortschritte bei Halbleiterlasern, Glasfasertechnik und Algorithmen für maschinelles Lernen immer kompakter, mobiler und automatisierter. Diese Innovationen öffnen die Tür zur Point-of-Care-Diagnostik, selbst in ressourcenarmen oder abgelegenen Umgebungen (Le et al., 2023). Tragbare Raman-Systeme und handgeführte OCT-Geräte sind Beispiele dafür, wie die Laserdiagnostik aus den Labors in die reale klinische Umgebung vordringt.

Darüber hinaus lassen sich Laserdiagnostikgeräte gut mit Augmented Reality (AR) und computergestützten Bildgebungssystemen integrieren, was ihre pädagogische und klinische Verwendbarkeit weiter verbessert. AR-Overlays können während Echtzeit-Scans problematische Bereiche visuell hervorheben oder Benutzer zu optimalen Lasereinstellungen führen, was die Benutzerfreundlichkeit sowohl für Kliniker als auch für Auszubildende verbessert (Akçayır & Akçayır, 2017).

5.2 Einschränkungen und technische Herausforderungen

Trotz ihrer vielen Vorteile weisen laserbasierte Diagnosesysteme auch technische, biologische und praktische Einschränkungen auf.

Eine wesentliche Einschränkung ist die Eindringtiefe in das Gewebe, die grundsätzlich durch Lichtstreuung und -absorption begrenzt ist. Während Nahinfrarotlaser mehrere Millimeter tief in Weichgewebe eindringen können, sind sie für die Bildgebung tiefer liegender Organe oder dichter





Strukturen wie Knochen weniger geeignet. Dadurch sind sie im Vergleich zu Verfahren wie MRT oder CT für eine umfassende interne Bildgebung weniger geeignet (Barsom et al., 2016).

Darüber hinaus kann die Heterogenität des Gewebes die Interpretation erschweren. Unterschiedliche Gewebetypen, Hydratationsgrade oder Pigmentierungen können die Streuungs- und Absorptionseigenschaften verändern, was eine sorgfältige Kalibrierung erfordert und manchmal zu inkonsistenten Ergebnissen führt. Bei der fluoreszenzbasierten Diagnostik können Probleme wie Photobleaching oder Autofluoreszenz die Signalqualität beeinträchtigen oder die Ergebnisse verfälschen (Zafar et al., 2021).

Auch die Kosten und die Komplexität stellen erhebliche Hindernisse für eine breite Einführung dar. Hochwertige Laser, optische Detektoren und Kühlsysteme können teuer sein, und die Aufrechterhaltung einer präzisen Ausrichtung und Kalibrierung erfordert technisches Fachwissen. Obwohl die Miniaturisierung voranschreitet, erfordern viele Systeme nach wie vor kontrollierte Umgebungen oder geschultes Personal, was ihren Einsatz in ländlichen oder unterfinanzierten Gesundheitssystemen einschränkt (Ibrahim et al., 2022).

Darüber hinaus müssen Sicherheitsbedenken sorgfältig berücksichtigt werden. Die Exposition gegenüber hochintensiven Laserstrahlen, insbesondere im sichtbaren oder nahen Infrarotbereich, kann Risiken für Augen und Haut mit sich bringen. Die Regulierungsstandards der IEC (International Electrotechnical Commission) und des ANSI (American National Standards Institute) klassifizieren Laser nach ihrem Risiko und legen Sicherheitsmaßnahmen für den klinischen Einsatz fest, darunter Schutzbrillen, Beschilderung und Strahlenschutz (Albrecht et al., 2013).

5.3 Ethische und zugängkeitsbezogene Überlegungen

Der Einsatz fortschrittlicher Laserdagnostik wirft auch ethische Fragen auf, insbesondere in Bezug auf Datenschutz, algorithmische Interpretation und Gleichberechtigung im Gesundheitswesen. Bei der Einführung von KI-gestützten Lasersystemen ist es wichtig, sicherzustellen, dass automatisierte Diagnosen für verschiedene Bevölkerungsgruppen validiert werden und die Transparenz der Entscheidungsfindung gewahrt bleibt.

Die Zugänglichkeit ist ein weiteres kritisches Thema. Während die Laserdiagnostik theoretisch die Gesundheitskosten senken kann, indem sie eine frühzeitigere Erkennung ermöglicht und invasive Eingriffe reduziert, können die Anfangsinvestitionen und die Wartung der Technologie unerschwinglich sein. Bemühungen zur Entwicklung von Open-Source-Hardware, kostengünstigen Laserdioden und Schulungsprogrammen sind unerlässlich, um sicherzustellen, dass diese Instrumente einem breiten Spektrum von Gemeinschaften weltweit zugutekommen.

6. Integration der Laserdiagnostik in die Bildung: Praxisnahe Unterrichtsprojekte

6.1 Lasertechnik im MINT-Unterricht der Sekundarstufe

Der Unterricht über Lasertechnologie in weiterführenden Schulen bietet Schülern einen Einstieg in die reale Welt der Physik, biomedizinischer Anwendungen und des technischen Designs. Obwohl Laser oft als hochentwickelt oder abstrakt angesehen werden, haben viele erfolgreiche Bildungsinitiativen gezeigt, dass junge Lernende die Prinzipien von Lasern verstehen und sich





damit auseinandersetzen können, wenn sie durch praktische, forschungsbasierte und visuelle Hilfsmittel unterstützt werden.

Themen wie das Verhalten von Licht, optische Systeme und die Wechselwirkung zwischen Laser und Gewebe wurden im Unterricht anhand interdisziplinärer MINT-Module behandelt, die Biologie, Physik und Technik miteinander verbinden. In einigen Lehrplänen bauen die Schüler einfache optische Aufbauten, um Reflexion, Brechung und Laserausrichtung mit sicheren Diodenlasern mit geringer Leistung zu untersuchen. Andere führen Simulationen durch, die zeigen, wie Laserlicht mit biologischen Materialien interagiert – insbesondere mit Hilfe von AR- oder digitalen Visualisierungstools.

6.2 Beispiel 1: Projekt „Licht und Leben“ – Deutschland

In Deutschland führten Schulen, die am MINT-EC-Netzwerk (MINT-Exzellenzzentrum) teilnehmen, eine thematische Einheit namens *„Licht und Leben“* durch, die Biologie, Physik und Medizin für Schüler im Alter von 14 bis 18 Jahren integrierte. Die Schüler lernten das menschliche Auge und diagnostische Bildgebungstechniken kennen, indem sie mit Lasern mit geringer Leistung und Linsen experimentierten, um die optische Kohärenztomographie (OCT) zu simulieren. Sie untersuchten auch, wie Licht biologisches Gewebe durchdringt, indem sie Gelatinephantome mit verschiedenen Materialien (zur Simulation von Tumoren oder Blutgefäßen) herstellten und mit roten Laserpointern die Streuung und Absorption beobachteten.

Der Höhepunkt des Projekts waren Präsentationen der Schüler, in denen sie ihre eigenen bioinspirierten Bildgebungsinstrumente vorstellten und dabei ihr optisches Verständnis mit realen Herausforderungen im Gesundheitswesen verknüpften. Einige Schulen nutzten CoSpaces Edu, um die Schüler diese Geräte in AR simulieren zu lassen (MINT-EC, 2022).

6.3 Beispiel 2: BIOS4You-Projekt – Lasersimulation in AR

Im Rahmen des Erasmus+-Projekts BIOS4You nahmen Schüler aus mehreren europäischen Ländern an Modulen teil, in denen sie mithilfe von Augmented Reality untersuchten, wie Tiere Licht wahrnehmen und wie dieses Wissen in die laserbasierte Diagnostik übertragen wird. Eine Einheit konzentrierte sich auf das polarisierte Sehen der Fangschreckenkrebe (), wobei die Lernenden ein 3D-Modell des Tieres betrachteten und dann zu einer virtuellen Simulation eines polarisationsbasierten Krebserkennungsinstruments wechselten.

Die Schüler lernten, wie polarisiertes Laserlicht zur Unterscheidung von krebsartigem und gesundem Gewebe eingesetzt wird, indem sie mit virtuellen Diagnoseschnittstellen interagierten, Laserwellenlängen einstellten und farbcodierte AR-Overlays interpretierten. Die Aktivität trug dazu bei, abstrakte biomedizinische Konzepte zu konkretisieren und gleichzeitig die reale Umsetzung von Bio-Inspiration in Technologie zu demonstrieren. Das Feedback der Lehrer zeigte eine verbesserte Beteiligung und ein besseres Verständnis, insbesondere bei visuellen Lernern.

6.4 Beispiel 3: iLASER – Irlands nationale Initiative zur Photonikausbildung

Die Initiative iLASER (Inspiring Laser Awareness in Schools through Educational Resources), die von Forschern in Irland geleitet wird, entwickelte ein Toolkit für Naturwissenschaftslehrer der Sekundarstufe, um Laserphysik und -anwendungen vorzustellen. Die Schüler lernten das elektromagnetische Spektrum kennen, bauten ihre eigenen einfachen Lasergeräte mit sicheren





Infrarot-LEDs und Kunststoffoptiken und beschäftigten sich mit Lasersicherheit, Glasfasertechnik und medizinischer Bildgebung.

Einer der Höhepunkte des iLASER-Lehrplans war die Herausforderung „Laser in der Medizin“, bei der die Schüler die Aufgabe hatten, ein nicht-invasives Diagnosegerät zu entwerfen. Sie verwendeten AR-Simulationen und digitale Schaltpläne, um Geräte wie tragbare Glukosemonitore oder berührungslose Hautkrebsdetektoren zu entwerfen. Das Programm legte den Schwerpunkt auf forschendes Lernen, Zusammenarbeit mit Gleichaltrigen und die Lösung realer Probleme. (iLASER, 2021).

6.5 Lernergebnisse und pädagogische Auswirkungen

Diese Beispiele aus der Praxis zeigen, wie Laserausbildung effektiv in Schulen integriert werden kann, wenn sie begleitet wird von:

- Sicheren, praktischen Experimenten, die Laser entmystifizieren;
- AR-Simulationen, die die Wechselwirkung zwischen Licht und Gewebe visualisieren;
- Bioinspirierten Aktivitäten, die die Lebenswissenschaften mit dem Ingenieurwesen verbinden;
- schülerzentrierten Designprojekten, die Kreativität und Problemlösungsfähigkeiten fördern.

Untersuchungen zeigen, dass die Kombination von physikalischer Manipulation (wie Linsen und Laser) mit digitaler Erweiterung (wie AR-Overlays) zu einer stärkeren Beibehaltung von Konzepten und einer erhöhten Motivation führt (Bacca et al., 2014; De Miguel & Martínez, 2023). Diese Programme regen Schüler auch dazu an, über eine Karriere im MINT-Bereich nachzudenken, darunter Medizinphysik, Biomedizintechnik und Photonik.

7. Wissenschaftliche Grundlagen für die Integration von Augmented Reality in die Ausbildung im Bereich Laserdiagnostik

7.1 Kognitive Begründung: Visualisierung des Unsichtbaren in der Optik und Biophotonik

Die Laserdiagnostik befasst sich mit von Natur aus unsichtbaren oder submikroskopischen Phänomenen: Gewebestreue, Photonenabsorption, kohärente Wellenfronten und Änderungen des Brechungsindex. Diese Prozesse sind für Schüler der Sekundarstufe mit traditionellen 2D-Diagrammen oder statischen Medien nur schwer zu veranschaulichen. AR schließt diese Lücke, indem es eine verkörperte, räumliche und Echtzeit-Visualisierung der Wechselwirkungen zwischen Licht und Gewebe ermöglicht.

Gemäß der Dual-Coding-Theorie (Paivio, 1991) und der kognitiven Belastungstheorie (Sweller et al., 1998) lassen sich komplexe wissenschaftliche Prozesse besser verstehen, wenn verbale Informationen mit dynamischen visuellen Darstellungen kombiniert werden. AR ermöglicht eine Minimierung der geteilten Aufmerksamkeit, indem Visualisierungen direkt in das Wahrnehmungsfeld des Benutzers eingebettet werden, beispielsweise durch die Projektion, wie ein Laserstrahl durch geschichtete Gewebe gebrochen wird, oder durch die Darstellung, wie polarisiertes Licht rotiert, wenn es auf ausgerichtete Kollagenfasern in Tumoren trifft. Diese kontextuelle Kopplung von räumlichen und konzeptuellen Informationen verbessert die Speicherung und den Transfer von Wissen erheblich (Cheng & Tsai, 2013).





7.2 Wissenschaftliche Begründung: Laser-Gewebe-Interaktion und optische Simulationen in AR

Jüngste Fortschritte in der Echtzeit-Darstellung der optischen Physik machen es technisch möglich, Laser-Gewebe-Wechselwirkungen in AR genau zu simulieren. Dazu gehören:

- Raytracing-Algorithmen, die für mobile AR-Plattformen angepasst wurden und zeigen können, wie sich Laserstrahlen in mehrschichtigen biologischen Medien verhalten, einschließlich Reflexion, Brechung und Streuung an Grenzen (z. B. Hornhaut-Netzhaut, Haut-Fett-Muskel).
- Monte-Carlo-Lichttransportmodelle, die traditionell in der medizinischen Bildgebungsforschung verwendet werden, können nun vereinfacht und in AR-Engines integriert werden, um die Photonenabsorptionstiefe, die Fluenzrate und die optische Weglänge unter verschiedenen Wellenlängen zu simulieren (Jacques, 2013).
- In simulierten Diagnosen wie OCT oder photoakustischer Bildgebung können Studierende die Strahlfokussierung, Kohärenzgating und die Signalerückgabe des Gewebes visualisieren, was zu einem tieferen Verständnis der Signalbildung und Bildauflösung beiträgt.

Durch die Verwendung von AR zur Visualisierung dieser Wechselwirkungen können die Studierenden mit Variablen (z. B. Wellenlänge, Gewebetyp, Strahlwinkel) auf eine Weise experimentieren, die in Schullabors unmöglich wäre – und erhalten so ein virtuelles, aber wissenschaftlich valides Modell der Wechselwirkung von Licht mit biologischen Systemen.

7.3 Empirische Belege: AR im Unterricht in Optik und Biomedizin

Eine wachsende Zahl empirischer Studien belegt die Wirksamkeit von AR beim Unterrichten lichtbezogener Inhalte:

- Dünser et al. (2012) stellten fest, dass Schüler der Oberstufe, die Optik mit AR-Modulen lernten, im Vergleich zu denen, die traditionelle Materialien verwendeten, ein deutlich verbessertes räumliches Denkvermögen und eine höhere konzeptionelle Genauigkeit aufwiesen.
- Ibáñez et al. (2014) zeigten, dass die Integration von AR in den Physikunterricht, insbesondere für Wellen- und Interferenzmuster, die Fähigkeit der Schüler verbesserte, abstrakte Prinzipien zu visualisieren und sie auf reale biomedizinische Kontexte anzuwenden.
- Eine Studie von Ferrer-Torregrosa et al. (2016) im Bereich der biomedizinischen Ingenieursausbildung zeigte, dass AR-basierte Simulationen optischer Techniken wie konfokale Mikroskopie und Laserscanning die Genauigkeit der diagnostischen Interpretation und das Engagement erhöhten, insbesondere bei Schülern mit geringen Vorkenntnissen.
- Jüngste Forschungen zur Gamifizierung von MINT-Fächern und zur XR-Ausbildung (De Miguel & Martínez, 2023) zeigen, wie interaktive AR-Simulationen von Diagnosegeräten – wie sie in BIOS4You verwendet werden – die Motivation der Schüler steigern und zu einer tieferen konzeptionellen Integration von Physik, Biologie und Technologie führen.





7.4 Überlegungen zur Umsetzung: Genauigkeit und pädagogische Ausrichtung

Damit die Integration von AR in der Ausbildung zur Laserdiagnostik wissenschaftlich effektiv ist, müssen zwei wichtige Grundsätze beachtet werden:

1. **Modelltreue:** Simulationen müssen die physikalische Optik – d. h. Strahldivergenz, Einfallswinkel, Gewebeanisotropie – genau widerspiegeln, auch wenn sie vereinfacht sind. Visualisierungen mit geringer Fidelity können zu Fehlvorstellungen führen (z. B. konstante Strahlendringtiefe oder falsche Lichtausbreitung in heterogenen Geweben).
2. **Pädagogische Ausrichtung:** AR-Aktivitäten müssen mit forschungsbasiertem Lernen verbunden sein, bei dem die Schüler Hypothesen aufstellen, variable Veränderungen testen und Diagnoseergebnisse interpretieren, anstatt passiv Animationen anzusehen.

Beispielsweise ermöglicht die Verwendung von AR zur Simulation der Laserdurchdringung in gesunder Haut im Vergleich zu krebsbefallener Haut den Lernenden, die Wellenlänge anzupassen und Unterschiede in der Tiefe und Streuung zu beobachten, wodurch das Verständnis der Prinzipien der optischen Biopsie vertieft wird.

Fazit

Das Verständnis der Wechselwirkung zwischen Licht und biologischem Gewebe öffnet ein Fenster zu einem der fortschrittlichsten und wirkungsvollsten Bereiche der modernen Medizin: der laserbasierten Diagnostik. Diese Lerneinheit hat Schülern der Sekundarstufe die wissenschaftlichen Prinzipien der Laserphysik, der biomedizinischen Optik und diagnostischer Technologien wie der optischen Kohärenztomographie (OCT), der laserinduzierten Fluoreszenz (LIF) und der photoakustischen Bildgebung nähergebracht. Durch die Untersuchung, wie bestimmte Wellenlängen des Lichts wichtige physiologische und pathologische Informationen offenbaren können, erhalten die Schüler Einblicke in die praktischen Anwendungen von MINT-Kenntnissen an der Schnittstelle von Physik, Biologie und medizinischer Innovation.

Die Integration von Augmented-Reality-Tools (AR) spielt eine wichtige Rolle dabei, komplexe Phänomene sichtbar, interaktiv und ansprechend zu gestalten. AR-Simulationen ermöglichen es den Schülern, unsichtbare Prozesse zu visualisieren, z. B. wie Laserstrahlen in Geweben gestreut werden, wie Bildsignale erzeugt werden und wie die Diagnosegenauigkeit von optischen Parametern abhängt. Diese Tools fördern nicht nur ein tieferes Verständnis durch Erfahrungslernen, sondern auch Kreativität und Neugier, indem sie es den Schülern ermöglichen, Variablen zu testen, Szenarien zu entwerfen und sich diagnostischen Herausforderungen zu stellen.

Darüber hinaus werden die Lernenden durch bioinspiriertes Design Thinking dazu angeregt, sich von optischen Lösungen aus der Natur, wie z. B. der Polarisationsempfindlichkeit von Meerestieren, inspirieren zu lassen, um neuartige Diagnosewerkzeuge zu entwickeln. Dies fördert interdisziplinäres Denken und verbindet das im Unterricht erworbene Wissen mit der Spitzenforschung hinter medizinischen Technologien.

Am Ende dieser Einheit haben die Schüler nicht nur ein solides konzeptionelles Verständnis der Wechselwirkung zwischen Laser und Gewebe entwickelt, sondern auch ihre Problemlösungsfähigkeiten, ihr wissenschaftliches Denken und ihre digitale Kompetenz durch den Einsatz von AR-gestützten Umgebungen gestärkt. Dieser Lernpfad veranschaulicht, wie





komplexe wissenschaftliche Inhalte zugänglich, interaktiv und zukunftsorientiert gestaltet werden können, um die Schüler darauf vorzubereiten, kritisch und kreativ über die Rolle von Licht und Technologie bei der Verbesserung der menschlichen Gesundheit nachzudenken.

Phase	Beschreibung
Erkunden	-Wissenschaftliche Entdeckung: Die Schüler werden durch angeleitete Forschung in die Grundlagen der Wechselwirkung zwischen Licht und Laser und Gewebe eingeführt, einschließlich der Verwendung von Laserdagnostik in der Medizin (z. B. OCT, Fluoreszenzbildgebung). -Untersuchung biologischer Inspirationen: Die Lernenden erkunden natürliche Sehsysteme (z. B. Fangschreckenkreise, Schmetterlingsflügel) und deren Einfluss auf moderne Diagnosewerkzeuge. -Bedarfs- und Kontextanalyse: Die Lehrkräfte bewerten die Vorkenntnisse der Schüler in Optik und Biologie und identifizieren Fehlvorstellungen in Bezug auf Licht, Brechung oder biologische Bildgebung.
Ausführen	-Unterrichtsdurchführung: Der Kernunterricht wird in einer Kombination aus Biologie und Physik erteilt und umfasst die Grundlagen der Lasertechnik, Diagnosegrundsätze und die Wechselwirkung mit Gewebe. -AR-basierte Aktivitäten: Die Schüler nehmen an AR-Simulationen teil, um zu untersuchen, wie sich Laserlicht in Gewebeschichten verhält, und ahmen dabei diagnostische Verfahren nach (z. B. Anpassung der Wellenlänge an bestimmte Gewebe). -Feedbackschleife: Die Lehrkräfte sammeln formatives Feedback durch Reflexionsjournale, AR-Quizze und Diskussionen unter Gleichaltrigen, um das konzeptionelle Verständnis zu überprüfen.





-Augmented Visualization: AR-Tools simulieren Streuung, Absorption und das Verhalten von Laserstrahlen in virtuellen Gewebemodellen, sodass die Schüler mit Diagnoseeinrichtungen interagieren und diese manipulieren können.

-Design und Innovation: Die Schüler konzipieren oder prototypisieren ein laserbasiertes Diagnosewerkzeug, das vom Sehvermögen von Tieren inspiriert ist, und wenden dabei das in AR Gelernte an.

-Interdisziplinäre Verbindungen: Die Schüler reflektieren darüber, wie Biologie, Physik und Technik in realen medizinischen Werkzeugen kombiniert werden.

- Gamifizierte Elemente zur Förderung des Engagements der Studierenden (Laserkontext)

- Punkte und Abzeichen: Die Studierenden sammeln Punkte, indem sie AR-Aktivitäten wie die Simulation von OCT oder die Anpassung von Parametern in einem Laser-Gewebemodell erfolgreich abschließen. Abzeichen werden für Meilensteine wie „Genaue Diagnose“ oder „Optik-Meister“ vergeben.
- Ranglisten: Die Schüler oder Teams werden anhand der Diagnosegenauigkeit, der Zeit für die Bewältigung von Laserscan-Herausforderungen oder des Erfolgs bei der Identifizierung von Geweben in AR-Scans bewertet.
- Quests und Levels: Die Studierenden absolvieren AR-gestützte Diagnosefälle und arbeiten sich von einfachen Laser-Gewebe-Simulationen zu komplexen mehrschichtigen Bildgebungsszenarien vor.
- Entdeckungsbelohnungen: Im AR-Modell sind Bonusobjekte oder medizinische Erkenntnisse versteckt. Beispielsweise können die Studierenden versteckte Schichten in einem virtuellen Hautquerschnitt entdecken, um durch Laserreflexion ein Melanom im Frühstadium aufzudecken.
- Kollaborative Herausforderungen: Teams arbeiten zusammen, um diagnostische Rätsel zu lösen, z. B. das Erkennen von Anomalien in einem simulierten Gewebescan oder das Vorschlagen einer bioinspirierten Verbesserung für ein Laserwerkzeug.

AR-basierte Bewertungsinstrumente (Laser Learning Focus)

- Interaktive Kontrollpunkte: Die Schüler demonstrieren ihr Verständnis der Lichtausbreitung und -absorption anhand von beschrifteten AR-Gewebemodellen.
- Szenariobasierte Aufgaben: Die Studierenden interpretieren AR-simulierte Diagnoseergebnisse (z. B. farbcodierte Fluoreszenzbildgebung) und begründen ihre Entscheidungen.
- Kompetenzabzeichen: Werden für die genaue Erklärung der Auswirkungen der Laserwellenlänge auf die Gewebedurchdringung oder der Verwendung von Polarisation zur Erkennung von Krankheiten vergeben.





Referenzen

Akçayır, M., & Akçayır, G. (2017). Vorteile und Herausforderungen von Augmented Reality im Bildungsbereich: Eine systematische Übersicht. *Educational Research Review*, 20, 1–11.

Albrecht, U. V., et al. (2013). Auswirkungen des mobilen AR-Lernens im Vergleich zum Lernen mit Lehrbüchern auf Medizinstudenten: Pilotstudie – *Journal of Medical Internet Research*, 15(8), e182.

Arvanitis, T. N., et al. (2009). Menschliche Faktoren in der mobilen AR für den naturwissenschaftlichen Unterricht, die von Lernenden mit Behinderungen genutzt wird. *Personal and Ubiquitous Computing*, 13(3), 243–250.

Bacca, J., et al. (2014). AR-Trends in der Bildung: Eine systematische Übersicht. *Educational Technology & Society*, 17(4), 133–149.

Barsom, E. Z., Graafland, M., & Schijven, M. P. (2016). AR-Anwendungen in der medizinischen Ausbildung: Eine systematische Übersicht. *Surgical Endoscopy*, 30(10), 4174–4183.

Cheng, K. H. und Tsai, C. C. (2013). Möglichkeiten von Augmented Reality im naturwissenschaftlichen Unterricht: Vorschläge für die zukünftige Forschung. *Journal of Science Education and Technology*, 22(4), 449–462.

De Miguel, M., & Martínez, A. (2023). AR in der MINT-Ausbildung: Engagement und Lernen der Studierenden. *Education Sciences*, 13(1), 84. <https://www.mdpi.com/2227-7102/13/1/84>

Dünser, A., Walker, L., Horner, H., & Bentall, D. (2012). Erstellung interaktiver Physiklehrbücher mit Augmented Reality. *Tagungsband der 24. Australian Computer-Human Interaction Conference*.

Ferrer-Torregrosa, J., Jimenez-Rodriguez, M. A., Torralba-Estelles, J., et al. (2016). Fernunterricht E-Learning-Plattformen in den Biomedizin- und Gesundheitswissenschaften: E-Learning-Simulation für laserbasierte Diagnostik. *BMC Medical Education*, 16, 274.

Ibrahim, A., Awooda, E., & Elnour, A. (2022). Die Kostenbarriere laserbasierter Diagnosesysteme in Subsahara-Afrika: Eine Herausforderung für neue medizinische Technologien. *Health Technology*, 12(3), 225–233.

Ibáñez, M. B., Di Serio, Á., Villarán, D. und Kloos, C. D. (2014). Experimente mit Elektromagnetismus unter Verwendung von Augmented Reality: Auswirkungen auf die





Lernerfahrung der Studierenden und die pädagogische Wirksamkeit. *Computers & Education*, 71, 1–13.

Jacques, S. L. (2013). Optische Eigenschaften biologischer Gewebe: Eine Übersicht. *Physik in Medizin und Biologie*, 58(11), R37–R61.

Le, T., Chen, Y. und Chang, J. (2023). Miniaturisierte Laser-Biosensoren für die Point-of-Care-Diagnostik: Fortschritte und zukünftige Trends. *Sensoren und Aktoren B: Chemie*, 383, 134648.

Paivio, A. (1991). Dual-Coding-Theorie: Rückblick und aktueller Stand. *Canadian Journal of Psychology*, 45(3), 255–287.

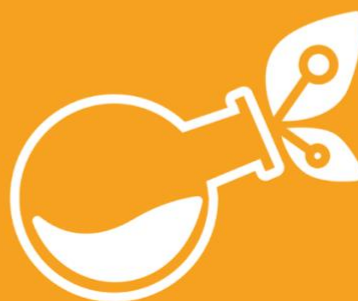
Sweller, J., van Merriënboer, J. J., & Paas, F. G. (1998). Kognitive Architektur und Unterrichtsgestaltung. *Educational Psychology Review*, 10(3), 251–296.

Zafar, S., Awais, M. und Zafar, A. N. (2021). Augmented Reality in der medizinischen Ausbildung: Eine Metaanalyse systematischer Übersichtsarbeiten. *Frontiers in Public Health*, 9, 638259.





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: KA220-BW-23-30-126516

*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.