



Co-funded by
the European Union

Licht und das Gehirn: Erforschung von Neuronen und Lichtempfindlichkeit



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
· Duales System der Lichtwahrnehmung: Photorezeptoren und Nervenbahnen.....	3
· Wie Licht biologische Systeme beeinflusst.....	4
· EEG-Aktivität.....	7
· Vorteile in Verbindung mit Gehirnaktivität und Verhalten.....	9
· Augmented Reality und kognitive Reaktion.....	11
· Erforschung der Gehirnaktivität durch Augmented Reality.....	13
· Ressourcen.....	19





Allgemeines Thema des Lernpfads	Neurowissenschaften und Licht: Verständnis der Reaktionen des Gehirns auf Licht
Spezifischer Name der Lerneinheit	Licht und das Gehirn: Erforschung von Neuronen und Lichtempfindlichkeit
Zielgruppe	14–18 Jahre
Voraussetzungen für Lernende	Grundkenntnisse in Biologie und Physik
Beschreibung der Lerneinheit	Diese Einheit vermittelt Lehrern und Schülern Wissen darüber, wie Licht das Gehirn beeinflusst und wie Neuronen auf äußere Reize wie Licht reagieren. AR-Tools verbessern die Visualisierung und ermöglichen es den Schülern, mit 3D-Modellen von Neuronen und Gehirnstrukturen zu interagieren. Die Schüler erkunden reale Anwendungsbereiche wie zirkadiane Rhythmen, Optogenetik und Lichttherapie.
Beteiligte Fächer	Physik, Biologie, Neurowissenschaften, Kognitionswissenschaft
Stichworte	Licht, Neurowissenschaften, Neuronen, Gehirn, zirkadiane Rhythmen, Optogenetik, AR, Visualisierung, interaktives Lernen
Wichtige Fähigkeiten, Fertigkeiten und Kenntnisse, die erworben werden können	- Verständnis dafür, wie Neuronen kommunizieren und auf Reize reagieren - Erforschung der Auswirkungen von Licht auf Gehirnfunktionen wie Schlaf, Wachsamkeit und Emotionen - Problemlösungsfähigkeiten durch reale Anwendungen (z. B. Lichttherapie, Optogenetik) - AR-basierte Visualisierung und interaktives Lernen mit Gehirnmodellen
Verwendete Ressourcen und didaktische Hilfsmittel	Forschungsarbeiten, Bücher, wissenschaftliche Datenbanken, Online-Ressourcen, AR-Tools (z. B. Merge Cube, JigSpace, BrainVR, Google Expeditions).
Bewertungskriterien und Beurteilung	Basierend auf den während des Kurses erworbenen Kenntnissen, Fähigkeiten und Fertigkeiten, einschließlich AR-basierter Bewertungen, interaktiver Simulationen, Problemlösungsaufgaben und Reflexionen der Studierenden über Licht und das Gehirn.





Einleitung:

Licht hat einen erheblichen Einfluss auf die physiologischen und kognitiven Prozesse des Menschen und wirkt sich über das Sehen hinaus auch auf die neuronale Aktivität, Emotionen und biologischen Rhythmen aus. Licht ist ein wichtiger Umweltfaktor, der verschiedene Gehirnfunktionen beeinflusst. Klinische Studien haben das therapeutische Potenzial der Lichttherapie bei der Behandlung von Erkrankungen wie Depressionen, kognitiven Beeinträchtigungen, chronischen Schmerzen und Schlafstörungen gezeigt. Die genauen biologischen Mechanismen, über die die Lichttherapie ihre Wirkung entfaltet, sind jedoch noch nicht vollständig geklärt (Huang et al., 2024).

Das Gehirn verarbeitet Licht über visuelle und nicht-visuelle Bahnen und reguliert so wichtige Funktionen wie den Tagesrhythmus, den Pupillenreflex und die kognitive Leistungsfähigkeit. Jüngste Forschungsergebnisse haben gezeigt, dass helles Licht die kognitive Leistungsfähigkeit durch Beeinflussung der hypothalamischen Aktivität verbessert, was auf einen direkten Zusammenhang zwischen Lichteinwirkung und geistiger Leistungsfähigkeit hindeutet (<https://neurosciencenews.com/cognition-bright-light-25973/?utm>). Darüber hinaus haben Studien gezeigt, dass das Verhalten in Bezug auf die Lichtexposition die Stimmung, das Gedächtnis und die Schlafqualität vorhersagt, was die entscheidende Rolle des Lichts bei der neurophysiologischen Regulation unterstreicht (Siraji et al., 2023).

In den Neurowissenschaften hat sich die Optogenetik als revolutionäre Technik etabliert, die Optik und Genetik kombiniert, um die Aktivität einzelner Neuronen in lebendem Gewebe zu steuern und zu überwachen. Fortschritte in der Optogenetik haben ihre Anwendungsmöglichkeiten über die Grundlagenforschung hinaus erweitert und ermöglichen die Regulierung zellulärer Aktivitäten für biomedizinische Behandlungen wie Photomedizin und Immuntherapie (Chen et al., 2022).

Diese Entwicklungen unterstreichen das therapeutische Potenzial lichtbasierter Interventionen bei der Behandlung von Störungen des zentralen Nervensystems und bieten neue Möglichkeiten in der Neurotherapie (Geng et al., 2023).

Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass Lichtinterventionen einen erheblichen Einfluss auf die Wachsamkeit und geistige Leistungsfähigkeit haben, insbesondere bei der Bekämpfung kognitiver Ermüdungserscheinungen nach dem Mittagessen, was verdeutlicht, wie eine kontrollierte Lichtexposition die Leistungsfähigkeit des Menschen optimieren kann (Askarpoor et al., 2019).

Diese Trainingseinheit führt die Schüler in die interdisziplinären Zusammenhänge zwischen Neurowissenschaften, Physik und biomedizinischen Anwendungen ein und konzentriert sich dabei auf den Einfluss von Licht auf die Gehirnaktivität und die kognitive Leistungsfähigkeit. Die Schüler nutzen die Augmented-Reality-App Brainapse, um interaktive und visuell angereicherte



Lernerfahrungen zu machen. Anhand dynamischer 3D-Modelle des Gehirns und animierter Nervenbahnen untersuchen sie, wie Neuronen auf Reize wie Licht reagieren und wie diese Reaktionen mit kognitiven und sensorischen Funktionen zusammenhängen. Durch das Eintauchen der Schüler in realistische Visualisierungen von Gehirnstrukturen und -prozessen unterstützt Brainapse ein tieferes Verständnis der neuronalen Funktionen und fördert das kritische Denken über die Rolle des Lichts in der neurowissenschaftlichen Forschung und in lichtbasierten therapeutischen Technologien.

Duales System der Lichterkennung: Photorezeptoren und Nervenbahnen

Bei Tieren, einschließlich Menschen, befinden sich Photorezeptoren (lichtempfindliche Zellen), sogenannte Stäbchen und Zapfen, in der Netzhaut, einer Gewebeschicht im hinteren Teil des Auges, die auf Licht reagiert. Die Stäbchen und Zapfen analysieren visuelle Signale, die über elektrische Signale an das Gehirn übertragen werden, das dann interpretiert, was „gesehen“ wird. Eine andere Art von Photorezeptoren in der Netzhaut, die intrinsisch lichtempfindlichen retinalen Ganglienzellen (ipRGCs), verwenden lange Fortsätze (Axone), die den Sehnerv bilden, um visuelle Signale von Stäbchen und Zapfen weiterzuleiten. Die ipRGCs erfüllen auch andere Funktionen, wie z. B. die Einstellung der lichtgesteuerten circadianen Rhythmen des Körpers und die Unterscheidung von Kontrast und Farbe. Es ist bekannt, dass Photorezeptoren bei Tieren Licht mithilfe eines Signalwegs erkennen, der nach dem Ursprung der Zelle benannt ist (<https://www.hopkinsmedicine.org/news/newsroom/news-releases/2024/01/retinal-photoreceptors-use-dual-pathways-to-tell-brain-ive-seen-the-light>).

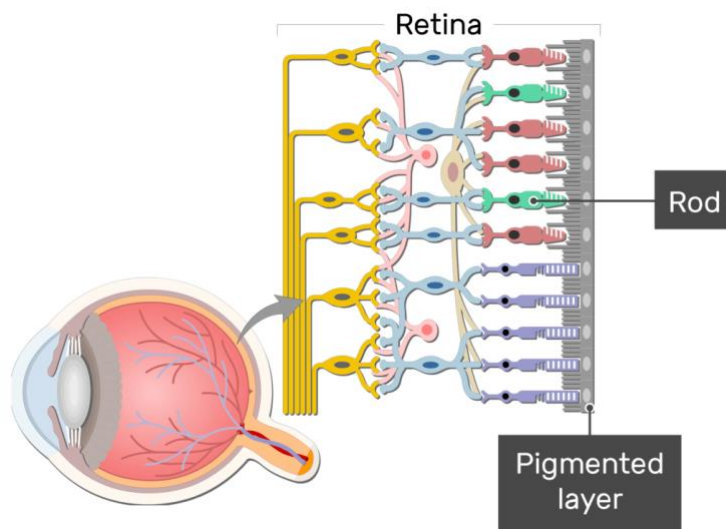


Abbildung 1. <https://www.getbodysmart.com/sensory-system/retina/>

Menschen verbringen einen erheblichen Teil ihres Lebens in Innenräumen, schätzungsweise etwa 80 % bis 90 % (Thach et al., 2020). Daher ist der Einfluss von Innenräumen auf den Komfort der Nutzer zu einem zentralen Thema in Forschung und Praxis geworden (Lamb et al., 2016). In den letzten Jahren wurde der entscheidenden Rolle der thermischen und lichttechnischen Bedingungen bei der Gestaltung von Büroumgebungen zunehmend Aufmerksamkeit geschenkt



(Konstantzos et al., 2020). Es hat sich gezeigt, dass diese Umweltfaktoren einen starken Einfluss auf das Stressniveau und die Arbeitsleistung der Mitarbeiter haben und letztlich die allgemeine Zufriedenheit des Einzelnen und des Teams beeinflussen (Witterseh et al., 2004). Unter diesen Faktoren sind die korrelierte Farbtemperatur (CCT) und die thermische Wahrnehmung von entscheidender Bedeutung, da sie sich direkt auf den Komfort, den Stress und die Leistungsfähigkeit in Innenräumen auswirken.

Wie Licht biologische Systeme beeinflusst

Veränderungen der Lichtverhältnisse haben weitreichende Auswirkungen auf verschiedene physiologische und Verhaltensfunktionen, darunter den Tagesrhythmus, die Stimmung und die kognitiven Fähigkeiten (LeGates et al., 2014).

Die Stabilität des Sonnenzyklus dient als entscheidender Anhaltspunkt für die Regulierung des Verhaltens von Säugetieren, vor allem durch seinen signifikanten Einfluss auf die Stimmung und die kognitiven Funktionen. Diese Einflüsse wurden ausführlich an Labortieren (Bedrosian et al., 2011; LeGates et al., 2012) und Menschen (Vandewalle et al., 2010) untersucht. Störungen der Lichtexposition, sei es aufgrund natürlicher Umwelt en oder menschlicher Aktivitäten wie dem Überqueren von Zeitzonen und Jetlag sowie Schichtarbeit, wurden mit depressiven Symptomen und kognitiven Beeinträchtigungen in Verbindung gebracht (Roh et al., 2016).

- Zirkadianer Rhythmus

Die circadiane Gesundheit ist für die Abstimmung der inneren biologischen Uhr des Menschen auf den natürlichen Hell-Dunkel-Zyklus von entscheidender Bedeutung. Sie ist entscheidend für das allgemeine Wohlbefinden und beeinflusst den Schlaf, die Stimmung und den Stoffwechsel. Diese innere Uhr befindet sich in einer winzigen Zellgruppe, die als suprachiasmatischer Nucleus (SCN) bekannt ist. Der SCN befindet sich in einem Teil Ihres Gehirns, der als Hypothalamus bezeichnet wird. Im Laufe des Tages senden die Gene der inneren Uhr im SCN Signale, um die Aktivitäten Ihres gesamten Körpers zu steuern.

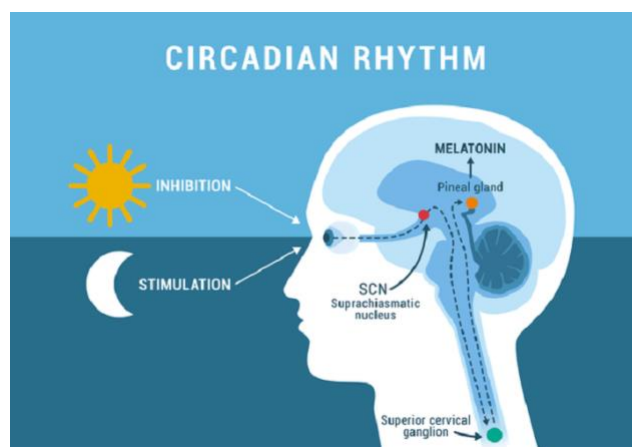


Abbildung 2. Zirkadianer Rhythmus, Quelle: <https://www.okoa.org/articles/circadian-rhythm-see-what-is-it>



Durch das einfallende Tageslicht geschaffene circadiane Lichtverhältnisse bieten Möglichkeiten zur Verbesserung der Energieeffizienz und der Gesundheit in Innenräumen. Diese Einflussfaktoren auf das circadiane Tageslicht lassen sich in vier Dimensionen einteilen. Diese Dimensionen sind: a) Variation der Tageslichtquelle, die von den Sonnen- und Himmelsbedingungen abhängt; b) optische und morphologische Eigenschaften der Fensterverglasung, die die spektrale Leistungsverteilung und Intensität des durchgelassenen Lichts effektiv verändern; c) Innenraumgestaltung und spektrale Eigenschaften der Oberflächen, die die Verteilung des durchgelassenen Lichts im Raum beeinflussen; und schließlich d) menschliche Faktoren, die die Menge des circadianen Tageslichts beeinflussen, indem sie die Blickrichtung und die Hornhauthöhe des Menschen verändern. Ingenieure und Architekten können sich auf die Dimensionen im Zusammenhang mit diesen vier Faktoren konzentrieren. Die Eigenschaften der Fenster und die räumlichen Gegebenheiten im Innenbereich fördern ein gesundes Raumklima, das vom circadianen Licht beeinflusst wird, da die Dimensionen der Tageslichtquelle und die menschlichen Faktoren unvorhersehbar und unkontrollierbar sind (Ardabili et al., 2025).

- Der Pupillenreflex: Wie reagieren unsere Augen auf Licht?

Die Fähigkeit unserer Pupillen, ihre Größe zu verändern, ist eine wichtige physiologische Reaktion, die die auf die Netzhaut fallende Lichtmenge anpasst, um das Sehvermögen zu optimieren und die Netzhaut zu schützen. Pupillen verengen sich als Reaktion auf Helligkeit, während sie sich als Reaktion auf dunkle Bedingungen erweitern (bekannt als Pupillenlichtreflex). Diese Reaktionen stehen zwar in Zusammenhang miteinander, werden jedoch als durch unterschiedliche Nervenbahnen gesteuert angesehen (Mathôt, 2018).

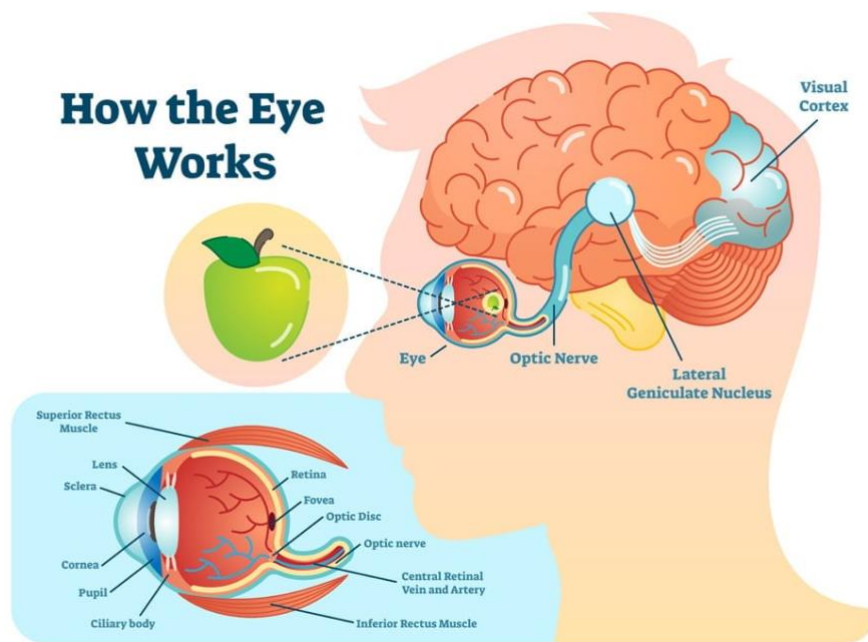


Abbildung 3. Das Auge und das Gehirn, Quelle: VectorMine/Shutterstock



- Menschliche Wahrnehmung und Verhalten:

Die korrelierte Farbtemperatur (CCT) und die thermische Wahrnehmung sind wesentliche Faktoren, die das Raumklima beeinflussen und sich erheblich auf den Komfort, den Stress und die Arbeitsleistung der Bewohner auswirken. Auswirkungen der Beleuchtung auf die Arbeitsleistung, den Stress und die thermische Wahrnehmung in der Arbeitsumgebung (Erkan et al., 2025). Die korrelierte Farbtemperatur (CCT) beschreibt das Erscheinungsbild des Lichts einer Lichtquelle in Bezug auf seinen Farbton. Sie wird üblicherweise nach Wärme oder Kühle kategorisiert: Niedrigere CCT-Werte entsprechen wärmerem, gelblichem Licht, während höhere Werte auf außergewöhnlicheres, bläuliches Licht hinweisen (Liu et al., 2022).

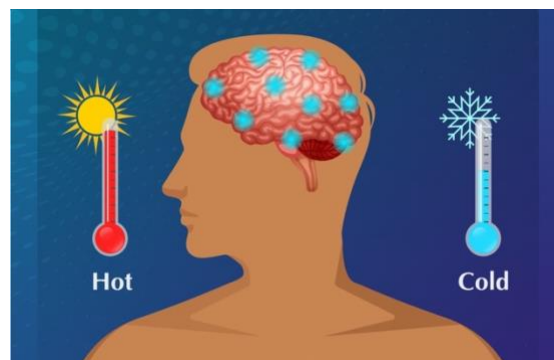


Abbildung 4. Gehirn und thermische Wahrnehmung,
Quelle: <https://www.waseda.jp/top/en/news/83173>

Die subjektive Wahrnehmung der thermischen Umgebung durch den Einzelnen ist entscheidend für den Komfort der Bewohner und steht in engem Zusammenhang mit der Arbeitsleistung in Innenräumen (Soto et al., 2022). Die Berücksichtigung der thermischen Präferenzen des Einzelnen ist für die Förderung von Komfort und Produktivität, insbesondere in Arbeitsumgebungen, von entscheidender Bedeutung. Untersuchungen haben gezeigt, dass Menschen, die sich an ihre thermischen Bedingungen anpassen, mehr Komfort, eine höhere Arbeitszufriedenheit und eine verbesserte kognitive Leistungsfähigkeit erfahren (Yeganeh et al., 2018).

Stress ist die Reaktion des Körpers auf Unsicherheit oder bestimmte Anforderungen. Er äußert sich in der Regel in Alarmreaktionen, Widerstand und Erschöpfung. Diese Phasen spiegeln die physiologischen Bemühungen des Körpers wider, mit Stress umzugehen, und sind durch die Ausschüttung von Cortisol, eine erhöhte Herzfrequenz und die Ausschüttung von Adrenalin gekennzeichnet. Bleibt der Stressor ungelöst, kann der Körper in die letzte Erschöpfungsphase eintreten (Seley, 1956).





Am Arbeitsplatz bezieht sich Stress auf die physiologischen und psychologischen Reaktionen, die Menschen erleben, wenn sie Anforderungen oder Druck wahrnehmen, die ihre Bewältigungsfähigkeit übersteigen (Awada et al., 2023). Dieser Stress kann sich in verschiedenen körperlichen Symptomen äußern, darunter erhöhte Herzfrequenz, Bluthochdruck, Muskelverspannungen, Reizbarkeit, Konzentrationsschwierigkeiten und verminderte kognitive Leistungsfähigkeit (Askariipoor et al., 2018). Ein hohes Stressniveau am Arbeitsplatz kann sich erheblich auf die Arbeitszufriedenheit, Produktivität und Leistung auswirken. Übermäßiger Stress kann auch zu negativen Folgen wie verminderter Motivation, beeinträchtigter Entscheidungsfähigkeit, geringerer Kreativität und erhöhtem Fehlzeitenaufkommen führen (Altindag, 2020).

Elektroenzephalogramm (EEG) und Herzfrequenzvariabilität (HRV) werden häufig zur Beurteilung von Stress eingesetzt (Di az et al., 2019). Das EEG misst die elektrische Aktivität des Gehirns und liefert Einblicke in stressbedingte kognitive und emotionale Prozesse (Choi et al., 2015). Die HRV hingegen erfasst die Zeitintervalle zwischen den Herzschlägen und gibt Aufschluss darüber, wie das autonome Nervensystem Stress reguliert (Kaklauskas et al., 2011). Durch die Verwendung von EEG und HRV als objektive Indikatoren wollen Forscher im Bereich der Neuroarchitektur die physiologischen Reaktionen auf unterschiedliche Licht- und Temperaturbedingungen in Innenräumen besser verstehen (Li et al., 2023).

EEG-Aktivität:

Die Elektroenzephalographie (EEG) misst die elektrische Aktivität des Gehirns, indem sie Signale von Elektroden erfasst, die auf der Kopfhaut angebracht sind (Teplan, 2002). Je nach EEG-Gerät werden verschiedene Elektrodenplatzierungssysteme verwendet. Die rohen EEG-Daten werden in der Regel gesammelt und anschließend verarbeitet, um bestimmte Frequenzbänder zu extrahieren, die für die Stresserkennung relevant sind, hauptsächlich Alpha- und Theta-Wellen.

Die Verarbeitung von EEG-Daten umfasst mehrere Schritte. Zunächst wird das kontinuierliche EEG-Signal in kürzere Segmente oder Epochen unterteilt, die in der Regel jeweils einige Sekunden dauern, um die Analyse zu vereinfachen. Diese Epochen werden dann einer Spektralanalyse unterzogen, die die spektrale Leistungsdichte berechnet und die Extraktion von Merkmalen im Frequenzbereich ermöglicht (Yang et al., 2018). Der Schwerpunkt liegt dabei in erster Linie auf den Frequenzbändern Alpha (8–13 Hz) und Theta (4–7 Hz), von denen bekannt ist, dass sie stressbezogene Gehirnaktivitäten widerspiegeln.

Alpha-Wellen werden typischerweise mit Entspannungszuständen in Verbindung gebracht und häufig in ruhigen oder passiven Zuständen beobachtet (Prent & Smit, 2020). Im Gegensatz dazu stehen Theta-Wellen in Zusammenhang mit kognitiver Belastung, Aufmerksamkeit und emotionaler Erregung, wodurch sie für die Beurteilung von Stress besonders relevant sind (Abdalhadi et al., 2024). Daher wird die Leistung innerhalb dieser Bänder berechnet und analysiert, um den Stresslevel während der Versuchssitzungen zu bestimmen.



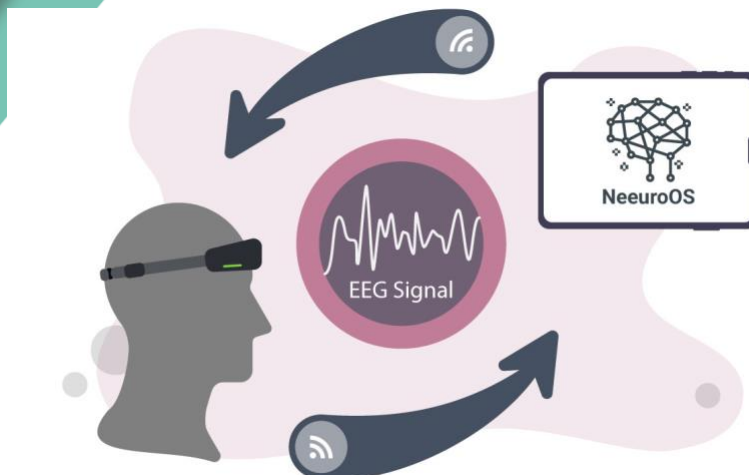


Abbildung 5. Elektroenzephalogramm (EEG), Quelle:
<https://www.neeuro.com/blog/understanding-electroencephalogram-eeeg-for-better-brain-health>

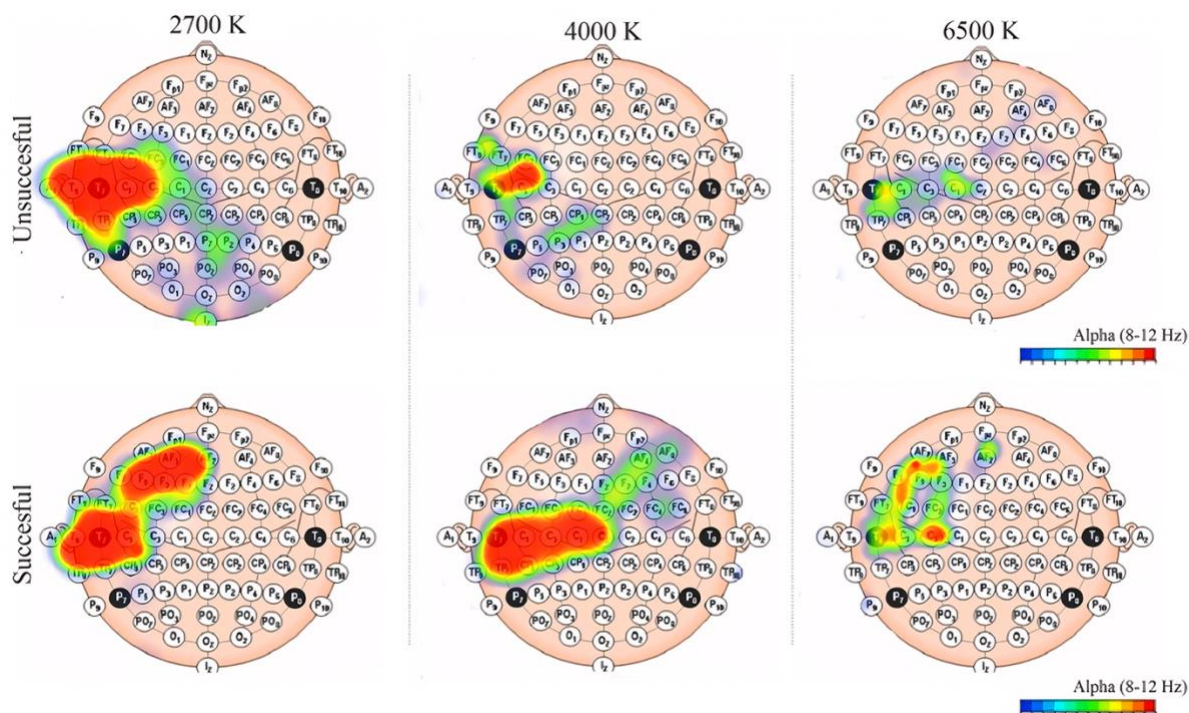


Abbildung 6. Gehirnkarten ändern sich je nach Alpha-Leistung der erfolgreichen/erfolglosen Teilnehmer auf verschiedenen CCT-Levels, Quelle: Erkan et



Die stressbezogenen EEG-Signaturen des Gehirns, wie z. B. eine verringerte Alphawellenleistung und eine erhöhte Theta-Aktivität, sind direkte Marker dafür, wie Wahrnehmung, Emotion und Kognition durch Umweltbedingungen, insbesondere Licht, beeinflusst werden (Yang et al., 2018; Abdalhadi et al., 2024).

Die Lichttherapie ist eine gezielte Intervention, bei der hochintensives, breitbandiges künstliches Licht verwendet wird, um natürliches Tageslicht zu simulieren und die innere Uhr des Körpers zurückzusetzen. Sie wird in der Regel mit einer 10.000-Lux-Lichtbox durchgeführt und ist besonders morgens wirksam, um den Tagesrhythmus neu auszurichten und die neuronale Regulierung von Stress und Stimmung zu verbessern.



Abbildung 7. Lichttherapie, Quelle: <https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-projects/social-and-behavioural-sciences/psychology/bioclock-light-therapy-for-depression>

Vorteile in Bezug auf Gehirnaktivität und Verhalten:

- Steigert Alpha-Wellen (Entspannung): Die Exposition gegenüber hellem Licht erhöht die Alpha-Leistung im EEG, was auf eine verbesserte Ruhe und kognitive Bereitschaft hindeutet (Berger et al., 2022).
- Verbessert den Schlaf-Wach-Rhythmus: Eine Studie der Stanford University ergab, dass die Kombination von Lichttherapie und Verhaltenstechniken Jugendlichen 43 Minuten zusätzlichen Schlaf pro Nacht verschaffte, wodurch schlafbedingter Stress reduziert und die tägliche Leistungsfähigkeit verbessert wurde (Stanford Medicine, 2019).
- Reduziert Depressionssymptome: Helle Lichttherapie verbessert die Erregung des Gehirns und die Regulierung der Stimmung, was mit einer erhöhten präfrontalen Aktivität in Verbindung gebracht wird, die für die emotionale Regulierung bei Teenagern entscheidend ist (Berger et al., 2022).
- Setzt Cortisol- und Melatoninzyklen zurück: Die Exposition gegenüber hellem Licht am frühen Morgen unterdrückt auf natürliche Weise Melatonin (das Schlafhormon) und steigert Cortisol (das Wachheitshormon), wodurch sich das Gehirn tagsüber wacher und emotional ausgeglichener fühlt (Scheer & Buijs, 1999).
- Verbesserung von EEG-Anwendungen durch AR





Die Integration von EEG mit Augmented Reality (AR) bietet eine vielversprechende Richtung für die Entwicklung immersiver, reaktionsschneller Umgebungen, die neurophysiologische Zustände in Echtzeit widerspiegeln. Viczko et al. (2021) untersuchten diese Synergie, indem sie eine AR-Meditationserfahrung mit frontalem Gamma-Asymmetrie-Neurofeedback unter Verwendung eines Muse-EEG-Stirnbandes kombinierten. Die Teilnehmer, die alle unter moderater Angst oder Depression litten, nahmen an einer AR-Erfahrung teil, die darauf abzielte, positive emotionale Zustände hervorzurufen. Sie nutzten ausdrücklich die Healium-App, um Schmetterlinge zu visualisieren, die aus einem Kokon schlüpfen, während die Nutzer sich in liebevoller Güte-Meditation übten.

Die Studie ergab, dass sowohl die reine AR-Gruppe als auch die AR-plus-Neurofeedback-Gruppe (AR+NF) eine signifikante Verbesserung der Stimmung erfuhren, einschließlich einer Verringerung der Anspannung und einer Zunahme der Ruhe, wobei die AR+NF-Gruppe ein höheres Engagement berichtete. Die EEG-Daten zeigten eine erhöhte Alpha-Aktivität und tendenzielle Veränderungen in der Gamma-Aktivität, insbesondere in Gehirnregionen, die mit der Emotionsregulation in Verbindung stehen, wie dem anterioren cingulären Kortex und der Insula. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass EEG-gestützte AR als Echtzeit-Feedbackschleife dienen kann, die die Umgebung auf der Grundlage der Gehirnwellenaktivität anpasst, um meditative oder therapeutische Ergebnisse zu vertiefen.

Entscheidend ist, dass die Studie veranschaulicht, wie AR die EEG-basierte Forschung und Interventionen verbessern kann, indem sie

- Neurofeedback im Kontext zu visualisieren und so das Engagement der Nutzer zu steigern.
- interaktive Erfahrungen zur Emotionsregulation ermöglicht, vor allem durch positive Feedback-Mechanismen wie visuelle Belohnungen (z. B. Schmetterlinge, die schlüpfen, wenn EEG-Schwellenwerte erreicht werden)
- die Echtzeit-Stressüberwachung unterstützt, wobei das EEG als dynamische biometrische Schnittstelle fungiert, die den AR-Inhalt beeinflusst.

Die Integration von EEG und AR bietet somit einen neuartigen pädagogischen und therapeutischen Ansatz und verbessert das Bewusstsein der Nutzer für ihre inneren Zustände. Es ist ein leistungsstarkes Werkzeug für Anwendungen im Bereich Stressmanagement, emotionale Selbstregulierung und psychische Gesundheitserziehung.





Abbildung 8. Beispiele für die Ausrüstung und das visuelle AR-Erlebnis: (A) Muse-Stirnband für Neurofeedback und das Healium-Augmented-Reality-Headset. (B) Das Healium-Neurofeedback-Setup wird getragen. (C) Ein Screenshot der AR-geführten Meditation mit Chrysalis-Hatching-Neurofeedback. Unten sehen Sie eine vergrößerte Darstellung der Schwellenlinie (durchgezogen)

Augmented Reality und kognitive Reaktion:

Physiologische Reaktionen werden durch die Qualität des Raumklimas beeinflusst:

Im Durchschnitt verbringen Menschen etwa 90 % ihrer Zeit in Gebäuden und verbrauchen eine immense Menge an Energie, um ein angenehmes Raumklima aufrechtzuerhalten.

Der größte Teil der in Gebäuden verbrauchten Energie wird für die Aufrechterhaltung der Raumklimaqualität (IEQ) aufgewendet, und eine übermäßige Reduzierung des Energieverbrauchs kann die IEQ für ein angenehmes Leben beeinträchtigen (De Rosa et al., 2014). Daher ist es in der modernen Gesellschaft nicht mehr nur eine Option, sondern eine Notwendigkeit, den Energieverbrauch in Gebäuden zu minimieren und gleichzeitig eine zufriedenstellende IEQ aufrechtzuerhalten (Sujanov'a et al., 2019).

Unterdessen werden Technologien und Methoden zur Überwachung des Energieverbrauchs weiterentwickelt. Energiemanagementsysteme tragen zur Steigerung der Energieeffizienz bei, und es wird erwartet, dass in Zukunft effizientere Prozesse und innovative Technologien entstehen werden (Aliero et al., 2022). Frühere Forschungsergebnisse deuten darauf hin, dass der Energieverbrauch durch die Visualisierung des Energieverbrauchs mithilfe der Augmented-Reality-Technologie (AR) gesenkt werden kann (Bekaro et al., 2018).

Augmented Reality (AR) entwickelt sich rasch zu einem transformativen Werkzeug in der naturwissenschaftlichen Bildung, insbesondere um komplexe biologische Systeme wie das Gehirn für Schüler der Oberstufe zugänglicher zu machen. Eine besonders überzeugende Anwendung ist der Einsatz von AR zur Simulation kognitiver und neurologischer Reaktionen auf Licht, wie Pupillenerweiterung, Reaktionszeit und simulierte neuronale Aktivität. Dies sind



wichtige Indikatoren dafür, wie das Gehirn Lichtreize aus der Umgebung verarbeitet und sein Verhalten entsprechend anpasst.

Lichteinwirkung löst verschiedene physiologische und neurologische Reaktionen im Gehirn aus. Beispielsweise aktiviert das in das Auge eintretende Licht die Photorezeptoren der Netzhaut und löst eine Kaskade aus, die die für Wachsamkeit und circadiane Regulation zuständigen Hirnregionen erreicht. Eine gut dokumentierte Reaktion ist die Veränderung der Pupillengröße, die sowohl die Leuchtdichte als auch die kognitive Anstrengung widerspiegelt. Wie Mathôt (2018) erklärt, bietet die Pupillometrie, also die Messung des Pupillendurchmessers, einen Einblick in die kognitive Belastung und die sensorische Verarbeitung und ist damit ein wertvolles Instrument zur Untersuchung der Gehirnfunktion unter wechselnden Lichtbedingungen.

Obwohl AR-Plattformen die Gehirnaktivität nicht direkt aufzeichnen können, können sie so programmiert werden, dass sie neurologische Ergebnisse auf der Grundlage etablierter wissenschaftlicher Daten simulieren. Untersuchungen von Chang et al. (2012) haben gezeigt, dass selbst kurze Expositionen gegenüber hellem Licht die kognitive Wachsamkeit erheblich steigern und die subjektive Schläfrigkeit verändern können. Diese Erkenntnisse können in interaktive AR-Umgebungen eingebettet werden, um realistische kognitive Effekte zu modellieren.



Abbildung 9. AR-Tools, Quelle: <https://delta2020.com/blog/142-how-augmented-and-virtual-reality-could-help-bring-the-classroom-to-life>

Bei der menschenzentrierten Gestaltung ist es entscheidend zu berücksichtigen, wie sich die Innenraumumgebung auf physiologische und kognitive Reaktionen auswirkt. Faktoren wie Beleuchtung, thermischer Komfort, Luftqualität und Akustik haben einen erheblichen Einfluss auf den Komfort, die Produktivität und das Wohlbefinden der Nutzer (Al Horr et al., 2016; Frontczak & Wargocki, 2011). Diese Umweltfaktoren prägen das körperliche Befinden des Einzelnen und beeinflussen die kognitiven Funktionen, die Aufmerksamkeit und den emotionalen Zustand. Mendell und Heath (2005) stellten beispielsweise fest, dass die Qualität des Raumklimas in Schulen einen direkten Einfluss auf die Leistung und Gesundheit der Schüler hat, was die



Notwendigkeit unterstreicht, der Benutzererfahrung bei der Gebäudeplanung Vorrang einzuräumen.

Jüngste Erkenntnisse haben gezeigt, dass die Visualisierung des Energieverbrauchs durch AR keinen signifikanten Einfluss auf die subjektive Zufriedenheit mit der Raumluftqualität () hat, während der Energieverbrauch in Innenräumen reduziert wird. Ein AR-System überwacht die Reaktionen und das Verhalten der Nutzer, um den Energieverbrauch zu verändern. Dennoch ist es auch wichtig, die Auswirkungen dieser Maßnahmen auf die Zufriedenheit der Nutzer mit der Raumluftqualität zu untersuchen, da diese einen erheblichen Einfluss auf die Zufriedenheit, Gesundheit und Produktivität der Nutzer hat (Mirzaei et al., 2020). Zu diesen physiologischen Reaktionen gehören die Herzfrequenzvariabilität (HRV), das Elektroenzephalogramm (EEG), die elektrodermale Aktivität (EDA) und die Hauttemperatur (SKT), die in vielen Studien im Zusammenhang mit der IEQ verwendet werden, um die subjektive Zufriedenheit der Bewohner quantitativ zu bewerten (Sun et al., 2020).

Erforschung der Gehirnaktivität durch Augmented Reality

Technologie ist mittlerweile fest in der Bildung verankert, und die Ergebnisse zeigen, dass sie sich positiv auf Lern- und Lehrmethoden auswirkt (Dübel et al. 2014). AR/VR-Technologie kann simulierte Erfahrungen bieten, die einige Komponenten des praktischen Unterrichts vorübergehend oder dauerhaft ersetzen (Bakharia et al. 2016). AR bietet eine effiziente Möglichkeit, ein Modell darzustellen, das visualisiert werden muss, sodass ein Gehirnmodell den größten Nutzen aus AR ziehen kann.

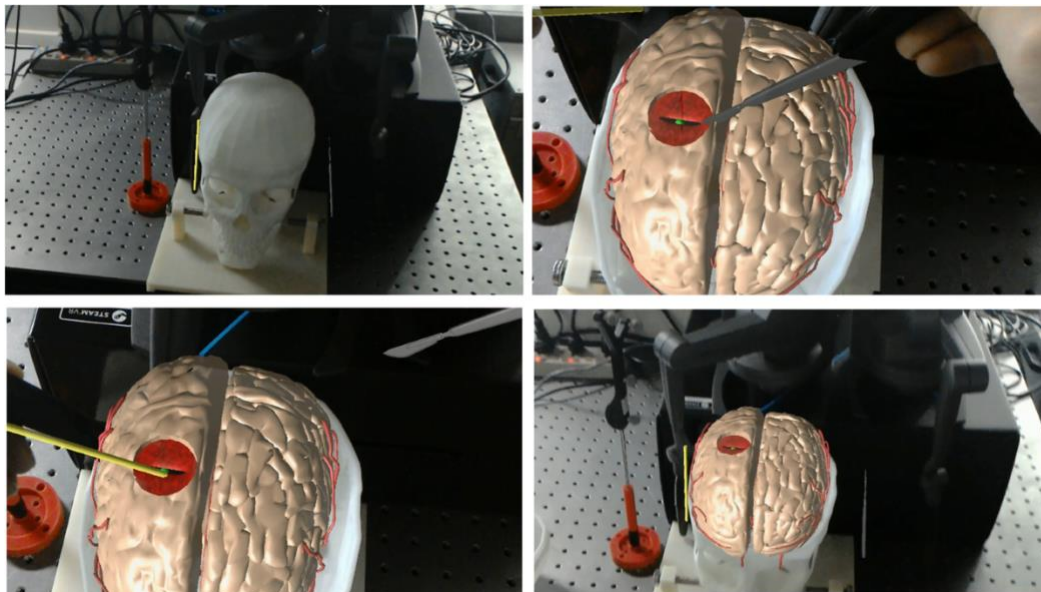


Abbildung 10. Augmented-Reality-Anleitung für die Neurochirurgie, Quelle: Si et al., 2019.





In den letzten Jahren hat sich Augmented Reality (AR) zu einem transformativen Werkzeug in der Bildung und den Neurowissenschaften entwickelt, das neue Möglichkeiten für die Visualisierung und Interaktion mit komplexen biologischen Systemen bietet. Eine vielversprechende Anwendung liegt in der Erforschung der Gehirnaktivität, wo AR die Lücke zwischen abstrakten neuronalen Prozessen und greifbaren Lernerfahrungen schließen kann. AR ermöglicht die räumliche Visualisierung anatomischer Strukturen und Gehirnfunktionen in Echtzeit und verbessert so das Engagement und Verständnis der Lernenden (Bacca et al., 2014; Radu, 2014). Im Kontext der neurowissenschaftlichen Bildung, insbesondere bei jüngeren Lernenden, bieten AR-Anwendungen wie *Brainapse* einen innovativen Ansatz zum Verständnis neuronaler Mechanismen, indem sie digitale Gehirnmodelle mit Animationen der Gehirnaktivität und kognitiven Funktionen überlagern.

Dies steht im Einklang mit den Ergebnissen von Kucuk et al. (2016), die berichteten, dass AR-basierte Lernumgebungen das konzeptionelle Verständnis und die Motivation der Schüler in naturwissenschaftlichen Fächern () erheblich verbessern. Darüber hinaus unterstreicht die Forschung von Billingham et al. (2015) das Potenzial von AR zur Unterstützung des verkörperten Lernens, bei dem sich die Nutzer aktiv mit räumlichen und zeitlichen Darstellungen von Gehirnfunktionen auseinandersetzen. Durch die Integration von AR in die neurowissenschaftliche Ausbildung wollen wir untersuchen, wie diese Technologien die Fähigkeit der Schüler verbessern können, grundlegende Konzepte der Gehirnanatomie und kognitiven Prozesse zu verstehen, und ein tieferes Interesse an MINT-bezogenen Bereichen fördern können.

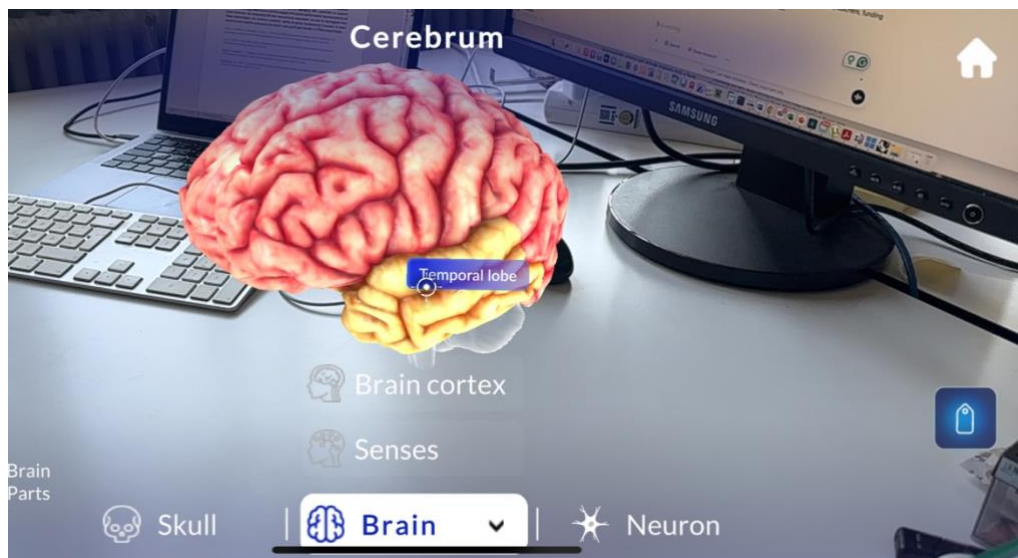
Brainapse ist eine interaktive Bildungs-App, die Augmented Reality (AR) nutzt, um das menschliche Gehirn zum Leben zu erwecken. Durch die Verschmelzung von 3D-Anatomiemodellen mit realen Umgebungen bietet die App Schülern eine ansprechende Möglichkeit, Gehirnstrukturen, Nervenbahnen und kognitive Funktionen zu erkunden. Sie verwandelt abstrakte biologische Konzepte in greifbare Lernerfahrungen und ist daher besonders wertvoll für jüngere Lernende oder diejenigen, die sich zum ersten Mal mit Neurowissenschaften beschäftigen. Mit ihrer visuellen Klarheit und ihrem immersiven Design eröffnet Brainapse neue Möglichkeiten für interaktives, neugiergetriebenes Lernen sowohl innerhalb als auch außerhalb des Klassenzimmers.

Das Bild unten zeigt die Verwendung von Augmented Reality zur dreidimensionalen Visualisierung des menschlichen Schädels. Mit Brainapse können Schüler die anatomische Struktur des Schädels erkunden, der aus dem Schädelknochen und dem Unterkiefer besteht. Diese interaktive Visualisierung hilft den Lernenden, die Schutzfunktion des Schädels und seine Bedeutung für die Aufnahme des Gehirns zu verstehen, und verbessert durch immersive Technologie das räumliche Bewusstsein und die Gedächtnisleistung.



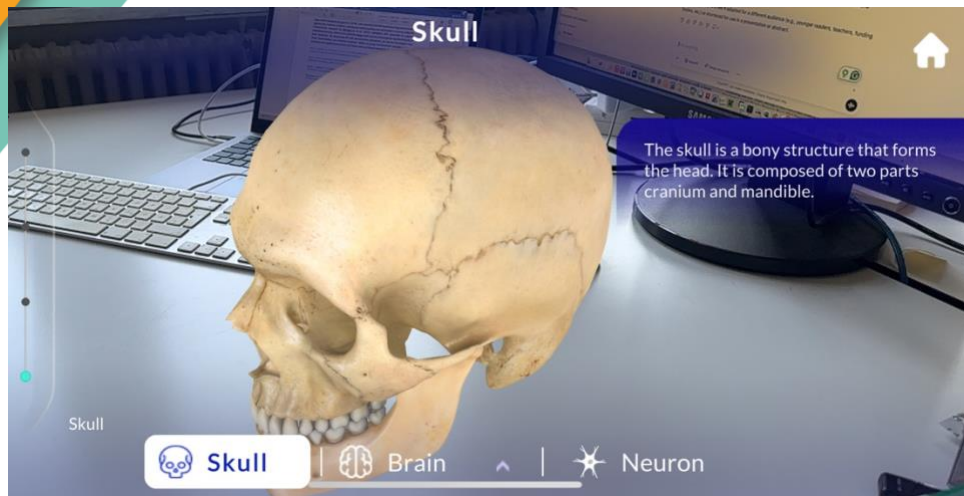


Abbildung 11. Brainapse-App

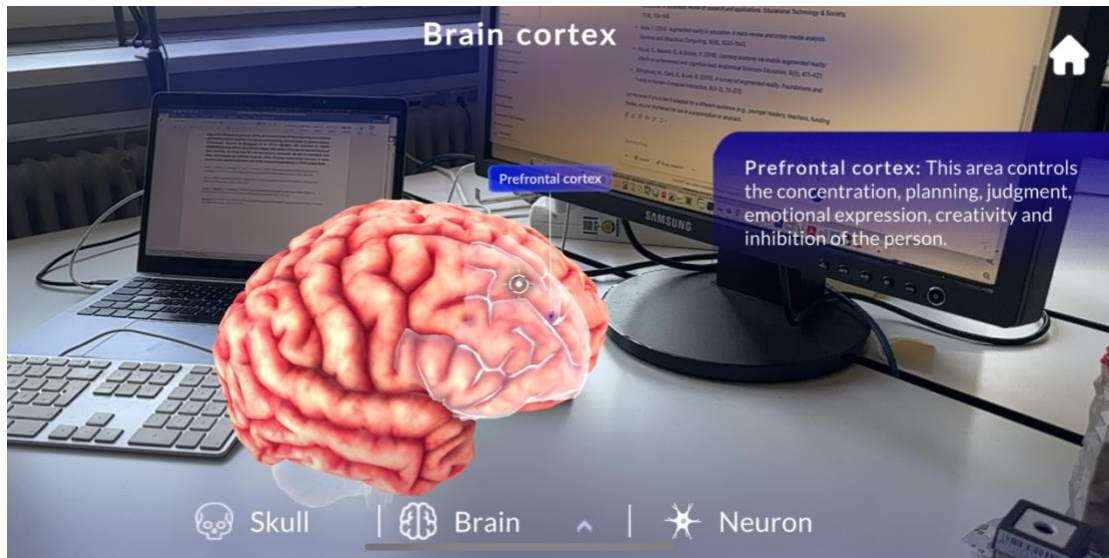


Die folgende Ansicht zeigt das Großhirn mit Schwerpunkt auf dem Temporallappen, einer Region, die für die Verarbeitung von auditiven Informationen und die Gedächtnisbildung unerlässlich ist. Mithilfe von AR können Schüler direkt mit den beschrifteten Teilen des Gehirns interagieren, was ein tieferes Verständnis der funktionellen Neuroanatomie fördert. Solche interaktiven Elemente haben die Wissensspeicherung und die Motivation der Lernenden im naturwissenschaftlichen Unterricht verbessert (Kucuk et al., 2016).

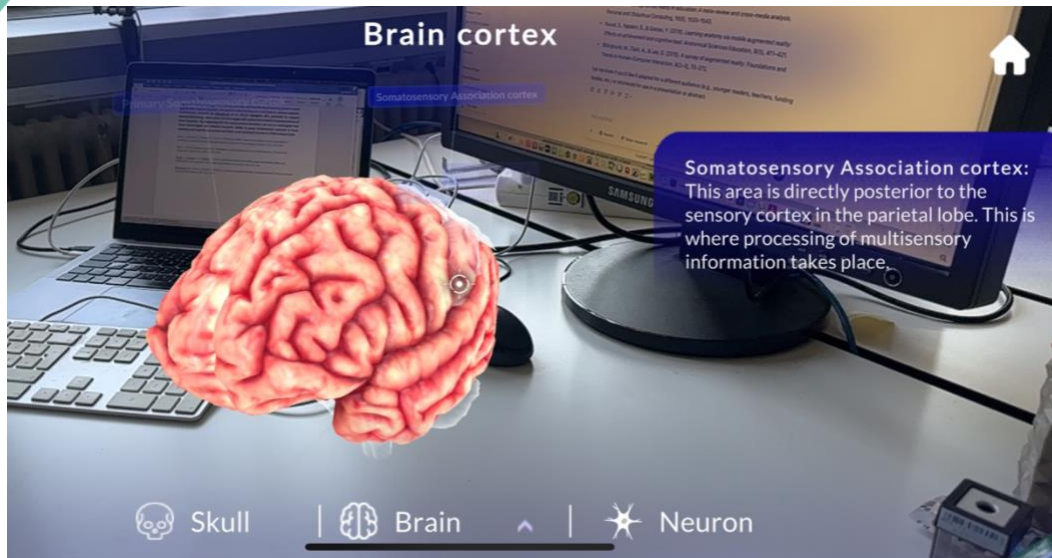




Die App hebt den somatosensorischen Assoziationskortex hervor, der sich im Parietallappen befindet. Dieser Bereich integriert und interpretiert sensorische Informationen aus verschiedenen Modalitäten. Augmented Reality macht dieses Konzept für Schüler konkreter, indem es es in einem realen Kontext präsentiert und so ein Erfahrungslernen ermöglicht, das die multisensorische Beteiligung unterstützt (Bacca et al., 2014).



Diese Visualisierung zoomt auf den präfrontalen Kortex, der für seine Rolle bei der Planung, Entscheidungsfindung, Kreativität und Emotionsregulation bekannt ist. Brainapse ermöglicht es den Lernenden, kognitive Funktionen mit ihren anatomischen Positionen in Verbindung zu bringen, und schafft so eine leistungsstarke Lernerfahrung, die Biologie und Verhalten miteinander verknüpft, unterstützt durch Studien zum AR-gestützten naturwissenschaftlichen Lernen (Billinghurst et al., 2015).



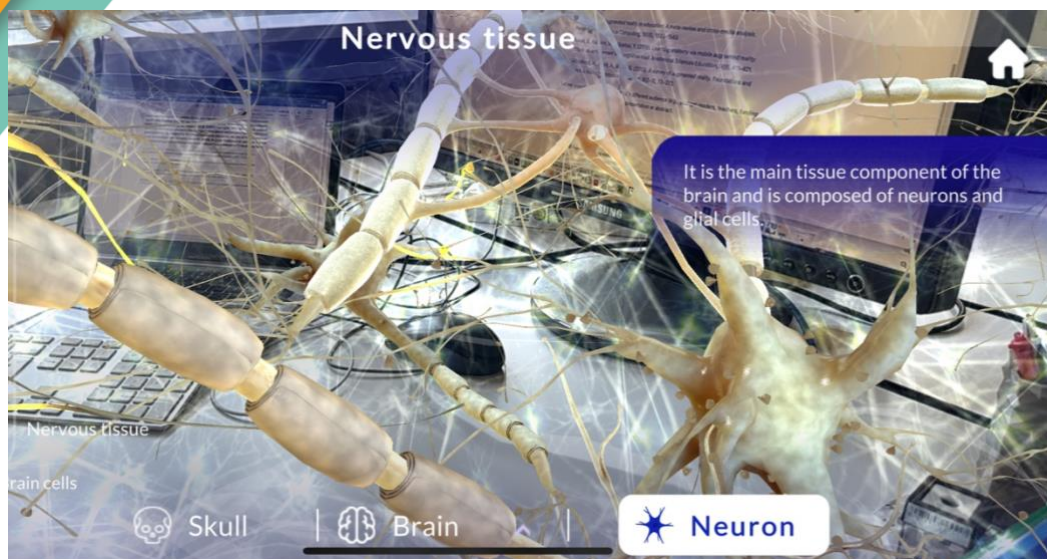
Diese Szene lässt die Schüler in eine mikroskopische Ansicht von Nervengewebe eintauchen und veranschaulicht Neuronen und Gliazellen in einer dynamischen 3D-Umgebung. Durch das virtuelle Betreten der zellulären Landschaft des Gehirns lernen die Lernenden die Komplexität der neuronalen Kommunikation und Gewebeorganisation schätzen, eine Erfahrung, die mit Lehrbüchern allein nur schwer nachzubilden ist (Radu, 2014).

Die Brainapse-App bietet eine einzigartige Möglichkeit, die Lernziele dieser Trainingseinheit „Licht und das Gehirn: Erforschung von Neuronen und Lichtempfindlichkeit“ zu unterstützen, indem sie die Schüler visuell durch die Struktur, Funktionen und neuronalen Komponenten des Gehirns führt. Obwohl die App die Lichtempfindlichkeit nicht direkt simuliert, bietet sie eine klare und interaktive Visualisierung wichtiger Hirnareale, die an der sensorischen Verarbeitung beteiligt sind, wie z. B. der Okzipitallappen (zuständig für die visuelle Wahrnehmung) und neuronale Netzwerke (zuständig für die Übertragung von Signalen, einschließlich solcher, die mit Lichtreizen zusammenhängen).

Durch die Erkundung dieser Bereiche in 3D können Schüler besser verstehen, wie Neuronen sensorische Informationen kommunizieren, wie Lichtreize verarbeitet werden und wie verschiedene Hirnregionen als Reaktion darauf aktiviert werden. Dieses räumliche und immersive Lernen steht im Einklang mit Erkenntnissen, die darauf hindeuten, dass AR das konzeptionelle Verständnis und das Gedächtnis verbessert (Bacca et al., 2014; Radu, 2014). Darüber hinaus fördert die detaillierte Betrachtung von Neuronen und Nervengewebe ein tieferes Verständnis



dafür, wie das Gehirn externe Reize wie Licht wahrnimmt, verarbeitet und darauf reagiert, was sowohl die Entwicklung wissenschaftlicher Kenntnisse als auch die Neugier fördert.



Phase	Beschreibung
Erkunden	Untersuchen Sie, wie Licht das Gehirn beeinflusst, einschließlich visueller/nicht-visueller Bahnen, zirkadianer Rhythmen und Stressreaktionen.
	- Inhaltsentwicklung: Entwickeln Sie Lernmaterialien, die Neurowissenschaften, Kognitionswissenschaften und lichtbasierte Technologien integrieren.
	- Bedarfsanalyse: Bewerten Sie die Vorkenntnisse der Lernenden in Biologie, Licht und Gehirnfunktion, um den Unterricht individuell anzupassen.
Durchführung	- Umsetzung des Lehrplans: Halten Sie Sitzungen zu den Themen Neuronen-Licht-Interaktion, Lichttherapie und EEG-Gehirnwellen-Beziehungen unter Verwendung von AR-Tools ab.
	- Interaktive Übungen: Nutzung von AR-Anwendungen (z. B. Brainapse, Merge Cube) zur Erforschung neuronaler Bahnen, zirkadianer Zyklen und lichtbezogener kognitiver Funktionen.
	- Feedback-Erfassung: Sammeln Sie Reflexionen, Leistungsdaten und Ergebnisse von Gruppendiskussionen über die Auswirkungen von Licht auf die Gehirnfunktion und Emotionen.
Verbessern	- AR-Integration: Verwenden Sie AR-Simulationen, um Neuronen, lichtempfindliche Hirnregionen und Veränderungen der EEG-Wellen unter verschiedenen Lichtverhältnissen zu visualisieren.
	- Interaktives Lernen: Ermöglichen Sie den Schülern, die Lichtintensität anzupassen und die Auswirkungen auf Gehirnmodelle zu beobachten (z. B. Pupillenreflex, zirkadianer Rhythmus).





Gamifizierte Inhalte:

- **Punkte und Abzeichen:** Belohnen Sie die korrekte Identifizierung von Gehirnstrukturen oder Simulationsergebnissen.
- **Ranglisten:** Bewerten Sie die Schüler anhand der Genauigkeit, mit der sie Reaktionsszenarien von Lichtneuronen absolvieren.
- **Quests und Levels:** Schalten Sie im Laufe des Lernfortschritts fortgeschrittene Themen wie Optogenetik und Lichttherapie frei.
- **Belohnungen für Erkundungen:** Integrieren Sie Bonus-AR-Inhalte (z. B. versteckte Fakten oder EEG-Visualisierungen).
- **Kollaborative gamifizierte Aufgaben:** Gruppen analysieren Stressdaten oder die circadiane Ausrichtung unter virtuellen Beleuchtungsszenarien.

AR-basierte Bewertungen:

- Die Schüler demonstrieren ihr Verständnis, indem sie mit virtuellen Gehirnsimulationen interagieren und die Auswirkungen von Licht auf die Nervenfunktion analysieren.

Quellen:

Abdalhadi A, Koundal N, Yusoff MZ, et al. Untersuchung der akuten Auswirkungen von Stress auf die Entscheidungsfindung unter Verwendung von Elektroenzephalographie und funktioneller Nahinfrarotspektroskopie: eine systematische Übersicht. IEEE Zugriff 2024; 12: 53454–53474.

Al Horr, Y., Arif, M., Kaushik, A., Mazroei, A., Katafygiotou, M., & Elsarrag, E. (2016). Produktivität der Nutzer und Qualität des Raumklimas in Büros: Eine Literaturübersicht. Building and Environment, 105, 369–389. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.001>

Aliero. M. S, Asif. M, Ghani. I, Pasha. M. F, Jeong. S. R, Systematische Überblicksanalyse zu intelligenten Gebäuden: Herausforderungen und Chancen, Sustain. (2022), <https://doi.org/10.3390/su14053009>.

Altindag O. Zusammenhang zwischen Stressbewältigung und Arbeitsleistung in Organisationen. International Journal of Research in Business and Social Science 2020; 9: 43–49.

Awada M, Becerik-Gerber B, Liu R, et al. Zehn Fragen zu den Auswirkungen von Umweltstress auf Büroangestellte. Building and Environment 2023; 229: 109964.

Askaripoor T, Motamedzadeh M, Golmohammadi R, et al. Nicht bildgebende Auswirkungen von Licht auf Gehirnströme, autonome Nervenaktivität, Müdigkeit und Leistungsfähigkeit. Journal of Circadian Rhythms 2018; 16: 9.

Askaripoor.T, Motamedzade.M, Golmohammadi.R, Farhadian.M, Babamiri.M, Samavati.M, 2019, Auswirkungen von Lichtinterventionen auf die Wachsamkeit und geistige Leistungsfähigkeit





während des Nachmittags-Durchhängers: eine Multi-Measure-Studie, *Industrial Health*, 57, 511–524.

Ardabili. G. N, Digert. N, Urich.S, Wang.J, 2025, Charakterisierung der Leistung von Architekturglas für circadianes Licht, *Energy & Buildings* 328, 115144.

Bacca, J., Baldiris, S., Fabregat, R., Graf, S., & Kinshuk. (2014). Augmented-Reality-Trends in der Bildung: Eine systematische Übersicht über Forschung und Anwendungen. *Educational Technology & Society*, 17(4), 133–149.

Bakharia.A , Bruza.P, Watters. J, Narayan.B und Sitbon. L. 2016. Interaktive Themenmodellierung zur Unterstützung der qualitativen Inhaltsanalyse (CHIIR'16). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 213–222. <https://doi.org/10.1145/2854946.2854960>

Bekaroo. G, Sungkur. R, Ramsamy. P, Okolo. A, Moedeen. W, Sensibilisierung für den umweltbewussten Konsum von elektronischen Geräten: Die Anwendung von Augmented Reality, *Sustain. Energy Technol. Assessments*. (2018), <https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.10.016>.

Bedrosian, T.A., Fonken, L.K., Walton, J.C., Haim, A. und Nelson, R.J. (2011). Schwaches Licht in der Nacht provoziert depressionsähnliche Verhaltensweisen und reduziert die CA1-Dendriten-Dichte bei weiblichen Hamstern. *Psychoneuroendokrinologie* 36, 1062–1069.

Berger C, Dück A, Gest S, Jonas L, Kölch M, Martin F, Reis O, Schroth J, Legenbauer T und Holtmann M (2022) Mögliche Auswirkungen der Lichttherapie auf das Elektroenzephalogramm-Wachsamkeit bei der Behandlung von Depressionen bei Jugendlichen: Eine Pilotstudie. *Front. Psychiatrie* 13:820090. Doi: 10.3389/fpsyt.2022.820090

Billinghurst, M., Clark, A. und Lee, G. (2015). Eine Untersuchung zu Augmented Reality. *Grundlagen und Trends in der Mensch-Computer-Interaktion*, 8(2–3), 73–272.

Chen.B, Cui.M, Wang.Y, Shi.P, Wang.H, Wang., 2022, Jüngste Fortschritte in der zellulären Optogenetik für die Photomedizin, PMID: 35843507, DOI: 10.1016/j.addr.2022.114457

Choi Y, Kim M, Chun C. Messung des Stresses von Bewohnern anhand von Elektroenzephalogrammen (EEG) in zwölf kombinierten Umgebungen. *Gebäude und Umwelt* 2015; 88: 65–72.

Chang, A.-M., Santhi, N., St Hilaire, M., Gronfier, C., Bradstreet, D. S., Duffy, J. F. und Czeisler, C. A. (2012). Reaktionen des Menschen auf helles Licht unterschiedlicher Dauer. *Journal of Physiology*, 590(13), 3103–3112.

De Rosa. M, Bianco. V, Scarpa. F, Tagliafico. L. A, Bewertung des Energiebedarfs von Gebäuden für Heizung und Kühlung; Ein vereinfachtes Modell und ein modifizierter Gradtagansatz, *Appl. Energy*. (2014), <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.067>.





Di'az M. H, Cid FM, Ota'rola J, Rojas R, Alarco'n O, Can'tete L. EEG-Beta-Band-Frequenzbereichsbewertung zur Beurteilung von Stress und Angst in Ruhe, mit geschlossenen Augen, unter basalen Bedingungen. *Procedia Computer Science* 2019; 162: 974–981.

Dübel.S, Röhlig.M , Schumann.H und Trapp.M. 2014. 2D- und 3D-Darstellung räumlicher Daten: Eine systematische Übersicht. *IEEE VIS International Workshop on 3DVis*. <https://doi.org/10.13140/2.1.1281.7602>

Erkan.I, Simsek.S, Avci.AB, Akyol.G, 2025, Auswirkungen der Beleuchtung auf die Arbeitsleistung, den Stress und das Wärmeempfinden in Arbeitsumgebungen

Frontczak, M., & Wargocki, P. (2011). Literaturübersicht darüber, wie verschiedene Faktoren den menschlichen Komfort in Innenräumen beeinflussen. *Building and Environment*, 46(4), 922–937. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.10.021>

Geng.Y, Li.Z, Du.C., Yuan.F, Cai.X, Alleyer.A, Yang.J, Cong.Z und Ma.C, 2023, *Fortschritte bei optogenetischen Anwendungen für Verletzungen des Zentralnervensystems*, *Journal of Neurotrauma* 40:1297–1316, Mary Ann Liebert, Inc, DOI: 10.1089/neu.2022.0290

Huang.X, Tao.Q und Ren.C, 2024, Ein umfassender Überblick über die neuronalen Mechanismen der Lichttherapie, *Neurosci. Bull.* März 2024, 40(3):350–362, <https://doi.org/10.1007/s12264-023-01089-8>

Kaklauskas A, Zavadskas EK, Seniut M, et al. Webbasiertes biometrisches Maus-Beratungssystem zur Analyse der Emotionen und Arbeitsproduktivität eines Benutzers. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 2011; 24: 928–945.

Konstantzos I, Sadeghi SA, Kim M, et al. Der Einfluss der Beleuchtungsumgebung auf die Arbeitsleistung in Gebäuden: eine Übersicht. *Energie und Gebäude* 2020; 226: 110394.

Kucuk, S., Kapakin, S., & Goktas, Y. (2016). Anatomie lernen mit mobiler Augmented Reality: Auswirkungen auf Leistung und kognitive Belastung. *Anatomical Sciences Education*, 9(5), 411–421.

Lamb S, Kwok KCS. Eine Längsschnittuntersuchung zu Stressfaktoren am Arbeitsplatz und deren Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit und das Wohlbefinden von Büroangestellten. *Angewandte Ergonomie* 2016; 52: 104–111.

LeGates, T.A., Altimus, C.M., Wang, H., Lee, H.-K., Yang, S., Zhao, H., Kirkwood, A., Weber, E.T. und Hattar, S. (2012). Aberrant light directly impairs mood and learning through melanopsin-expressing neurons. *Nature* 491, 594–598.





LeGates TA, Fernandez DC, Hattar S. Licht als zentraler Modulator von zirkadianen Rhythmen, Schlaf und Affekt. *Nat Rev Neurosci* 2014, 15: 443–454.

Liu C, Sun L, Jing X, et al. Wie sich die korrelierte Farbtemperatur (CCT) auf Studenten auswirkt: eine psychologische und physiologische Bewertung. *Journal of Building Engineering* 2022; 45: 103573.

Li S, Zhang X, Li Y, et al. Eine umfassende Übersicht über die Bewertung der Auswirkungen der thermischen Umgebung in Innenräumen auf die Arbeits- und kognitive Leistungsfähigkeit – kombinierte physiologische Messungen und maschinelles Lernen. *Journal of Building Engineering* 2023; 71: 106417.

Mathôt, S. (2018). Pupillometrie: Psychologie, Physiologie und Funktion. *Journal of Cognition*, 1(1). <https://doi.org/10.5334/joc.18>

Mendell, M. J. und Heath, G. A. (2005). Beeinflusst das Raumklima in Schulen die Leistung der Schüler? Eine Literaturübersicht. *Indoor Air*, 15(1), 27–52. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00320.x>

Mirzaei. N, Kamelnia. H, Islami. S.G, Kamyabi.S ,Assadi.S .N, Der Einfluss der Innenraumluftqualität von grünen Gebäuden auf die Gesundheit und Zufriedenheit der Bewohner: eine systematische Übersicht, *J. Community Heal. Res.* (2020), <https://doi.org/10.18502/jchr.v9i1.2574>.

Prent N, Smit DJA. Die Dynamik der Alpha-Oszillationen im Ruhezustand sagt individuelle Unterschiede in der Kreativität voraus. *Neuropsychologia* 2020; 142: 107456.

Radu, I. (2014). Augmented Reality in der Bildung: Eine Meta-Review und medienübergreifende Analyse. *Personal and Ubiquitous Computing*, 18(6), 1533–1543.

Roh, S.-C., Park, E.-J., Shim, M. und Lee, S.-H. (2016). EEG-Beta- und niedrige Gamma-Leistung korrelieren mit Unaufmerksamkeit bei Patienten mit schwerer depressiver Störung. *J. Affect. Disord.* 204, 124–130.

Scheer FA, Buijs RM. Licht beeinflusst den morgendlichen Speichelcortisolspiegel beim Menschen. *J Clin Endocrinol Metab.* September 1999; 84(9):3395-8. doi: 10.1210/jcem.84.9.6102. PMID: 10487717.

Selye H. *Der Stress des Lebens*. New York, NY: McGraw-Hill Book Company, 1956.





Soto Muñoz J, Trebilcock Kelly M, Flores-Ale's V, et al. Erkennen der Auswirkungen der thermischen Umgebung auf die selbst wahrgenommene Produktivität in Büros: eine Perspektive der Strukturgleichungsmodellierung. *Building and Environment* 2022; 210: 108696.

Šujanov'a. P, Rycht'arikov'a. M, Mayor. T.S, Hyder. A, Ein gesundes, energieeffizientes und komfortables Raumklima, eine Übersicht, *Energies* (2019), <https://doi.org/10.3390/en12081414>.

Sun. X, Wu. H, Wu. Y, Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Temperatur, Beleuchtungsstärke und Schallpegel, typischen physiologischen Parametern und menschlichen Wahrnehmungen, *Build. Environ.* (2020), <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107193>.

Si. W.X, Liao.X .Y, Qian. Y. L, Sun. H.T, Chen. X. D, Wang. Q, Heng. A. A. (2019). Bewertung der Leistung von Augmented-Reality-basiertem neurochirurgischem Training, *Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art*, <https://doi.org/10.1186/s42492-019-0015-8>

Teplan M. Grundlagen der EEG-Messung. *Measurement Science Review* 2002; 2: 1–11.

Thach T-Q, Mahirah D, Sauter C, et al. Zusammenhänge zwischen der wahrgenommenen Qualität des Raumklimas und Stress am Arbeitsplatz. *Indoor Air* 2020; 30: 1166–1177.

Vandewalle, G., Schwartz, S., Grandjean, D., Vuillaume, C., Balteau, E., Degueldre, C., Schabus, M., Phillips, C., Luxen, A., Dijk, D.J. und Maquet, P. (2010). Die spektrale Qualität des Lichts moduliert die emotionalen Reaktionen des menschlichen Gehirns. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 107, 19549–19554.

Viczko J, Tarrant J und Jackson R (2021) Auswirkungen auf die Stimmung und EEG-Zustände nach Meditation in Augmented Reality mit und ohne zusätzliches Neurofeedback. *Front. Virtual Real.* 2:618381. doi: 10.3389/frvir.2021.618381

Witterseh T, Wyon DP, Clausen G. Die Auswirkungen von mäßiger Hitzebelastung und Ablenkung durch Lärm in Großraumbüros auf SBS-Symptome und die Leistungsfähigkeit bei Büroarbeit. *Indoor Air* 2004; 14: 30–40.

Yang B, Duan K, Fan C, et al. Automatische Entfernung von Augenartefakten im EEG mittels Deep Learning. *Biomedizinische Signalverarbeitung und -steuerung* 2018; 43: 148–158.

Yeganeh AJ, Reichard G, McCoy AP, et al. Zusammenhang zwischen Umgebungstemperatur und kognitiver Leistungsfähigkeit: eine systematische Überprüfung und Metaanalyse. *Gebäude und Umwelt* 2018; 143:701–716.

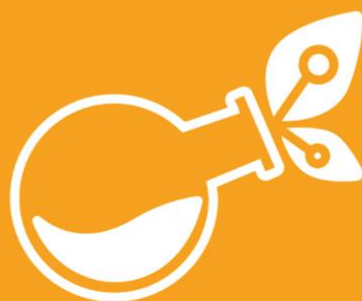
https://med.stanford.edu/news/all-news/2019/09/teens-sleep-43-more-minutes-per-night-after-combo-of-two-treatme.html?utm_source=chatgpt.com







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.