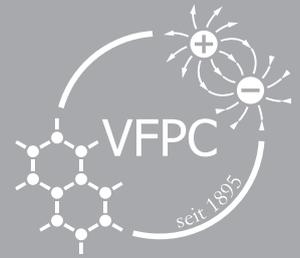


# plusLucis



Verein zur Förderung des physikalischen und chemischen Unterrichts



## Biophysik

## Impressum

PLUS LUCIS, Mitteilungsblatt des Vereins zur Förderung des physikalischen und chemischen Unterrichts und des Fachausschusses Physik & Schule der Österreichischen Physikalischen Gesellschaft (VZR: 668472729) Erscheint vierteljährlich

### Medieninhaber:

Verein zur Förderung des physikalischen und chemischen Unterrichts  
 Adr.: AECC Physik Universität Wien, Porzellangasse 4, Stiege 2, 1090 Wien  
 Web: <https://www.pluslucis.org>  
 Mail: [schriftenleitung@pluslucis.org](mailto:schriftenleitung@pluslucis.org)

### Redaktion:

Mag. Dr. Thomas Plotz (Leitung)  
 Mag. Brigitte Knaus  
 Mag. Sarah Zioklikovits

### Verantwortlicher Herausgeber

#### dieser Ausgabe:

HS-Prof. i. R. Mag. Dr. Erich Reichel  
 Pädagogische Hochschule Steiermark,  
 Zentrum für fachdidaktische Forschung in  
 der naturwissenschaftlich-technischen Bildung  
 (NATech), E-Mail: [erich.reichel@phst.at](mailto:erich.reichel@phst.at)

HS-Prof. Mag. Dr. Ingrid Krumphals  
 Pädagogische Hochschule Steiermark,  
 Zentrum für fachdidaktische Forschung in  
 der naturwissenschaftlich-technischen Bildung  
 (NATech), E-Mail: [ingrid.krumphals@phst.at](mailto:ingrid.krumphals@phst.at)

#### HerausgeberInnenteam:

Univ.-Prof. Dr. Claudia Haagen-Schützenhöfer  
 Universität Graz, Physikdidaktik  
 E-Mail: [claudia.haagen@uni-graz.at](mailto:claudia.haagen@uni-graz.at)

Univ.-Prof. Dr. Martin Hopf  
 Universität Wien, Physikdidaktik  
 E-Mail: [martin.hopf@univie.ac.at](mailto:martin.hopf@univie.ac.at)

Univ.-Prof. Dr. Anja Lembens  
 Universität Wien, Chemiedidaktik  
 E-Mail: [anja.lembens@univie.ac.at](mailto:anja.lembens@univie.ac.at)

Univ.-Prof. Dr. Thomas Wilhelm  
 Universität Frankfurt, Physikdidaktik  
 E-Mail: [wilhelm@physik.uni-frankfurt.de](mailto:wilhelm@physik.uni-frankfurt.de)

#### Bezugshinweise:

Das Abonnement der Zeitschrift ist für Vereinsmitglieder im Mitgliedsbeitrag inkludiert.

Ein institutionelles Abonnement (z. B. für Bibliotheken) ist zum Bezugspreis von 40 Euro im Jahr möglich.

Offenlegung nach § 25 des Mediengesetzes Grundlegende Richtung: Fortbildung und fachliche Information für Physik- und ChemielehrerInnen, organisatorische Mitteilungen, Vereinsinterna.

Für die Inhalte der Artikel sind ausschließlich die namentlich genannten AutorInnen verantwortlich.

#### Titelbild (Umschlag):

Mufid Majnun via Pixabay

## Inhalt

Nuklearmedizin.....	4
<i>Stefan Kerschbaumer und Christian Gstettner</i>	
Nuklearmedizin live erfahren – Ein Unterrichtspaket für den außerschulischen Lernort.....	10
<i>Natasha Gstettner und Fabian Seedoeh</i>	
Die Nutzung von Technetium in der nuklearmedizinischen Diagnostik als Anlass für inner- und überfachliches Bewerten im Physikunterricht.....	12
<i>Markus S. Feser und Johanna Dejanovikj</i>	
Das Hagen-Poiseuille-Gesetz und der menschliche Blutkreislauf.....	17
<i>Marianne Korner, Florian Kleiss und Dominik Kögel</i>	
Sprechen und Hören.....	22
<i>Leopold Mathelitsch</i>	
Wie hören wir?.....	28
<i>Michael Schwarzer, Peter Schleich und Aniketa Seelos-Prock</i>	
Glückwünsche zum Ruhestand.....	31
Reelles und virtuelles Bild: gegensätzliche Begriffe – gleiche Wahrnehmung.....	32
<i>Andreas Gumbsch und Ingrid Krumphals</i>	
Erratum zu Artikel Das Mirascope.....	39
<i>Ingrid Krumphals</i>	

# Editorial

Liebe Lehrende der naturwissenschaftlichen Fächer und an dem Thema Interessierte!

Wie soll man das Fachgebiet Biophysik umschreiben? Einfach gesagt: Biophysik ist die Anwendung physikalischer Prinzipien und Methoden auf biologische Fragestellungen. In Wirklichkeit wird diese Definition dem Gebiet der Biophysik nicht gerecht. Dieses Wissenschaftsgebiet erstreckt sich von der Biomechanik bis hin zur Mikrobiologie. Sogar eine Definition von Leben ist physikalisch realisierbar. Auch einer nicht mehr zeitgemäßen Definition der Physik – Physik ist die Lehre von der unbelebten Natur – muss im Rahmen der Biophysik widersprochen werden. Denn Leben in der Biosphäre kann nur durch die geniale Kopplung naturwissenschaftlicher Erkenntnisse beschrieben werden. Viele physikalisch erklärte Phänomene zeigen auch Anwendung in der Physiologie, in der medizinischen Physik in der Diagnose und Therapie, sowie in der biomedizinischen Technik.

Aber vielmehr liegt die Bedeutung biophysikalischer Fragestellungen im wichtigen Bestandteil eines attraktiven Physik- und Chemieunterrichts. Auf der einen Seite zeigen die Fragestellungen der Biophysik die Notwendigkeit der Verbindung aller Naturwissenschaften und darüber hinaus, im Sinne des MINT-Gedankens. Eine Auflösung der Grenzen zwischen den einzelnen naturwissenschaftlichen Disziplinen ist somit sinnvoll und zur Lösung biophysikalischer Probleme unabdingbar. Wobei auf den Aufbau einer Basis physikalischen Wissens und Methodik auf keinen Fall verzichtet werden darf. Auf der anderen Seite wurde auch schon vor Jahren durch die ROSE-Studie bestätigt, dass Themen aus der belebten Natur besonders gerne von den Lernenden bearbeitet werden und sehr hohes Interesse hervorrufen.

Auch die Lehrpläne fordern in zunehmendem Maße biophysikalische und damit auch verbundene medizinische Themen für den Unterricht ein und greifen somit die Ergebnisse der ROSE-Studie erfreulicherweise auf. Außerdem eignen sich biophysikalische Fragestellungen besonders für kontextbezogene, kompetenzorientierte Aufgabenstellungen aus dem MINT-Bereich.

Einen vollständigen Überblick über biophysikalische Themen zu geben ist schwer möglich, wenn man die Vielfalt der möglichen Bereiche überdenkt. Wir haben daher für dieses Heft eine Auswahl unterrichtsrelevanter Themen getroffen, die weite biophysikalische Bereiche überstreichen – von makroskopischen Anwendungen bis hin zur Mikrobiologie.



Erich Reichel



Ingrid Krumphals

Als „mikroskopischen“ Beitrag bietet das Heft gleich zu Beginn das Thema Nuklearmedizin, dessen Verständnis ohne physikalisches und chemisches Wissen nicht möglich wäre. Mit der Nuklearmedizin stellt sich eine medizinische Disziplin vor, die mit modernsten Verfahren und dem Grundlagenwissen aus der Teilchenphysik und Strahlungsphysik revolutionäre Diagnose- und Therapieverfahren zur Verfügung hat. Da es in Österreich in jedem Bundesland ein nuklearmedizinisches Zentrum gibt, besteht auch die Möglichkeit, ein solches zu besuchen. Da nuklearmedizinische Kliniken nicht einfach besucht werden können, gibt es einen dritten Beitrag zu diesem Themenkomplex, in dem aufgezeigt wird, wie man einen Besuch einer nuklearmedizinischen Einrichtung grundlegend und lernwirksam in den Unterricht integrieren kann. Neben der grundlegenden Beschreibung nuklearmedizinischer Verfahren in diesem Heft, wird in einem weiteren Beitrag auch die Möglichkeit aufgezeigt, wie man dazu kompetenzorientierte Aufgaben, die sich auch kritisch mit der Anwendung der Radioaktivität auseinandersetzen, gestalten kann.

In den „makroskopischen“ Teil steigen wir mit einem Unterrichtsbeispiel zur Bearbeitung der Blutströmung im menschlichen Körper ein. Weiter geht es mit den Themen „Sehen“ und „Hören“, welche im neuen Unterstufenlehrplan, der 2023 eingeführt wird, bereits in der zweiten Klasse behandelt werden. Damit werden die beiden Sinne angesprochen, denen wir zum Großteil unsere Kommunikationsmöglichkeiten verdanken. Wir widmen uns in diesem Heft dem Schall und der Sprachentstehung, gefolgt von einem Beispiel wie das Thema Hören im Unterricht umgesetzt werden kann. Dem Sehen widmet sich ein Beitrag, der sich mit der Wahrnehmung reeller und virtueller Bilder beschäftigt.

Wir hoffen, dass wir mit der von uns getroffenen Auswahl, Ihre Neugier zum Bereich der Biophysik wecken und Ihr Interesse vertiefen. Wir wünschen Ihnen viel Freude beim Lesen und der Generierung von weiteren Ideen, sowie der Umsetzung mit Ihren Schüler\*innen im Unterricht.

Erich Reichel und Ingrid Krumphals

# Nuklearmedizin

Stefan Kerschbaumer und Christian Gstettner

## 1. Messung der bio-kinetischen Verteilung radioaktiver Tracer

Die Nuklearmedizin ist ein klinisches Sonderfach, in dem offene radioaktive Stoffe für die nuklearmedizinische Diagnostik und Therapie eingesetzt werden.

Die Anwendungen beruhen auf dem Tracer-Prinzip und der biochemischen Verteilung dieses radioaktiven Tracers. Diese zeigt pathologische Vorgänge im Körper durch höhere oder geringere Anreicherungen an der betroffenen Lokalisation. Zum einen können damit Funktion von Organen dargestellt, sowie qualitativ und quantitativ bewertet werden. Zum anderen können zusätzlich durch geeignete Nuklide entsprechende nuklearmedizinische Therapien (MRT - molecular radionuclide therapy) durchgeführt werden.

Im Gegensatz zu anderen Verfahren mit Röntgenstrahlung, Ultraschall oder Magnetresonanz werden in der Nuklearmedizin Körperfunktionen gemessen und dargestellt (quantitative Funktionsdiagnostik). Es werden vergleichsweise keine physikalischen Eigenschaften wie die Massendichte (Röntgen, Computertomografie), Schalldichte (Ultraschall) oder Wasserkonzentration (Kernspintomografie) dargestellt, sondern die bio-kinetische Verteilung des radioaktiven Tracers (siehe Abbildung 1).



## 2. Motivation

Die im Alltag beobachtbare Physik ist vorwiegend durch die elektromagnetische Wechselwirkung bestimmt, welche verantwortlich für den Aufbau der Atomhülle ist. Dadurch wechselwirken Atome miteinander und bilden so Moleküle und Stoffe in unterschiedlichen Aggregatzuständen der unbelebten und belebten Materie.

Dahingehend dachte man im 19. Jahrhundert, dass die Physik mit ihrer Mechanik, Elektrodynamik und Thermodynamik abgeschlossen und somit die Natur vollständig entschlüsselt und erklärbar wären. Allerdings mehrten sich die Effekte, welche mit Hilfe dieser Theorien nicht mehr beschreibbar oder erklärbar waren. Darunter auch die von Henri Becquerel im Jahr 1896 entdeckten hochenergetischen Strahlenarten.

Mit Hilfe von  $\alpha$ -Strahlung konnte Ernest Rutherford, Hans Geiger und Ernest Marsden 1911 im berühmten Streuungs-Experiment anhand einer Gold-Folie die Materie-Verteilung in einem Atom ermitteln, was schließlich zum Rutherford'schen Atommodell führte. Die Atome bestehen zu einem hohen Anteil aus Bindungsenergie und einem kleinen positiv geladenen Atomkern. Mit der tiefergehenden Erkenntnis im Aufbau der Materie entwickelte sich daraus die Quantenmechanik und daraus das Standardmodell der Teilchenphysik.

Es liegt in der Natur des Menschen, solche Entdeckungen wie jene der radioaktiven Strahlung für unterschiedliche Zwecke zu



**Abbildung 1:** Bild (li) zeigt die bio-kinetische Verteilung von Tc-99m-markierten Leukozyten an einer verschraubten Hüftgelenks-Prothese zur Darstellung von Entzündungsprozessen. Es zeigt sich eine signifikante Deposition der Leukozyten entlang der Platte sowie der Cerclagedrähte (Fixierungs-Drähte um den Knochen). Bild (re) zeigt im Vergleich das unauffällige Röntgenbild.

verwenden. Leider steht die medizinische Nutzung der Radio-Isotopen im Schatten der Schlagzeilen von z. B. dem Reaktor-unfall von Tschernobyl und Fukushima oder der globalen Bedrohung durch Atombomben. Dieser Artikel soll dazu beitragen, die Grundlagen zur friedlichen Nutzung radioaktiver Strahlung in der Nuklearmedizin zum Wohle der Gesellschaft unseren Schüler\*innen und Studierenden zu zeigen.

### 3. Radioaktive Isotope und deren unterschiedliche Strahlenarten

In der Nuklearmedizin werden radioaktive Isotope zur Diagnostik und Therapie eingesetzt. Es geht also um den Einsatz „Technisch hergestellter radioaktive Isotope für den menschlichen Körper“. Hier wollen wir zeigen, warum die Nuklearmedizin eines der leistungsfähigsten Fachgebiete der modernen Medizin ist.

Wie angeführt bestehen Atome aus der Atomhülle und dem Atomkern. Die chemischen Elemente, wie sie im Periodensystem systematisiert sind, sind durch die Ladung ihrer Atomkerne, also durch die Anzahl der Protonen im Atomkern bestimmt. Der Atomkern ist aus Protonen und Neutronen aufgebaut, welche auch die Masse der Atome ausmachen. Durch die Messung der Atommassen (wie beispielsweise in einem empfindlichen Massenspektrometer) lässt sich feststellen, dass es bei jedem Element unterschiedlich schwere Kerne gibt. Das bedeutet, dass die Anzahl der Neutronen eines Elements variieren kann. Ein Atom mit einer bestimmten Anzahl an Protonen und Neutronen wird als Isotop bezeichnet.

Es gibt stabile Isotope, wie sie vorwiegend in unserer Umwelt anzutreffen sind. Die einzelnen Nuklide sind in der Nuklidkarte (siehe Abbildung 2, stabile Isotope schwarz dargestellt). In der Nuklearmedizin verwenden wir instabile radioaktive Isotope. Das sind jene Isotope, deren Atomkerne instabil sind und die durch den Kernzerfall ionisierende Strahlung emittieren (blau und rot dargestellt). Die unterschiedlichen Strahlungsarten erklären sich aufgrund der unterschiedlichen Zerfallsarten der Atomkerne. Die Anzahl der zerfallenden Atomkerne pro Zeiteinheit wird als Aktivität bezeichnet. Die Zeit mit der die Hälfte einer Menge eines Isotops zerfällt, wird als Halbwertszeit bezeichnet.

Iod zum Beispiel hat im Periodensystem die Ordnungszahl 53 – das steht für 53 Protonen im Atomkern. In der Nuklearmedizin

werden nun die entsprechende Isotope I-123, I-124, I-125 sowie I-131 verwendet. Die Zahl beim Element beziffert die Massezahl des Isotops und entspricht der Summe aus Protonen und Neutronen. Alle diese Isotope reagieren chemisch identisch – wie das einzige stabile Jod Isotop: I-127. Die emittierten Strahlungsarten der verschiedenen Jod Isotope und somit die Anwendungsbereiche sind jedoch völlig unterschiedlich (siehe Tabelle 1). Letztlich werden abhängig von der medizinischen Fragestellung ganz unterschiedliche Isotope verwendet wie beispielsweise C-11, N-13, F-18, Y-90, Tc-99m, Xe-133, Lu-177, Tl-201, Ra-223, Ac-225 um nur einige zu nennen.

**Tabelle 1: Jod-Isotope und ihre Anwendung in der Nuklearmedizin**

Nuklid	Verwendete Strahlungsart	Halbwertszeit	Anwendung
I-123	Gammastrahlung 159keV	13.2 Stunden	Gammakamera / SPECT/CT
I-124	(Positronenstrahlung 2.14MeV) Annihilationsstrahlung 511keV	4.17 Tage	PET/CT
I-125	Röntgenstrahlung 27keV	59.5 Tage	Gammacounter (Laboranwendungen)
I-131	Betastrahlung 190keV Gammastrahlung 360keV	8.03 Tage	Dosimetrie und Therapie

In der nuklearmedizinischen Diagnostik werden physiologische Vorgänge mit nuklearmedizinischen Kameras (SPECT/CT-, PET/CT- und PET/MR-Kameras) sichtbar und messbar gemacht. Dabei werden geeignete radioaktive Isotope mit durchdringender Strahlung und kürzerer Halbwertszeit eingesetzt.

### 4. Verfügbarkeit geeigneter radioaktiver Isotope

Radio-Isotope in der Nuklearmedizin müssen basierend auf ihren physikalischen Eigenschaften sorgfältig ausgewählt werden. Tabelle 2 zeigt die bevorzugten Eigenschaften der in der In-Vivo-Diagnostik eingesetzten radioaktiven Jod-Isotope. Für andere Einsatzgebiete wie beispielsweise für die Therapie oder die Labordiagnostik sind andere Eigenschaften erforderlich.

Natürlich vorkommende radioaktive Isotope wie Uran, Thorium, Wismut oder Blei sind in der Nuklearmedizin nicht anwendbar. Geeignete Radio-Isotope müssen daher technisch („künstlich“) hergestellt werden. Diese technische Herstellung

Xe-123	Xe-124	Xe-125	Xe-126	Xe-127	Xe-128	Xe-129	Xe-130	Xe-131	Xe-132	Xe-133	Xe-134	Xe-135	Xe-136
I-122	I-123	I-124	I-125	I-126	I-127	I-128	I-129	I-130	I-131	I-132	I-133	I-134	I-135
Te-121	Te-122	Te-123	Te-124	Te-125	Te-126	Te-127	Te-128	Te-129	Te-130	Te-131	Te-132	Te-133	Te-134

**Abbildung 2: Vereinfachter schematischer Ausschnitt aus der Nuklidkarte der Xenon-, Iod- und Tellur-Isotope – Farbcode: schwarz: stabile Isotope, orange: Positronen-Strahler oder Elektroneneinfang (Protonenüberschuss), blau: Beta-Strahler (Neutronenüberschuss).**

von Radio-Isotopen erfolgt sowohl in Kernreaktoren (z. B.: P-32, Y-90, I-131, Xe-133, Mo-99) als auch in Teilchenbeschleunigern (z. B.: C-11, N-13, O-15, F-18, I-123). In Kernreaktoren entstehen diese durch Neutronen-Aktivierung oder durch Kernspaltung; in Teilchenbeschleunigern durch den Beschuss mit Protonen.

**Tabelle 2: Notwendige Eigenschaften von radioaktiven Isotopen für die Diagnostik**

• Geeigneter Energiebereich der emittierten Strahlung – hohe Durchdringung des Körpers, gute Messbarkeit
• Keine zusätzliche Alpha- oder Beta-Emission
• Halbwertszeit ähnlich der zu beobachtenden physiologischen Vorgänge
• Geringe Verunreinigung mit stabilen Isotopen (carrier-free)
• Geringe Verunreinigung mit anderen radioaktiven Isotopen
• Gute Verfügbarkeit der Radio-Isotope
• Einfache chemische Herstellung von Radio-Tracern
• Rasche und repräsentative Darstellung des adressierten physiologischen Vorgangs

Nicht an jeder Klinik kann ein Zyklotron oder ein Reaktor betrieben werden. Daher ist der Einsatz von sogenannten Nuklid-Generatoren in der Nuklearmedizin weit verbreitet. Als Beispiel sei Mo-99 mit einer Halbwertszeit von 2.8 Tagen genannt und mit dem für die Nuklearmedizin sehr wichtigen Tochternuklid, nämlich dem Tc-99m. Es entspricht weitgehend jenen in Tabelle 2 gelisteten idealen Eigenschaften.

Dieses Tc-99m hat eine für die Detektion gut geeignete Gamma-Emission mit 140keV und lässt sich aus dem Generator mit Hilfe einer Salzlösung einfach gewinnen. Dieser Vorgang wird als „Eluieren“ bezeichnet und das Produkt ist

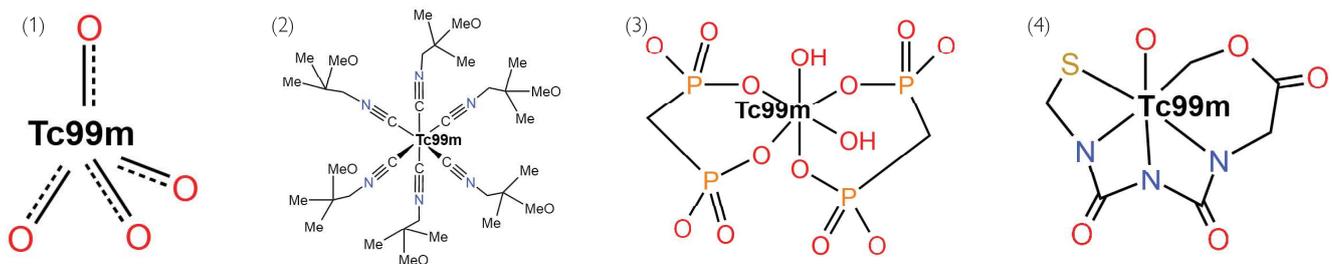
das „Eluat“. In diesem Fall wird aus dem Mo-99 Generator das Tc-99m als Pertechnetat gewonnen. Dieses Pertechnetat kann nun entweder direkt am Patienten zum Beispiel einer Schilddrüsenzintigraphie angewendet werden oder es wird mit Hilfe eines Herstellungs-Kit mit anderen Molekülen chemisch gebunden (siehe Abbildung 3), welche in unterschiedlichen Organen verstoffwechselt werden..

Nicht alle erforderlichen Isotope können mit Hilfe von Nuklid-Generatoren produziert werden. Standorte ohne Zyklotron müssen auch diese Isotope bei entsprechenden Herstellern bestellen und zuliefern lassen (sogenannte „speditierbare Nuklide“). Falls dies aufgrund der kurzen Halbwertszeit nicht möglich ist, können folglich Untersuchungen mit kurzlebigen Isotopen nicht angeboten werden.

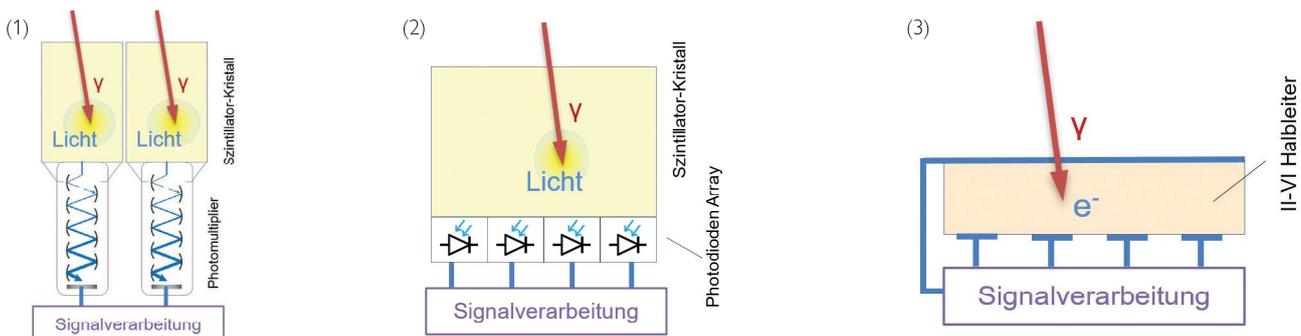
### 5 Tracer Prinzip

Während das Isotop und damit die emittierte Strahlung des Radio-Nuklides für die Messung an den nuklearmedizinischen Kameras verantwortlich ist, bestimmt die biochemische Eigenschaft des gebundenen Moleküls die Art und Geschwindigkeit der Verstoffwechslung im Ziel-Organ. Dabei kommt zum Beispiel bei der Knochenszintigraphie eine Phosphatverbindung (z. B. Tc-99m-Methyl-Diphosphonat) zum Einsatz, die in die Grundmatrix des Knochens eingebaut wird.

Die Beobachtbarkeit der kinetischen Verteilung des Moleküls im Körper aufgrund seiner biochemischen Eigenschaften gemeinsam mit der Messung und Darstellung durch das Radio-Nuklid wird als nuklearmedizinisches Tracer-Prinzip bezeichnet.



**Abbildung 3:** Beispiele einiger mit Tc99m hergestellter Radio-Tracer: (1) Schilddrüsen-Untersuchung: Tc99m-Pertechnetat (2) Herz-Untersuchung: Tc99m-Sestamibi (3) Knochen-Untersuchung: Tc-99m-Methyl-Diphosphonat (4) Nieren-Untersuchung: Tc99m-Mercapto-Acetyltriglycerin



**Abbildung 4:** Schematische Darstellung unterschiedlicher Kameradetektoren: Detektor (1) Szintillationsdetektor mit Photomultipliern, Detektor (2) Szintillationsdetektor mit Photodioden Array, Detektor (3) II-VI Halbleiterdetektor

Das Darstellen und Messen von geringen Stoffmengen funktioniert mit radioaktiv markierten Stoffen deshalb besonders gut, weil die emittierte Strahlung von kleinsten Mengen applizierter Isotope mit Hilfe nuklearmedizinischer Kameras sehr gut gemessen werden kann.

Dabei entwickelt sich die Technologie dieser Kameras ständig weiter. NaI(Tl)-Szintillations-Kristalle mit Photomultipliern (Photoelektronenvervielfacher) wurden 1944 im Zuge des Manhattan Projektes entwickelt und sind seither robuste und bewährte Detektor-Systeme für die Strahlenmessung und für Gammakameras (siehe Abbildung 4 (1)). Die Dotierung mit Thallium (Tl) dient zur Erzeugung von Leuchtzentren. Diese Thallium Atome im NaI-Kristallgitter werden durch das eintreffende Gammaquant ionisiert und geben dann Photonen mit etwa 3eV ab. Dabei ist die Anzahl der Photonen proportional zur absorbierten Energie. Da es sich beim NaI(Tl)-Szintillations-Kristall um einen Einkristall handelt, gibt es keine Streuung an Korngrenzen im Kristall. Der Kristall ist für die Lichtquanten transparent. Somit kann die Lichtausbeute, welche proportional der Energie des eintreffenden Gammaquants ist, mit dem Photomultiplier für jedes einfallende Gammaquant gemessen werden.

Solche Szintillatoren sind Stoffe, welche beim Wechselwirken von Gammaquanten im Szintillator niederenergetische Lichtquanten erzeugen. Bei Gammakameras ist das beschriebene



**Abbildung 5:** Bilder nuklearmedizinischer Kameras: Bild (1): SPECT-CT Kamera Bild (2): PET/CT Kamera mit dem zugehörigen Patienten\*innen-Tisch im Vordergrund

Tl-dotierte NaI(Tl) und bei PET Kameras wurden Bismutgermanat („BGO“:  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ) und heute zumeist LuYO[SiO<sub>4</sub>] Lutetium-Yttriumoxyorthosilikat und Lutetium-Oxyorthosilikat, Lu<sub>2</sub>O[SiO<sub>4</sub>] verwendet.

Seit etwa 2011 sind erste SPECT Kameras mit II–VI Halbleiter-Detektoren aus CdZnTe (CZT: siehe Abbildung 4(3)) verfügbar; seit etwa 2021 kommen die ersten Computer-Tomografen (CT) mit CdTe Halbleiter-Detektoren auf den Markt (zuvor wurden auch hier Szintillations-Detektoren verwendet (siehe Abbildung 5)). Dieses Detektor-Material finden auch in vielen anderen Bereichen der Physik unterschiedliche Anwendungen.

Während in Halbleiterdetektoren in der Sperrschicht die Gammastrahlung durch Ionisation ein Messsignal erzeugt („solid-state-photomultiplier“ oder „silicon-photomultiplier“), werden beim Szintillationsdetektor durch das Gammaquant zuerst Photonen erzeugt und diese mit dem Photomultiplier oder einer Photodiode (siehe Abbildung 4 (2)) gemessen. Der große Vorteil der Photomultiplier ist vorrangig der hohe Verstärkungsfaktor von  $10^6$ , sowie die hohe Verarbeitungsgeschwindigkeit, Robustheit, Stabilität sowie deren lange Lebensdauer. Vielleicht werden die aktuell in der Nuklearmedizin verwendeten NaI(Tl)-Szintillations-Kristalle mit den Photomultipliern bald der Vergangenheit angehören – oder es gibt für sie eine Zukunft für bestimmte Untersuchungen oder Anwendungen.

## 6. Physiologische Vorgänge im Körper beobachten und messen

In den vorhergehenden Kapiteln haben wir die Voraussetzungen geschaffen, damit die Nuklearmedizin realisierbar ist. Die nuklearmedizinische Diagnostik ist eine Dienstleistung für entsprechende Zuweisung und klinische Fragestellungen. Um diese gewünschten Untersuchungen durchführen zu können muss der entsprechende Radio-Tracer verfügbar (angeliefert oder hergestellt) sein und das für die Patienten\*innen richtige Untersuchungsprotokoll im Vorfeld festgelegt werden.

### Ablauf einer Nuklearmedizinischen Untersuchung:

- Diagnostische Fragestellung für einen Patienten
- Anmeldung des Patienten – festlegen des Untersuchungstermins
- Auswahl des Tracers
- Herstellung oder Bestellung des Tracers
- Festlegen des Untersuchungsprotokolls
- Ggf. Vorbereitung des Patienten
- Durchführung der Therapie oder Diagnostik (an einer nuklearmedizinischen Kamera)
- Diagnostik: Visuelle Prüfung und quantitative Auswertung der Daten
- Befund erstellen
- Übersenden des Befundes an den zuweisenden Arzt
- Archivierung der Daten

Während wir bei Röntgenuntersuchungen, in der Computertomographie, der Kernspintomografie und im Ultraschall

die Strahlung von außen in den Körper einbringen, wird das „strahlende Isotop“ in den Körper gebracht. Der Tracer kann ganz unterschiedlich verabreicht werden. Das kann beispielsweise intravenös, subkutan, oral oder durch Inhalation etc. erfolgen. Wenn man zum Beispiel die Verteilung der Radioaktivität direkt nach Applikation verfolgen möchte wird dies dynamisch aufgezeichnet. Damit wird die Verstoffwechslung im Organ wie in einem Video aufgezeichnet und dargestellt.

### Beispiel einer Skelettszintigraphie:

Mit Hilfe von Tc-99m-markierten Phosphonaten kann man viele unterschiedliche Knochenerkrankungen diagnostizieren. Mit Hilfe dieses Tracers können aufbauende Knochenvorgänge (osteoblastische Veränderungen) dargestellt werden. Eine entsprechende pathophysiologische Diagnose ist in der Nuklearmedizin oft möglich noch bevor Änderungen der Knochenstruktur mit Hilfe von Röntgenstrahlung sichtbar wären.

Bei entsprechender Fragestellung wird ein drei-phasiges Untersuchungsprotokoll verwendet. Oft ist gerade bei akuten Erkrankungen die Durchblutung erhöht (Tracer wird intravenös appliziert), wodurch es zu einer frühzeitigen Anreicherung des Tracers in der betroffenen Region kommt. Unmittelbar nach der Applikation des Tracers wird daher die Verteilung an der Gammakamera aufgezeichnet (dynamische Phase). Diese Information einer vorzeitigen Anreicherung des Tracers kann ein wichtiges Kriterium für Differentialdiagnosen oder für die Entscheidung der optimalen Therapie sein.

Nach einer halben Stunde der Applikation wird eine weitere Messung durchgeführt. Dabei verschwindet der Tracer langsam aus dem Blutkreislauf und sammelt sich in der Zielregion an. Dies wird auch als Weichteil-Phase (oder Bloodpool-Phase) bezeichnet.

Nach etwa 4 Stunden ist der Tracer beinahe vollständig in den Knochen eingebaut (Knöcherne Phase) und der gesamte Skelettsystem kommt zur Darstellung. In allen diesen Messungen können jene von der Erkrankung beeinflussten Mehr- oder Minderspeicherungen nun visuell als auch quantitativ ausgewertet (Szintimetrie, siehe Abbildung 6) werden. Solche Ganzkörperuntersuchungen können im Vergleich zu anderen

medizinischen Aufnahmeverfahren in der Nuklearmedizin vergleichsweise einfach und rasch durchgeführt werden.

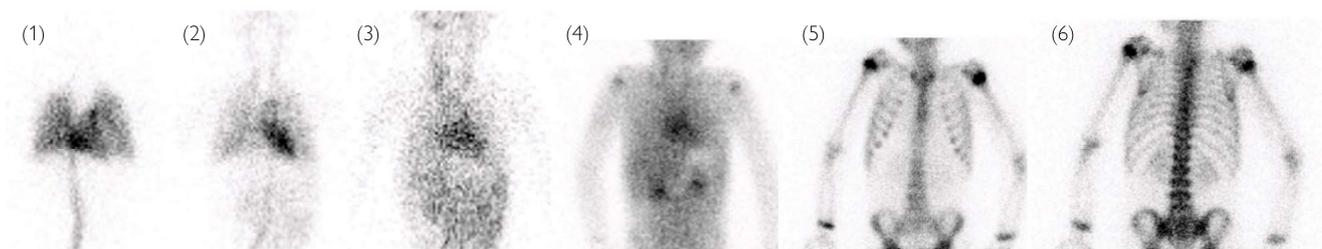
## 7. Umgang mit offenen radioaktiven Stoffen

Wir arbeiten in der Nuklearmedizin mit offenen radioaktiven Stoffen und den entsprechenden emittierten unterschiedlichen Strahlenarten. Die gesetzlichen Rahmenbedingungen für diese Tätigkeiten mit radioaktiven Tracern werden durch das Strahlenschutzgesetz (StSchG) und die Medizinische Strahlenschutzverordnung (MedStSchV) geregelt. Jeder Umgang mit radioaktiven Stoffen wird von der Strahlenschutzbehörde mit Argusaugen genehmigt und überwacht.

Der Strahlenschutz unterscheidet beruflich strahlenexponierte Personen (Exposition während der Arbeit) und die Exposition von Personen der Allgemeinbevölkerung mit Ausnahme der beruflichen und medizinischen Expositionen (StSchG §3). Aufgrund der natürlichen Strahlung lässt sich die Strahlenexposition nicht gänzlich vermeiden. Die natürliche Strahlenexposition – die Strahlendosisleistung wird in Sievert pro Zeiteinheit (Sv/Jahr) gemessen – ist im Mittel in Österreich 2,8mSv/Jahr und schwankt etwa im Bereich zwischen 2 und 10mSv/Jahr je nach Standort (geologische Bedingungen, Höhenlage, natürliche Radonvorkommen). Der überwiegende Teil (>50%) der natürlichen Exposition wird durch die Inhalation von Radon (Rd-222) und dessen Zerfallsprodukten in der Lunge verursacht.

Zur Überwachung des Personals in der Nuklearmedizin werden Körperdosimeter und Ringdosimeter verwendet. Dabei kommen Thermolumineszenzkristalle (sogenannte TLDs) zum Einsatz. Der gesetzliche Grenzwert der Ganzkörperdosis darf 20mSv/Jahr nicht überschreiten (AllgStSchV §4(3)1). Für die Untersuchungen am Patienten gibt es Referenzwerte in der medizinischen Strahlenschutzverordnung. Diese legt fest, welche Menge an Radio-Tracern für die jeweilige Untersuchung angewendet werden soll.

Während für das Personal der professionelle Umgang mit offenen radioaktiven Stoffen zum Alltag gehört, ist die Anwendung für den Patienten\*innen oft mit großer Unsicherheit und Strahlenangst (Strahlenphobie) verbunden. Wie einleitend schon erläutert schüren die Meldungen über



**Abbildung 6:** Auszug einer Aufnahme der Skelettszintigraphie zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Bild 1-3: Frühphase mit Anflutung des Tracers und Verteilung im Körper – nach 4 Sekunden, 8 Sekunden und 12 Sekunden. Bild 4: Weichteil-Phase nach 30 Minuten. Bild 5: knöcherne Phase von anterior und Bild 6 von posterior – beide nach 4 Stunden

drohende nukleare Verseuchungen derlei Ängste. Das Risiko durch die Strahlenexposition bei einer nuklearmedizinischen Untersuchung ist sehr gering.

## 8. Zusammenfassung

Nuklearmedizin beruht auf den Erkenntnissen der Kernphysik. Die Physik der radioaktiven Isotope und der ionisierenden Strahlung enthalten die grundlegenden Module für die Anwendung des Tracer Prinzips in der Diagnostik und Therapie.

Mit Hilfe der Applikation von Radiopharmazeutika und dem daraufhin wirksamen Tracer Prinzips, nämlich der Verteilung des radioaktiven Tracers im gesamten menschlichen Körper, können Aufnahmen aus dem Inneren des menschlichen Körpers gemacht werden. Wir können also den Organen beim Arbeiten zusehen – und noch mehr: wir können die „Arbeit“ der Organe (z. B.: der Metabolismus) messen. Dadurch können Fehlfunktionen aufgezeigt werden, aber auch Aussagen über das Therapieansprechen auf entsprechende Medikamente (Antibiotika, Chemotherapeutika) gemacht werden.

Ein ganz großer Vorteil bei diesen Untersuchungen ist es, dass sich Fehlfunktionen im Körper erfassen lassen, zeitlich weit vor einer morphologischen Veränderung des Gewebes. Daher können mit Hilfe der nuklearmedizinischen Diagnostik Krankheiten viel früher erkannt und damit auch rechtzeitig behandelt werden.

Die nuklearmedizinische Diagnostik dient wesentlich nicht nur um eine Diagnose oder Differentialdiagnose (Ausschluss

von Erkrankungen) für einen Patienten zu stellen. Durch die Möglichkeit der quantitativen Beurteilung der Erkrankung können die erforderlichen Therapien und die erforderlichen Therapiedosen sehr genau berechnet werden. Während der laufenden Therapie kann das Therapieansprechen und somit die Wirksamkeit einer Therapie mit Hilfe der nuklearmedizinischen Diagnostik auch überprüft werden. Durch regelmäßige Nachuntersuchungen wird sichergestellt, dass Erkrankungen nicht wieder auftreten oder im Falle eines positiven Befundes eine geeignete Therapie angeboten werden kann.

**Stefan Kerschbaumer** LKH-Univ. Klinikum

Graz, Universitätsklinik für Radiologie, Klinische

Abteilung für Nuklearmedizin

**Christian Gstettner** LKH-Univ. Klinikum Graz, Universitätsklinik

für Radiologie, Klinische Abteilung für Nuklearmedizin

### Abkürzungen:

AllgStSchV:	Allgemeine Strahlenschutzverordnung
Bq:	Einheit der Aktivität: Becquerel, benannt nach dem französischen Physiker Antoine Henri Becquerel
Hybridgerät:	Kombination zweier Modalitäten in einem Gerät. z. B.: SPECT/CT und PET/CT
MedStSchV:	Medizinische Strahlenschutzverordnung
PET/CT:	Hybridgerät: Positronen-Emissions-Tomographie / Computer Tomographie
SPECT/CT:	Hybridgerät: Single-Photon-Emissions-Computer-Tomography / Computer Tomographie
StSchG:	Strahlenschutzgesetz
Sv:	Einheit der Effektiv-Dosis, benannt nach dem schwedischen Mediziner und Physiker Rolf Sievert
Tc99m:	Isotop Technetium der Massezahl 99 im metastabilen Zustand, Halbwertszeit 6 Stunden
TLD:	Thermo-Lumineszenz-Dosimeter

## Literatur

Hier finden Sie Zusatzmaterial zu diesem Artikel auf der Plus Lucis Homepage:

Zeit Aktivitäts Darstellungen:  
<https://www.pluslucis.org/Zeitschrift.html>

Strahlendosis in der Nuklearmedizin:  
<https://www.pluslucis.org/Zeitschrift.html>

### Bücher:

Harald Schicha, Otmar Schober, Nuklearmedizin: Basiswissen und klinische Anwendung. Schattauer Verlag; 5., Auflage. 2003.

Torsten Kuwert, Nuklearmedizin. Thieme Verlag; 4. Auflage. 2007.

### Online Ressourcen:

Medizinische Strahlenschutzverordnung:  
<https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20010088>

Strahlenschutzgesetz:  
<https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20011197>

Österreichische Gesellschaft für Nuklearmedizin und molekulare Bildgebung:  
<https://www.ognmb.at>

Deutsche Gesellschaft für Nuklearmedizin:  
<https://www.nuklearmedizin.de>

Europäische Gesellschaft für Nuklearmedizin:  
<https://www.eanm.org>

Internationale Atom-Energie-Behörde, siehe „Nuclear Medicine and Diagnostic Imaging Section“:  
<https://www.iaea.org>

# Nuklearmedizin live erfahren – Ein Unterrichtspaket für den außerschulischen Lernort

## „Nuklearmedizinische Abteilungen in Österreich“ Chemie und Physik (Sek II)

Natasha Gstettner und Fabian Seedoch

### 1. Einleitung

Außerschulische Lernorte können eine Bereicherung für den Unterricht darstellen. Der Besuch eines solchen für Lehrpersonen ist mit hohem Organisations-, Vor- und Nachbereitungsaufwand verbunden. Dies mag ein Grund dafür sein, dass außerschulische Lernorte teilweise weniger im Schulunterricht integriert werden. Dennoch ist die Erkundung von Lernorten außerhalb des Schulgebäudes, sowie das Zusammenarbeiten mit außerschulischen Fachexpert\*innen, zur Förderung von Schul- und Alltagsbildung, wichtig [1]. Die Autor\*innen haben sich zum Ziel gesetzt den Lehrkräften ein vorbereitetes Projektpaket für die Sekundarstufe II zur Verfügung zu stellen. Im vorliegenden Artikel wird der Lehrplanbezug hergestellt und zusätzlich werden die einzelnen Teile des Projektes beschrieben. Mit Hilfe der Materialien im Online-Portal lässt sich ein mehrstündiges Projekt, bestehend aus Stundenplanungen, außerschulischem Projektteil sowie passende Aufgaben, zur Bearbeitung in einer Forschungsmappe zum Thema „Nuklearmedizin“, durchführen.

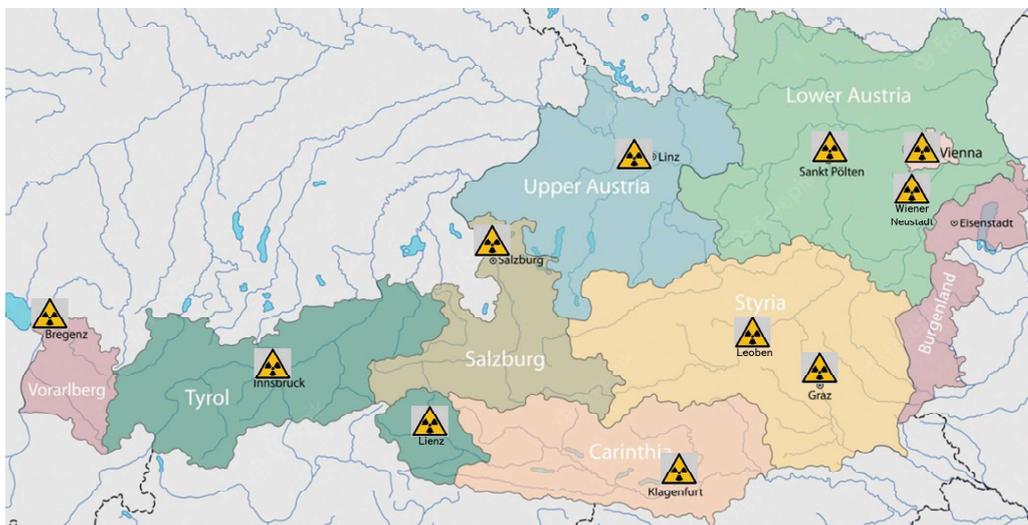
### 2. Lehrplan- und Alltagsbezug

Ein wichtiger didaktischer Grundsatz des Lehrplans der AHS ist das Herstellen von Bezügen zur außerschulischen Lebenswelt. Dieser sieht vor, dass Lernende außerschulische Lernorte besuchen und Fachleuten begegnen können. Die Bedeutung von neuen Technologien im Unterricht ist einzubeziehen.

Hinsichtlich dessen sollen Lernende Befragungen durchführen, Informationen sammeln und Projektarbeiten erstellen. Im Fach Physik spricht der Lehrplan von Inhalten wie: natürliche Radioaktivität, ionisierende Strahlung, Kernfusion und -spaltung. Dies ist auch in Verbindung mit medizinischen und technischen Anwendungen zu verstehen [2]. Eine Chance für diese Verbindung der Inhalte bieten die nuklearmedizinischen Einrichtungen in Österreich. Der Besuch in einer nuklearmedizinischen Abteilung eröffnet zusätzlich die Möglichkeit von fächerübergreifendem Lernen und einen Einblick in das Berufsfeld von Nuklearmediziner\*innen. Ferner können die Schüler\*innen moderne Diagnosegeräte sowie nuklearmedizinische Techniken kennenlernen.

### 3. Nuklearmedizinische Abteilungen in Österreich

Vorweg sei kurz beschrieben mit welcher Thematik sich die Nuklearmedizin beschäftigt. In diesem Sonderfach werden Stoffwechselprozesse im Körper dargestellt. Dazu verwendet man einerseits radioaktiv markierte Trägerstoffe (Tracer), andererseits zur entsprechenden Detektion, Gammakameras oder PET-CT Geräte. Das am häufigsten verwendeten Nuklid ist dabei der Gammastrahler Technetium 99m, welches vor Ort von einem Molybdängenerator gewonnen wird. Betreffend PET-CT Untersuchungen werden dagegen PET-Strahler verwendet, welche in einem Teilchenbeschleuniger hergestellt



**Abbildung 1:** Die Österreichkarte mit den nuklearmedizinischen Abteilungen (Stand Dez. 2022), die sich als außerschulische Lernorte eignen [3]. (Die Liste der Adressen dieser Abteilungen sind im Online-Portal zu finden.)

werden müssen. Nur wenige nuklearmedizinische Abteilungen in Österreich besitzen einen solchen und sind somit auf den einzig speditierbaren PET-Strahler F-18 angewiesen. Darüber hinaus können auch nuklearmedizinische Therapien durchgeführt werden. Dabei werden entsprechend hoch-energetische Alpha- und Beta-Strahler mit kurzer Reichweite verwendet.

Ein Zugang als Privatperson ist in solchen „sensiblen“ Abteilungen aufgrund des gesetzlichen Strahlenschutzes nicht möglich. Für Bildungszwecke und nach entsprechender Rücksprache und Vorbereitung kann eine Klasse unkompliziert Zugang erhalten. In den Bundesländern Niederösterreich, Steiermark, Kärnten, Tirol, Salzburg, Oberösterreich und Wien befinden sich aktuell (Stand Dez. 2022) nuklearmedizinische Abteilungen, die für einen solchen Zweck angefragt werden können. Diese sind in Abbildung 1 dargestellt, wobei eine Liste mit den dazugehörigen Kontaktdaten direkt im Online-Materialpaket enthalten ist.

Eine Vor- und Nachbereitung ist für einen solchen Besuch unabdingbar. Im Folgenden werden entwickelte Materialien vorgestellt, die eine Grundlage für einen Besuch für den Physik- bzw. Chemieunterricht darstellen.

#### 4. Das Unterrichtspaket

Mithilfe des gut strukturierten Unterrichtspaketes lässt sich das Projekt „Außerschulischer Lernort Nuklearmedizin“ gut umsetzen. Dieses enthält alle Informationsschreiben für die Erziehungsberechtigten, sowie ausführliche Stundenplanungen mit Arbeitsblättern inkl. Lösungen (16-seitige Sequenzplanung siehe Zusatzmaterial im Online-Link) und das umfassende Dokumentationsportfolio, welches die Schüler\*innen durch das Projekt führt. Unser didaktischer Aufbau orientiert sich gesamtheitlich am 5E Modell. Für die Engage-Phase eignen sich zwei Unterrichtseinheiten, die einen Einstieg in das Projekt und die Materie darstellen sollen. In diesen Einheiten wird bereits vorhandenes Wissen mit dem neuen Unterrichtsstoff zum Thema „natürliche Radioaktivität“, „ionisierende Strahlung“, „Kernfusion und -spaltung“ [2] verknüpft. Es bietet sich an, den Besuch der Abteilung für Nuklearmedizin

in die Explore-Phase einzubetten, da in dieser die Tätigkeit Erkunden im Vordergrund steht. Überdies werden am Lernort Vorgänge beobachtet, Informationen von Fachexpert\*innen gesammelt und Erklärungen zu der Problemstellung gesucht. In der anschließenden Explain-Phase werden die Erkenntnisse aus der Explore-Phase geprüft, diskutiert und folglich die Problemstellung gelöst. Die Lernenden präsentieren in dieser Phase ihre Erkenntnisse, welche sie am außerschulischen Lernort gewonnen haben. Dies erfolgt durch die Bearbeitung eines dazu angefertigten 17-seitigen Dokumentationsportfolio (Exkursionsmappe im Online-Link). In der Extend-Phase wird das neu erworbene Wissen in Form von verschiedenen Präsentationsmöglichkeiten (Poster, Video, Interview, PPT...) für andere Klassen der Schule oder Eltern, z. B. beim Tag der offenen Tür, vorbereitet und durchgeführt. Während aller Phasen führt die Lehrperson Beobachtungen durch und hat die Möglichkeiten die Lernentwicklung der Lernenden einzuschätzen [4]. Das gesamte Projektmaterial ist im Unterricht auch einsetzbar, wenn die Möglichkeit, den außerschulischen Lernort zu besuchen, nicht besteht. Entsprechende Adaptionsmöglichkeiten sind am Ende der Sequenzplanungen gesondert angeführt.

#### Auflistung Unterrichtspaket im Online-Portal:

1. Sequenzplanung von 3 Unterrichtsstunden
2. Zusatzmaterial für die Lehrperson: Bilder, Fotos, Arbeitsblätter, Fachinformationen, Flash Cards, Onlinequellen ect.
3. Exkursionsmappe für Schüler\*innen: inkl. Informationsschreiben für die Eltern und Schüler\*innen
4. Strahlenschutzklärung
5. Liste der Nuklearmedizinischen Abteilungen

Die konkreten Materialien für eine Exkursion zu einer nuklearmedizinischen Einrichtung finden sich Online als Ergänzungsmaterial zu diesem Heft auf der Homepage:  
<https://www.pluslucis.org/Zeitschrift.html>

Natasha-Gabriela Gstettner CV Labs, Inc. USA  
Fabian Seedoch BG/BRG Mattersburg

#### Literatur

- [1] Schulte, A. (2019). Außerschulische Lernorte. Berlin: Cornelsen.
- [2] Lehrpläne - allgemeinbildende höhere Schulen (2021). <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10008568>
- [3] freepik company. (2022). freepik. Abgerufen am 27.11.2022 von freepik.com: [https://www.freepik.com/premium-vector/map-austria\\_4670608.htm](https://www.freepik.com/premium-vector/map-austria_4670608.htm)
- [4] Bybee, R. W., A Taylor, J., Gardner, A., Van Scotter, P., Carlson, J., Westbrook, A. L., & Landes, N. (Januar 2006). The BSCS 5E Instructional Model: Origins and Effectiveness. Abgerufen am 27.11.2022 von bscs.org: <https://bscs.org/wp->

# Die Nutzung von Technetium in der nuklearmedizinischen Diagnostik als Anlass für inner- und überfachliches Bewerten im Physikunterricht

Markus S. Feser und Johanna Dejanovikj

## 1. Einleitung

Die zivile Nutzung von Nukleartechnik hat nicht nur einen starken Bezug zur Fachwissenschaft Physik, sondern berührt auch gesellschaftlich-politische sowie ethisch-moralische Fragen. In der Öffentlichkeit und auch in vielen Physikschulbüchern findet diesbezüglich allerdings vielfach eine einseitige Betrachtung statt (siehe auch [1], [2]). Bei Fragen wie der Sicherheit von Kernkraftwerken oder der Entsorgung radioaktiver Abfälle stehen oftmals Risiken und Gefahren im Vordergrund, während beispielsweise im Zusammenhang mit einer Nutzung von Radionukliden in der Medizin (z. B. zur Krebsdiagnostik) überwiegend auf Vorteile verwiesen wird. Die umfassende – und damit adäquate – Bewertung einer Technologie zeichnet sich jedoch gerade durch die individuelle Abwägung sowohl von Nutzen als auch Risiken aus.

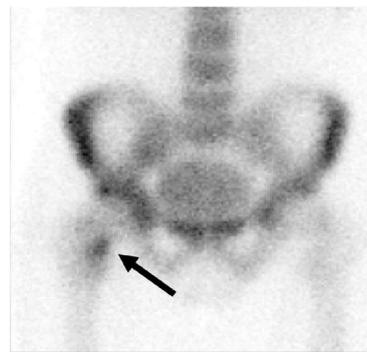
Damit Schüler\*innen dies gelingt, benötigen sie nicht nur Fachwissen, sondern auch Kompetenzen zum inner- und überfachlichen Bewerten. Sowohl inner- als auch überfachliches Bewerten gilt es daher im Chemie- und Physikunterricht zu fördern. Wie eine solche Förderung im Unterricht umgesetzt werden kann, skizzieren wir in diesem Artikel am Beispiel eines biophysikalischen Kontexts: der Nutzung von Technetium in der nuklearmedizinischen Diagnostik. Hierzu werden im ersten Teil des Artikels zunächst fachliche Hintergründe zu den Eigenschaften, der Verwendung und der Gewinnung von Technetium für die Nuklearmedizin dargestellt. Im zweiten Teil des Artikels werden zum Kontext der Nutzung von Technetium in der nuklearmedizinischen Diagnostik zwei exemplarische Lernaufgaben zum inner- und überfachlichen Bewerten, zusammen mit einer ausführlichen didaktischen Kommentierung, vorgestellt.

## 2. Fachlicher Hintergrund

### 2.1 Verwendung von Technetium in der nuklearmedizinischen Diagnostik

Technetium-99m ist das am häufigsten verwendete Radionuklid bei der bildgebenden nuklearmedizinischen Diagnostik, der sog. Szintigraphie [3]. Eine geringe Menge Technetium-99m wird hierzu an einen Trägerstoff gebunden und bei der Untersuchung in den Körper injiziert. Aufgrund des Trägerstoffes reichert sich das Technetium-99m, bevor es zerfällt und ausgeschieden wird, in bestimmten Regionen des Körpers vermehrt an, z. B. im Skelett oder in der Schilddrüse. Aufgrund der ionisierenden

Strahlung, die Technetium-99m beim Zerfall emittiert, lässt sich seine tatsächliche Verteilung im Körper mit Hilfe eines Detektors erfassen und anschließend in ein Bild umwandeln (für Details siehe z. B. [4], [5]). Aufgrund des Verteilungsmusters im so entstandenen Bild können Rückschlüsse auf eventuelle Erkrankungen, z. B. Knochenbrüche oder Krebs, gezogen werden (siehe Abbildung 1).



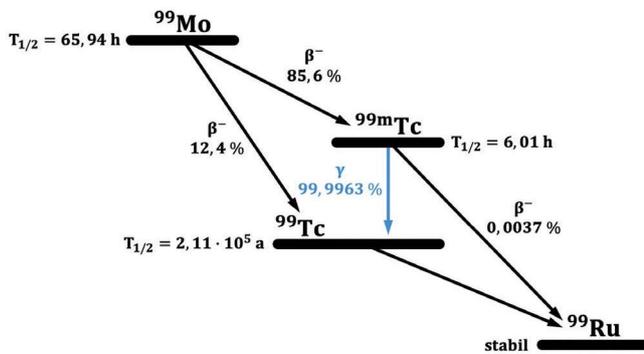
**Abbildung 1:** Aufnahmen eines Unterleibs aus bildgebenden diagnostischen Untersuchungen mit Technetium-99m. Der Pfeil zeigt auf eine Fraktur des Oberschenkelhalses (Bildquelle: [6]).

Das Ausgangsprodukt für Technetium-99m (Molybdän-99) wird in Kernreaktoren produziert (siehe unten). Weltweit gibt es allerdings nur wenige Kernreaktoren, die hierfür geeignet sind. 2008 führte deshalb ein gleichzeitiger Ausfall mehrerer dieser Spezialreaktoren zu einem gravierenden Versorgungsengpass mit Technetium-99m in Europa [7]. Zudem ist aufgrund des hohen Alters der Kernreaktoren, die für die Versorgung mit Technetium-99m genutzt werden, in der Zukunft vermehrt mit Ausfällen in der Produktionskette zu rechnen [3]. Um zukünftigen Technetium-Versorgungsengpässen entgegen zu wirken, wird daher gefordert, neue Kernreaktoren zur Bereitstellung von Technetium-99m für die Nuklearmedizin in der Europäischen Union zu bauen ([3],[8]). Zu diesem Zweck wird gegenwärtig z. B. der Forschungsreaktor FRM II der Technischen Universität München entsprechend umgerüstet [10].

### 2.2 Physikalische Eigenschaften von Technetium-99m

Wie im Zerfallsschema in Abbildung 2 dargestellt, besitzt Technetium-99m eine Halbwertszeit von 6,01 Stunden. Es zerfällt nahezu vollständig durch die Emission eines

Gamma-Photons in Technetium-99, das wiederum nach einer Halbwertszeit von 211.000 Jahren in das stabile Ruthenium-99 zerfällt. Einerseits ist die kurze Halbwertszeit von Technetium-99m sowie die vergleichsweise geringe Energie der emittierten Gammastrahlung ( $E_\gamma = 143 \text{ keV}$ ) von Vorteil, da so die Strahlenbelastung für die untersuchten Personen minimiert wird [10]. Andererseits folgt aus dieser kurzen Halbwertszeit, dass Technetium-99m für medizinische Zwecke nicht gelagert werden kann. Stattdessen muss es unmittelbar vor einer Untersuchung gewonnen werden. Hierzu werden in Krankenhäusern sog.  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Generatoren eingesetzt [5]. In diesen Generatoren zerfällt Molybdän-99 durch Beta-Minus-Zerfall und mit einer Halbwertszeit von 65,94 Stunden überwiegend in Technetium-99m (siehe Abbildung 2). Mit Hilfe von Kochsalzlösung lässt sich das Technetium-99m vom verbleibenden Molybdän-99 im Generator trennen und so für eine medizinische Untersuchung weiterverwerten [5].



**Abbildung 2:** Zerfallsschema von Molybdän-99 über Technetium-99m zu Ruthenium-99 (in Anlehnung an [11]). Für nuklearmedizinischen Diagnostik relevant ist lediglich der Gammazerfall von  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  zu  $^{99}\text{Tc}$  (blau hervorgehoben).

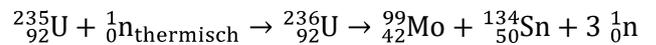
### 2.3 Gewinnung von Technetium

Für die Gewinnung von Technetium-99m wird also Molybdän-99 als Ausgangsstoff benötigt. Da Molybdän-99 eine Halbwertszeit von lediglich 65,94 Stunden besitzt, kommt es in der Natur praktisch nicht vor. Es muss daher künstlich hergestellt und in einer zeitlich eng getakteten Versorgungskette

weiterverarbeitet werden. Diese Versorgungskette ist in Abbildung 3 vereinfacht dargestellt [12].

Die Standardmethode zur Produktion von Molybdän-99 für medizinische Zwecke besteht darin, es durch Kernspaltung zu gewinnen ([13], [12]). Hierzu werden in einem ersten Schritt sog.  $^{235}\text{U}$ -Targets aus Aluminium und  $^{235}\text{U}$  angereichertem Uran hergestellt. Der Anreicherungsgrad des Urans bestimmt dabei die spätere Ausbeute an Molybdän-99; für waffenfähig angereichertes Uran ist die Ausbeute etwa fünfmal höher als für nicht waffenfähig angereichertes Uran [13].

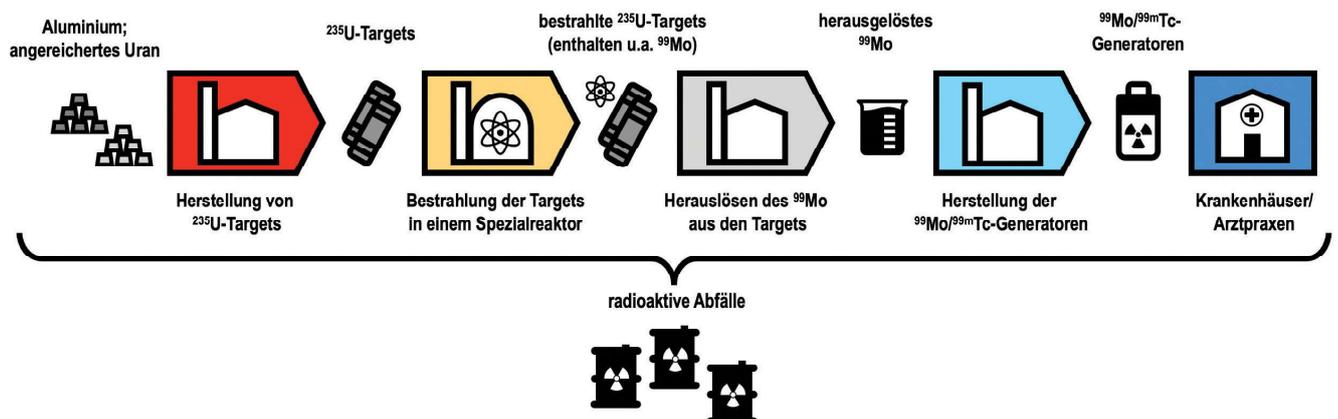
Die  $^{235}\text{U}$ -Targets werden in einem speziell hierfür ausgerichteten Kernreaktor mit thermischen Neutronen bestrahlt. Dies führt zur Spaltung des Uran-235 in den Targets. In circa 6 % der Fälle kommt es dabei zu einem Spaltprozess, aus dem Molybdän-99 als Tochternuklid hervorgeht [13]:



Nach 6 Tagen werden die  $^{235}\text{U}$ -Targets aus dem Reaktor entfernt [10]. Um einen möglichst großen Anteil des produzierten Molybdän-99 für medizinische Zwecke nutzen zu können, wird daraufhin innerhalb kürzester Zeit das Molybdän-99 aus den  $^{235}\text{U}$ -Targets herausgelöst und zu  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Generatoren weiterverarbeitet, die dann an Krankenhäuser bzw. ärztlichen Praxen zur Verwendung ausgeliefert werden [12].

Wie in Abbildung 3 dargestellt, fallen entlang der gesamten Versorgungskette für Technetium-99m unerwünschte radioaktive Abfälle an, die aufbereitet und z. T. über sehr lange Zeiträume sicher endgelagert werden müssen. Insbesondere die lange Halbwertszeit von Technetium-99 (211.000 Jahren) machen dieses Radionuklid zu einem der Hauptabfallstoffe [14]. Es wird geschätzt, dass das in radioaktiven Abfällen enthaltene Technetium-99 bis zu einer Million Jahre nach seiner Produktion eine relevante Aktivität aufweist [14].

Genau hieraus ergibt sich allerdings ein ethisch-moralisches Dilemma. Eine diagnostische Untersuchung mit Technetium, die einen gesundheitlichen Nutzen für Einzelne darstellt,



**Abbildung 3:** Versorgungskette für Technetium-99m (in Anlehnung an [12]).

ist nur möglich, wenn man in Kauf nimmt, Abfallprodukte herzustellen, die eine potenzielle Gesundheitsgefahr für Andere darstellen. Zugespitzt: Die Herstellung eines Mittels, das z. B. zur Krebsdiagnose eingesetzt wird – und unter Umständen Ausgangspunkt für eine gelingende Krebstherapie sein kann – ist nur möglich, indem man zugleich Abfälle produziert, die bei anderen Menschen zu einer Krebserkrankung führen können.

### 3. Bewerten im Physikunterricht am Beispiel der Nutzung von Technetium in der nuklearmedizinischen Diagnostik

Das am Ende des vorherigen Abschnitts formulierte Dilemma illustriert, dass die Nutzung von Technetium in der nuklearmedizinischen Diagnostik ein geeigneter Kontext zur Bewertung überfachlicher, ethisch-moralischer Fragestellungen im Physik- oder Chemieunterricht ist [15]. Dieser Kontext kann jedoch nicht nur der Ausgangspunkt für die Bewertung überfachlicher, sondern auch innerphysikalischer Zusammenhänge sein.

Im Folgenden werden daher zwei Lernaufgaben für die Sekundarstufe II vorgestellt. Die Aufgaben sind dabei nur als Bausteine einer möglichen Behandlung des Themas im Unterricht zu sehen und setzen eine fachliche Einführung voraus, für deren Konzeption der fachliche Hintergrund in diesem Beitrag genutzt werden kann. Im Sinne eines didaktischen Kommentars werden jeweils notwendige (fachliche) Voraussetzungen erläutert sowie die vorgestellten Aufgaben in den Handlungskompetenzen für die kompetenzorientierte Reifeprüfung verortet [16].

#### 3.1 Lernaufgabe zum innerfachlichen Bewerten

##### Aufgabe 1:

Beurteile mit Hilfe der Kennwerte in Tabelle 1 die Verwendung von Technetium-99m zur nuklearmedizinischen Diagnostik. Vergleiche hierzu Technetium-99m mit seinen Ausgangs- und Zerfallsprodukten, indem Du die Bedeutung sowie Vor- und Nachteile der einzelnen Kennwerte für die nuklearmedizinische Diagnostik erläuterst.

**Tabelle 1:** Kennwerte von Technetium-99m, seinen Ausgangs- und Zerfallsprodukten

Nuklid	Halbwertszeit	Zerfallsart	Zerfallsenergie
Technetium-99m	6,01 h	$\beta^-$	437 keV
		$\gamma$	143 keV
Technetium-99	$2,11 \times 10^5$ a	$\beta^-$	294 keV
Molybdän-99	65,94 h	$\beta^-$	1,36 MeV
Ruthenium-99	stabil	–	–

##### 3.1.1 Ergänzende Anmerkungen

Ergänzend zur Tabelle kann den Schüler\*innen zur Bearbeitung Abbildung 2 dieses Artikels zur Verfügung gestellt werden,

sofern sie nicht bereits im Vorfeld Gegenstand des Unterrichts war.

#### 3.1.2 Fachliche Voraussetzungen und fachlicher Erwartungshorizont

Fachliche Voraussetzung für die Bearbeitung der Aufgabe ist, dass Schüler\*innen die radioaktiven Zerfallsarten Beta-Strahlung und Gamma-Strahlung sowie deren Eigenschaften in Bezug auf Reichweite und Abschirmbarkeit kennen: Gamma-Strahlung kann wirksam nur durch Blei abgeschirmt werden und durchdringt damit ungehindert menschliches Gewebe. Im Gegensatz dazu ist Beta-Strahlung leichter abschirmbar. Nur die Gamma-Strahlung von Technetium-99m bietet sich daher für bildgebende medizinische Diagnostik an, da sie den Körper durchdringt und außerhalb von ihm noch nachweisbar ist. Da die übrigen in der Tabelle aufgeführten Radionuklide Beta-Minus-Strahler sind, würde deren emittierte Strahlung vollständig durch den menschlichen Körper absorbiert werden [17].

Eine Betrachtung der Zerfallsenergien zeigt darüber hinaus, dass Technetium-99m neben der hohen Reichweite der Gamma-Strahlung eine relativ geringe Zerfallsenergie aufweist (143 keV). Die Strahlenbelastung der Patient\*innen wird daher durch den Einsatz von Technetium-99m gering gehalten. Neben diesen positiven Eigenschaften der Nutzung von Technetium-99m zur medizinischen Diagnostik zählt zu einer umfassenden Beurteilung auch die Abschätzung möglicher Nachteile bzw. Risiken, wobei sich eine Betrachtung der Halbwertszeiten der in der Tabelle aufgeführten Radionuklide anbietet. Die vergleichende Betrachtung zeigt, dass Technetium-99m die mit Abstand geringste Halbwertszeit der vier Radionuklide besitzt. Daraus folgt, dass es de facto unmöglich ist, Technetium-99m zu lagern. Um es für medizinische Zwecke zu nutzen, muss es daher künstlich erzeugt und innerhalb kurzer Zeit verbraucht werden.

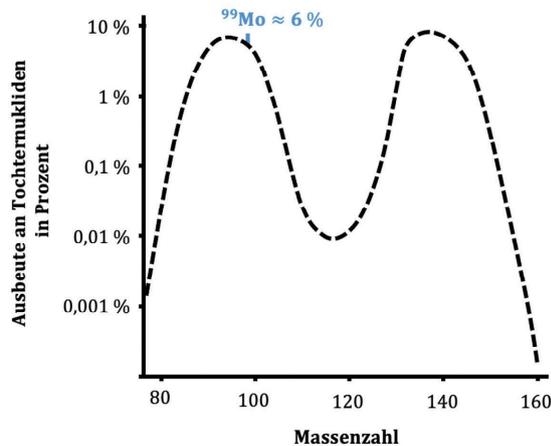
#### 3.1.3 Verortung in den Handlungskompetenzen

In ihrer Beurteilung sollen die Schüler\*innen im Sinne der Handlungskompetenz S1 [16] die Daten zur Zerfallsart und -energie aus fachlicher Perspektive bewerten und daraus den Schluss ziehen, dass sowohl die Gamma-Strahlung als auch die geringe Zerfallsenergie für die Medizin positive Eigenschaften von Technetium-99m sind.

#### 3.1.4 Mögliche innerfachliche Weiterführung und Vertiefung

Zur innerfachlichen Weiterführung und Vertiefung kann im Unterricht die Ausbeute von Technetium-99m durch die Kernspaltung von Uran-235 betrachtet werden. Aus der Spaltungsreaktion (siehe Abschnitt 2.3) und dem Graph der Spaltungshäufigkeiten (siehe Abbildung 4) kann abgelesen

werden, dass Molybdän-99 nur bei 6% der Kernspaltungen von Uran-235 entsteht. Hieraus folgt, dass zur Erzeugung von Technetium-99m aus Molybdän-99 große Mengen von radioaktivem Uran-235 in Reaktoren gespalten werden müssen. Aufgrund der dabei entstehenden radioaktiven Abfälle ist dieser Umstand zu den kritischen Punkten der Nutzung von Technetium-99m zu zählen.



**Abbildung 4:** Ausbeute (Häufigkeitsverteilung) an Tochternuklidern bei der Spaltung von Uran-235 durch thermische Neutronen als Funktion der Massenzahl der Tochternuklide (in Anlehnung an [13]).

### 3.2 Lernaufgabe zum überfachlichen Bewerten

#### Aufgabe 2:

„Technetium hilft, Krebs zu erkennen“ titelte die Onlinezeitung Welt am 2. August 2017 [18].

Nimm begründet Stellung, inwieweit der medizinische Nutzen von Technetium die Gefahr des bei der Produktion anfallenden radioaktiven Abfalls rechtfertigt.

#### 3.2.1 Ergänzende Anmerkungen

Diese überfachliche, gesellschaftlich-politische Problemstellung bezieht sich auf das am Ende von Abschnitt 2 formulierte ethisch-moralische Dilemma.

#### 3.2.2 Fachliche Voraussetzungen und fachlicher Erwartungshorizont

Voraussetzung für die Bearbeitung dieser Aufgabe ist die Kenntnis der Schüler\*innen darüber, dass zu einer angemessenen, begründeten Stellungnahme nicht nur physikalisches bzw. naturwissenschaftliches, sondern auch Wissen aus anderen Domänen, wie bspw. der Medizin und Ethik, nötig ist [15]. Argumente aus den unterschiedlichen Domänen sind bei der Bearbeitung der Aufgabe im Sinne einer Pro-Contra-Debatte gegeneinander abzuwägen, um so zu einer individuellen Meinung bzw. Stellungnahme zu kommen (zu Methoden der Entscheidungsfindung siehe z. B. [19]).

Im Folgenden werden exemplarisch Argumente aus den Domänen Physik, Medizin und Ethik erläutert. Um die Gefahr des radioaktiven Abfalls vom Standpunkt der Physik aus abschätzen zu können, muss Schüler\*innen das Konzept Halbwertszeit (siehe Lernaufgabe zum innerfachlichen Bewerten) sowie der Zerfalls- bzw. Produktionsprozess von Uran-235 bis Technetium-99m bekannt sein (siehe Abbildung 3).

Darüber hinaus müssen Schüler\*innen wissen, welchen Nutzen Technetium-99m in der medizinischen bildgebenden Diagnostik hat, für welche Art der Diagnose es eingesetzt wird und dass es nicht einfach zu substituieren ist [12].

Um die ethisch-moralische Dimension berücksichtigen zu können, müssen Schüler\*innen über Grundlagen der ethisch-moralischen Argumentation verfügen (für eine Übersicht über ethische Grundbegriffe für den naturwissenschaftlichen Unterricht siehe [20]). Ein moralisches Urteil in der vorliegenden Fragestellung könnte beispielsweise lauten: „Es ist moralisch falsch, Menschen durch eine Technetium-99m-Behandlung nicht zu helfen.“ Zur Abwägung des Nutzens von Technetium-99m für Einzelne gegenüber der möglichen Gefahr des radioaktiven Abfalls für Viele bietet sich eine Betrachtung im Sinne der philosophischen Strömung des Utilitarismus an [20]. Der Utilitarismus betrachtet bei der ethischen Bewertung einer Handlung ausschließlich deren Folgen und bewertet diejenigen Handlungen als moralisch richtig, die das Gesamtwohl einer Gesellschaft erhöhen.

#### 3.2.3 Verortung in den Handlungskompetenzen

Schlussendlich könnte sich eine angemessene Bearbeitung der Aufgabe beispielsweise darin zeigen, dass Schüler\*innen (1) das Risiko der langen Halbwertszeit der Zerfallsprodukte bei der Erzeugung von Technetium-99m für viele Menschen bzw. Generationen, (2) den alternativlosen individuellen, medizinischen Nutzen bei der Diagnostik und (3) die mögliche moralische Pflicht zu jeder möglichen Therapie einschätzen, gewichtet gegeneinander abwägen und zu einer individuellen, begründeten Meinung kommen (siehe S2 in [16]).

#### 3.2.4 Mögliche überfachliche Weiterführung und Vertiefung

Eine Betrachtung der drei Domänen Physik, Medizin und Ethik ist dabei nicht als abschließende Liste zu verstehen. Darüber hinaus könnten ökonomische oder politische Interessen im Unterricht thematisiert und von den Schüler\*innen in den Abwägungsprozess mit einbezogen werden. Beispielsweise kann auch in den Blick genommen werden, welchen Nutzen und welche Risiken sich für die Wirtschaftsindustrie durch den Neubau eines Kernreaktors zur Versorgung der Nuklearmedizin ergeben würden oder wie ein solcher Neubau finanziert werden kann (privat-wirtschaftlich vs. staatlich).

#### 4. Abschließende Bemerkung

Die in diesem Artikel dargestellten Lernaufgaben sowie didaktischen Kommentare sind als Inspiration für eine Behandlung des Themas „Technetium in der nuklearmedizinischen Diagnostik“ im Physik- oder Chemieunterricht zu verstehen. Eine Förderung von Bewertungskompetenz kann dabei sowohl innerfachlich – d. h. beschränkt auf das Thema Radioaktivität – als auch überfachlich erfolgen – d. h. erweitert auf eine Betrachtung des Kontextes aus verschiedenen Domänen. Folgt man den Handlungskompetenzen zur kompetenzorientierten Reifeprüfung, sind beide Aspekte im naturwissenschaftlichen Unterricht zu berücksichtigen. Zu beachten ist dabei, dass es insbesondere bei überfachlichen, ethisch-moralischen

Bewertungsaufgaben keine eindeutige bzw. „richtige“ Antwort gibt. Vielmehr zeichnet sich eine adäquate Beurteilung der Schüler\*innenlösungen von Bewertungsaufgaben dadurch aus, dass durch die Lehrkraft beurteilt wird, inwieweit es den Schüler\*innen gelungen ist, eine individuelle Pro-Contra-Debatte unter Berücksichtigung geeigneter Domänen zu führen (siehe Lernaufgabe zum überfachlichen Bewerten).

**Markus S. Feser** *Didaktik der Physik, Fakultät für*

*Erziehungswissenschaft, Universität Hamburg*

**Johanna Dejanovikj geb. Ratzek** *Didaktik der Physik,*

*Fakultät für Erziehungswissenschaft, Universität Hamburg*

#### Literatur

- [1] Heinicke S, Rieß F. Gutes Atom – böses Atom. Der geheime Lehrplan der Radioaktivität in Schulbüchern Ost-, West und Gesamtdeutschland. Unterricht Physik. 2014; 25(141/142): 104-108.
- [2] Sudbrock F. Strahlende Arzneimittel? Ionisierende Strahlung in der Medizin. Unterricht Physik. 2014; 25(141/142): 118-121.
- [3] Bockisch A, Gründwald F, Kortzeker J. Radionuklidengpass. Ursachen und Lehren. Nuklearmedizin. 2009; 48(2): 55-57.
- [4] Early P J. Use of diagnostic radionuclides in medicine. Health Physics. 1995; 69(5): 649-661.
- [5] Stabell U. Nuklearmedizinische Diagnostik. In Schlungbaum W, Flesch U, Stabell U. (Hrsg.). Medizinische Strahlenkunde. De Gruyter; 1993. S. 181–206. <https://doi.org/10.1515/9783110888126>
- [6] Ruiz Santiago F, Santiago Chinchilla A, Ansari A, Guzmán Álvarez L, Castellano García M. del M, Martínez Martínez A, Tercedor Sánchez J. Imaging of Hip Pain: From Radiography to Cross-Sectional Imaging Techniques. Radiology Research and Practice, 2016, Article 6369237. <https://doi.org/10.1155/2016/6369237>
- [7] Stafford, N. Isotope shortage is limiting nuclear medicine across Europe. BMJ. 2008; 337: Article a1575. <https://doi.org/10.1136/bmj.a1575>
- [8] EU will neue Reaktoren für Medizin (8. August 2010). Der Tagesspiegel. <https://www.tagesspiegel.de/wissen/eu-will-neue-reaktoren-fuer-medizin/1899700.html>
- [9] Forschungs-Neutronenquelle Heinz Meier-Leibnitz (ohne Datum). Bau der Mo-99 Bestrahlungsanlage. <https://www.frm2.tum.de/frm2/mo99/bau-der-mo-99-bestrahlungsanlage/>
- [10] Lorenz R. Molybdän-99/Technetium-99m als wichtigstes Radioisotop in der Diagnostik. Ohne Jahr <https://www.frm2.tum.de/frm2/industrie-medizin/radioisotopen-produktion/molybdaen-99/>
- [11] Alfassi Z B, Groppi F, Bonardi M L, & de Goeij J J M. On the “artificial” nature of Tc and the “carrier-free” nature of <sup>99m</sup>Tc from <sup>99</sup>Mo/<sup>99m</sup>Tc generators. Applied Radiation and Isotopes. 2005; 63(1): 37–40. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2005.01.009>
- [12] OECD Nuclear Energy Agency. The Supply of Medical Isotopes: An Economic Diagnosis and Possible Solutions. OECD. 2019 <https://doi.org/10.1787/9b326195-en>
- [13] Hasan S, & Prelas M A. Molybdenum-99 production pathways and the sorbents for <sup>99</sup>Mo/<sup>99m</sup>Tc generator systems using (n, γ) <sup>99</sup>Mo: A review. SN Applied Sciences. 2020; 2(11): Article 1782. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03524-1>
- [14] Yoshihara, K. Technetium in the environment. In K. Yoshihara & T. Omori (Hrsg.). Technetium and Rhenium Their Chemistry and Its Applications. Springer Berlin Heidelberg ;1996. Vol. 176: S. 17–35. [https://doi.org/10.1007/3-540-59469-8\\_2](https://doi.org/10.1007/3-540-59469-8_2)
- [15] Ratzek J, Höttecke D. Ethisches Bewerten im naturwissenschaftlichen Unterricht. Plus Lucis. 2020; 3: 16-20.
- [16] Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Forschung. Die kompetenzorientierte mündliche Reifeprüfung in den Unterrichtsgegenständen Physik. Empfehlende Richtlinien und Beispiele für Themenpool und Prüfungsaufgaben. 2012. [https://www.bmbwf.gv.at/dam/bmbwfgvat/schule/schulpraxis/zentralmatura/srdp\\_ahs/mrp\\_fff/reifepruefung\\_ahs\\_lfph.pdf](https://www.bmbwf.gv.at/dam/bmbwfgvat/schule/schulpraxis/zentralmatura/srdp_ahs/mrp_fff/reifepruefung_ahs_lfph.pdf) [02.04.2021]
- [17] Demtröder W. Experimentalphysik 4: Kern-, Teilchen- und Astrophysik. 2017: Berlin, Springer Spektrum.
- [18] Lossau N. Technetium hilft, Krebs zu erkennen. Jetzt wird es rar. In: Welt. 2017. <https://www.welt.de/wissenschaft/article167303981/Technetium-hilft-Krebs-zu-erkennen-Jetzt-wird-es-rar.html> [05.04.2022]
- [19] Höttecke D. Bewerten – Urteilen – Entscheiden. Ein Kompetenzbereich des Physikunterrichts. Unterricht Physik. 2013; 24 (143): 4-12.
- [20] Reitschert K. Ethisches 1x1 für naturwissenschaftliche Lehrkräfte. MNU. 2012; 65/3: 160-167.

# Das Hagen-Poiseuille-Gesetz und der menschliche Blutkreislauf

Marianne Korner, Florian Kleiss und Dominik Kögel

## 1. Einleitung

Physik zählt weltweit nach wie vor zu den unbeliebtesten Fächern in der Schule [1] und daran hat sich auch in den letzten Jahrzehnten wenig geändert [2]. Eine Möglichkeit, um hier Abhilfe zu schaffen und *interessanten* Physikunterricht zu gestalten, ist es, die Interessen der Lernenden ins Zentrum zu rücken. Dabei hat sich im Rahmen der IPN-Interessensstudie gezeigt [3], dass eine Mehrheit der Schüler\*innen sich angesprochen fühlt, wenn Physik anhand von Kontexten aus dem Bereich „Mensch und Natur“ unterrichtet wird. Entsprechend dieses Befundes fand im Wintersemester 22 ein Seminar an der Universität Wien statt, bei dem die Studierenden die Vorgabe erhielten, Aufgaben aus dem Kontext der Biophysik zu entwickeln und zu testen. Eine der Seminargruppen wählte im Kontext des menschlichen Blutkreislaufs die Erarbeitung des Hagen-Poiseuille-Gesetzes zum Thema. Zusätzliche Relevanz ergibt sich für diesen Kontext daraus, dass Herz-Kreislaufkrankungen in Österreich [4] wie in Deutschland [5] die Todesursache Nummer eins sind. Mit der Auseinandersetzung mit dem menschlichen Blutkreislauf wird hier in diesem sinnstiftenden Kontext, weil er die Lebenswelt der Schüler\*innen trifft [6], gezeigt, wie ein physikalisches Gesetz erarbeitet werden kann.

Die hier präsentierten Lernmaterialien verstehen sich als Lernaufgaben, die, einem kontinuierlichen Ansatz folgend, zur Konzeptentwicklung bei den Lernenden beitragen kann, um an bereits vorhandene Konzepte anzuknüpfen. Es ist nicht vorgesehen, den gesamten Umfang der Lernmaterialien in einer Unterrichtseinheit bearbeiten zu lassen, vor allem auch deswegen, weil es einen experimentellen Teil gibt, für den genügend Bearbeitungszeit eingeplant werden muss. Auch ist es möglich, je nach Unterrichtsziel und Zeitbudget, einzelne Teile des hier vorgestellten Materials herauszunehmen. Für die vollständige Bearbeitung des Lernmaterials schlagen die Autor\*innen 3 UE vor. Außerdem schlagen wir vor, das Thema in der Oberstufe zu behandeln, da immerhin spitze Kanülen verwendet werden. Auch der österreichische Lehrplan spricht für eine Behandlung in der 10. Schulstufe, bzw. in Spezialmodulen. Besonders geeignet erscheint das Lernmaterial auch für die Gestaltung des Laborunterrichts.

Da das gesamte Lernmaterial recht umfangreich ist, wird hier ein Überblick gegeben und einzelne Aspekte exemplarisch vorgestellt. Das gesamte Material steht auf der Homepage des AECC Physik unter <https://aeccp.univie.ac.at/lehrer-innen/fuer-den-unterricht/> zum Download zur Verfügung.

## 2. Das Hagen-Poiseuille-Gesetz

Die Hydrodynamik, die sich mit bewegten Fluiden beschäftigt, ist ein recht komplexes Gebiet. Zunächst wollen wir einmal die grundlegende Physik, die Voraussetzungen und Modellannahmen klären, unter denen das Hagen-Poiseuille-Gesetz formuliert werden kann.

In realen Fluiden tritt immer eine innere Reibung auf, die man dynamische Viskosität  $\eta$  nennt. Sie ist temperaturabhängig und wird in Pascal mal Sekunde ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ), oft aber auch in  $\text{mPs} \cdot \text{s}$  angegeben. Für Blut bei  $T = 37^\circ \text{C}$  beträgt die Viskosität  $\eta_{\text{Blut},37^\circ} \approx 4 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ , was ein wenig größer ist als die von Wasser bei dieser Temperatur  $\eta_{\text{Wasser},37^\circ} \approx 1 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ . Hätte ein Fluid Viskosität Null, könnte es durch ein horizontales Rohr fließen, ohne dass Kraft ausgeübt werden muss. Für reale Fluide wie z. B. Wasser, Öl oder Blut, ist auch im horizontalen Rohr ein Druckunterschied zwischen den Enden nötig [7, S. 473]. Es bildet sich ein parabolisches Geschwindigkeitsprofil aus, sodass die Geschwindigkeit des Fluids an der Rohrwand 0 ist und in der Rohrmitte ein Maximum darstellt.

Ein interessantes Detail ist, dass sich auch Jean Léonard Poiseuille ursprünglich mit der Physik der Blutzirkulation im menschlichen Körper und nicht mit einem abstrakten technisch-physikalischen Problem beschäftigte, als er das nach ihm und Gotthilf Heinrich Hagen benannte Gesetz fand [8]. Es lässt sich direkt aus der Definition der dynamischen Viskosität ableiten und lautet:

$$j = \frac{\pi r^4 \Delta p}{8 \eta l},$$

wobei  $j = \frac{\Delta r}{\Delta t}$  den Volumenstrom,  $\Delta p$  die Druckdifferenz,  $r$  den Radius des Rohres und  $l$  die Rohrlänge bezeichnet [9, S. 112]. Bemerkenswert ist die  $r^4$ -Abhängigkeit, die besagt, dass der Volumenstrom auf 1/16 des ursprünglichen Wertes sinkt, wenn sich der Radius halbiert. Im Falle des menschlichen Körpers, falls ein Blutgefäß durch eine Ablagerung aus Kalk oder Cholesterin eingeengt ist, kann das kompensiert werden, indem der Blutdruck erhöht wird. Man sieht, dass schon kleine Änderungen im Gefäßdurchmesser große Auswirkungen auf das Herz haben [7] [10].

Modellvoraussetzungen für die Gültigkeit des Gesetzes sind Röhre mit rundem Querschnitt, eine ideal inkompressible Newtonsche Flüssigkeit (deren Viskosität unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit ist) und eine laminare Strömung. Blut erfüllt diese Voraussetzungen nicht perfekt, da es auch aus festen Bestandteilen (z. B. Blutplättchen, rote/weiße Blutkörperchen) besteht und die Strömung nicht

immer laminar ist, dennoch kann das Hagen-Poiseuille-Gesetz zu grundlegenden Aussagen in größeren Blutgefäßen herangezogen werden. In Kapillaren hingegen versagt die Beschreibung des Gesetzes, da zusätzlich das Strömungsprofil nicht parabolisch ist, wie es die Navier-Stokes-Gleichung für viskose Fluide beschreibt. Ebenso wird in diesem Modell der hydrostatische Druck, der in unserem experimentellen Setting auftritt, nicht berücksichtigt. Man kann aber abschätzen, dass dieser bei einer Flüssigkeitssäule von wenigen Zentimetern klein gegenüber dem ausgeübten Druck ist und daher in guter Näherung unberücksichtigt bleiben kann. [7]

### 3. Die Teile des Lernmaterials im Überblick

In Kapitel 1 werden grundsätzliche Fakten zum Blutkreislauf und zur Viskosität erarbeitet (siehe Abb. 1). Im Vordergrund steht hier weniger eine biologisch vollständige Erarbeitung des Blutkreislaufes, sondern der wichtigsten Begriffe und der für den späteren Verlauf physikalisch relevanten Größenordnungen. Laminare und turbulente Strömungen werden eingeführt, ebenso die Viskosität mit Verweis auf vereinfachende Annahmen.

**Kapitel 1: Der Blutkreislauf und die Viskosität**

Lernziele:

- Blutkreislauf (Basisinformationen)
- laminare und turbulente Strömungen
- Einführung der Viskosität

**Kapitel 2: Das Gesetz von Hagen-Poiseuille**

Lernziele:

- Einführen des Strömungswiderstandes
- **Experiment:** Abhängigkeit des Strömungswiderstandes vom Radius überprüfen
- weitere Abhängigkeiten erarbeiten
- Hagen-Poiseuille-Gesetz formulieren
- Anwendungen auf den Blutkreislauf
- Erkrankungen des Blutkreislaufes

**Kapitel 3: Kontinuitätsgesetz**

Lernziele:

- Basisinformationen zum Kontinuitätsgesetz
- Zusammenhang zwischen Gefäßquerschnitt und Strömungsgeschwindigkeit erarbeiten

**Kapitel 4: Kirchhoffsche Gesetze für Strömungen**

Lernziele:

- Basisinformationen zu den Kirchhoffschen Gesetzen für Strömungen
- Strömungswiderstand in nacheinander durchflossenen Gefäßen
- Strömungswiderstand in parallel durchflossenen Gefäßen

Abbildung 1: Die Kapitel des Lernmaterials im Überblick

Kapitel 2 widmet sich der eigentlichen Erarbeitung des Hagen-Poiseuille-Gesetzes im **Experiment**. Dieses kann mit relativ einfachen experimentellen Mitteln nachgebaut werden. Nachdem der Volumenstrom  $j$  eingeführt wird, wird ein Strömungswiderstand definiert und die Struktur der Gleichung mit dem Ohmschen Gesetz verglichen. Danach wird nun die Abhängigkeit des Strömungswiderstandes vom Radius untersucht und somit auf die zentrale Aussage des Gesetzes, die Abhängigkeit vom Radius zur vierten Potenz, hingearbeitet. Zunächst werden qualitativ Betrachtungen beschrieben. Weiter geht es um Aspekte der Modellbildung,

das Aufstellen von Vermutungen und deren Überprüfung. Nachdem die restlichen Parameter des Hagen-Poiseuille-Gesetzes eingeführt wurden und das Gesetz nun auch formal vollständig verfügbar ist, werden Anwendungen im Blutkreislauf des Menschen besprochen. Mit insgesamt 23 Teilaufgaben stellt dieses Kapitel den umfangreichsten Teil dar. Die Art der experimentellen Aufgabenstellungen, die Vermutungen, Vorhersagen und deren Überprüfung beinhalten, folgt der bewährten Konzeptwechselstrategie P-O-E: *predict-observe-explain* [11]. Dieser Abschnitt spricht somit optimal die Umsetzung der E-Kompetenz (die sich mit dem Prozess der Erkenntnisgewinnung in der Physik beschäftigt) des Österreichischen Kompetenzmodells an [12].

Kapitel 3 und 4 runden das Thema ab, indem das Kontinuitätsgesetz und die Kirchhoff-Gesetze für Strömungen in Analogie zu den elektrischen erarbeitet werden.

### 4. Erarbeitung des Hagen-Poiseuille-Gesetzes mittels Experimentes

In diesem Abschnitt werden die Aufgaben aus Kapitel 2 exemplarisch näher beschrieben. Zu Beginn der Aufgabe wird der Volumenstrom und ein Gesetz für laminare Strömungen analog zum Ohmschen Gesetz formuliert. Dabei beinhalten die grünen Boxen immer Informationen, die so lernendengerecht aufbereitet sind, dass ein Selbststudium möglich sein sollte. Es wird bei der Abfolge der Teilaufgaben darauf geachtet, dass zunächst das Vorwissen aktiviert (wiederholt) wird und die Schüler\*innen kleinschrittig angeleitet werden. Abbildung 2 zeigt diesen Ausschnitt aus den Aufgabenstellungen.

**Einleitung**

Um laminare Strömungen von Newton'schen Fluiden in Rohren zu beschreiben, verwendet man den Volumenstrom  $j$ , der das durch den Rohrquerschnitt geflossene Volumen  $\Delta V$  pro Zeiteinheit  $\Delta t$  angibt:

$$j = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (1)$$

Der Volumenstrom  $j$  und der durch die Reibung an den Gefäßwänden auftretende Druckverlust (bzw. Druckdifferenz)  $\Delta p$  zwischen dem Anfang und dem Ende des Rohres sind direkt proportional zueinander, mit dem Strömungswiderstand  $R$  als Proportionalitätsfaktor:

$$\Delta p = R \cdot j \quad (2)$$

Der Strömungswiderstand  $R$  ist bei laminaren Strömungen eine Konstante, die von mehreren Parametern des Rohres und der Flüssigkeit abhängt. Wegen seiner Ähnlichkeit bezeichnet man Formel (2) auch als das *Ohm'sche Gesetz für laminare Strömungen*.

2.1 Wie lautet das Ohm'sche Gesetz beim elektrischen Stromkreis?

2.2 Welche Variable aus Formel (2) entspricht welchem Teil des „echten“ Ohm'schen Gesetzes?

$\Delta p \equiv$  \_\_\_\_\_

$R \equiv$  \_\_\_\_\_

$j \equiv$  \_\_\_\_\_

Abbildung 2: Grundlegende Überlegungen zur Strömung durch Rohre.

Die Aufgabenstellungen in diesem Kapitel beschäftigen sich zunächst damit, dass eine 10 ml-Spritze mit Wasser befüllt wird

und danach das Wasser mit annähernd gleicher Kraft durch zwei Kanülen, die sich in ihrem Radius, aber nicht in ihrer Länge unterscheiden, gedrückt wird. Die Lernenden sollen hier in einem ersten Schritt lediglich beschreiben, was ihnen auffällt. Es erfolgt zunächst eine **qualitative** und haptische Annäherung an das Gesetz. Danach soll eine Vermutung über den Zusammenhang zwischen Radius der Kanüle und Volumenstrom aufgestellt werden. Es ist auch qualitativ zu begründen, warum es sich hier um keine direkte Proportionalität, also warum es sich um keine lineare Abhängigkeit handeln kann. Eine Vermutung über eine mögliche Potenz in der Abhängigkeit soll danach aufgestellt werden.

In weiterer Folge erhalten die Lernenden einen Informationsinput zu einem möglichen Zusammenhang zwischen Strömungswiderstand und Radius der Kanüle (Abbildung 3).

Aus den bisherigen Überlegungen kann die Annahme getroffen werden, dass der Strömungswiderstand  $R$  bei einer konstanten Druckdifferenz  $\Delta p$  folgendermaßen mit dem Radius  $r$  des Rohres zusammenhängt:

$$R = k \cdot \frac{1}{r^b} \quad (3)$$

In Formel (3) bezeichnet  $b$  jene Potenz, welche für den Radius  $r$  in Aufgabe 2.5 vermutet wurde. Die Variable  $k$  fungiert zunächst als Platzhalter für alle weiteren Parameter von  $R$ .

Die Annahme aus Formel (3) kann nun in das Strömungsgesetz aus Formel (2) eingesetzt werden und nach ein paar kleinen Umformungen erhalten wir die Gleichung:

$$\Delta t = \frac{\Delta V}{\Delta p} \cdot k \cdot \frac{1}{r^b} \quad (4)$$

Im Zuge des Versuchs werden sowohl Volumen und Druckverlust als auch alle weiteren Parameter des Strömungswiderstandes ( $k$ ) konstant gehalten, weshalb der Faktor  $\frac{\Delta V}{\Delta p} \cdot k$  als Konstante  $a$  abgekürzt werden kann. Die Zeit  $t$ , bis die gesamte Flüssigkeit durch die Kanüle entronnen ist, ist dann nur noch eine Funktion des Radius  $r$ :

$$t(r) = a \cdot \frac{1}{r^b} = a \cdot r^{-b} \quad (5)$$

Der Faktor  $a$  ist an dieser Stelle für uns noch uninteressant. Die Vermutung für den Wert der Potenz  $b$  soll nun experimentell überprüft werden.

**Abbildung 3:** Informationsinput zum Design der experimentellen Untersuchung

In den folgenden Aufgabenstellungen wird zunächst die Abhängigkeit des Strömungswiderstandes vom Radius experimentell untersucht. Das **experimentelle** Setting ist in Abbildung 4 beschrieben. Das Material dazu ist leicht und günstig zu beschaffen (siehe Beschaffungshinweise), bzw. in den meisten Physiksammlungen vorhanden.

#### Materialliste:

- Stativmaterial mit einer Klemme und ev. etwas Gummiband
- eine 10 ml-Spritze mit gut beweglichem Kolben
- Kanülen mit (mind.) 4 unterschiedlichen Durchmessern
- ein großes Becherglas
- Massestück: idealerweise zylinderförmig; hier:  $m = 1 \text{ kg}$

Die Schüler\*innen werden nun dazu aufgefordert, mit 4 unterschiedlichen Kanülen Messungen durchzuführen, um den Parameter  $b$  (siehe Abb. 3) zu bestimmen. Dabei soll ein bestimmtes, konstantes Volumen von  $\Delta V = 5 \text{ ml}$  verwendet werden. Ebenso wird die Kraft, die auf den Stempel der



**Abbildung 4:** experimenteller Aufbau

Spritze drückt, konstant gehalten, indem ein Massestück darauf befestigt wird. Hier wird eine Masse von  $m = 1 \text{ kg}$  vorgeschlagen. In weiterer Folge sollen nun Messserien zur Ausströmzeit (je etwa 5 Messungen) zu jedem der vier unterschiedlichen Radien der Kanülen durchgeführt werden. Die Daten werden in eine vorgefertigte Tabelle eingetragen und die Mittelwerte sollen jeweils berechnet werden.

Eine Datenauswertung kann nun über Geogebra oder über Excel erfolgen. Die Wertepaare (Radius; mittlere Ausströmzeit) sollen in ein Diagramm eingetragen werden und eine Trendlinie geplottet werden. Im Idealfall geben die Programme nun einen Wert um 4 aus. Somit wäre die  $\frac{1}{r^4}$ -Abhängigkeit des Strömungswiderstandes vom Radius der Kanüle gezeigt. Abgerundet wird dieser Teil dadurch, dass das Ergebnis mit der vorher aufgestellten Vermutung verglichen wird und die Auswirkung einer Halbierung, bzw. Drittelung des Radius der Kanülen auf den Volumenstrom zu begründen ist. Allenfalls kann an dieser Stelle einer Diskussion der Ergebnisse Raum gegeben werden.

In weiterer Folge wird nun ebenfalls experimentell die Abhängigkeit des Strömungswiderstandes von der Länge  $l$  der Kanülen und von der Viskosität  $\eta$  mit demselben Aufbau untersucht, um zum Schluss ein vollständiges Gesetz zu erhalten. Die Viskosität wird über die Temperatur des verwendeten Wassers reguliert, was gut funktioniert, da man bei Wasser eine große Temperaturabhängigkeit beobachten kann. Es wird im Rahmen dieser Aufgabenstellungen eine Variablenkontrollstrategie [13] angewendet. Das bedeutet, dass bei einer Mehrzahl von möglichen Parametern alle, bis auf den zu untersuchenden, konstant gehalten werden. Wiederum sind von den Lernenden zuerst Vermutungen aufzustellen, um diese hernach mit den experimentellen Ergebnissen abzugleichen.

Ein Problem, das bei der Bestimmung von  $b$ , also der korrekten Potenz des Radius, auftreten kann, ist, dass die Programme (Geogebra, Excel) eine Dezimalzahl als Fitparameter  $b$  für die

experimentellen Daten ausgeben. Dann müssen die Lernenden entscheiden, welche Natürliche Zahl genommen werden muss: die nähere, die kleinere oder die größere. Hierzu ist erstens der Hinweis dienlich, dass  $b$  eine Natürliche Zahl sein soll. Zweitens ist es hilfreich sich zu überlegen, in welche Richtung die Abweichung aufgrund der experimentellen Durchführung und der verwendeten Annahmen geht: Wird  $b$  überschätzt, oder unterschätzt? Hierzu können die Lehrpersonen die Lernenden zu folgender Überlegung anleiten: In dünnen Rohren bildet sich die Strömung turbulenter aus als in breiteren. Daher sind die Werte aus den Messungen mit kleinen Durchmessern mit einem größeren Fehler behaftet, bzw. der Strömungswiderstand wird wegen der turbulenten Strömung zu groß herauskommen. Wenn sich aus dem Fit z. B. ein  $b$  von 3,4 ergibt, ist daher die nächste größere Zahl zu nehmen und das wäre die gewünschte 4.

Alternativ könnte man die Auswertung auch so gestalten, dass man die Ausströmzeit  $t$  einmal gegen  $r$  aufträgt, dann gegen  $r^2$ ,  $r^3$ ,  $r^4$  usw. und beurteilt, welcher der Graphen möglichst linear ist. Hat man nämlich die korrekte Potenz (hier: 4) gewählt, so müsste der Graph linear sein. Diese Technik ist auch unter „Linearisieren“ bekannt.

## 5. Erprobung im Unterricht

Das gesamte Lernmaterial wurde mit einer Kleingruppe von drei Schüler\*innen der Oberstufe in einem (freiwilligen) Nachmittagskurs an der Universität Wien erprobt. Kapitel 1 wurde schnell und in Einzelarbeit erledigt, Kapitel 2 war schon anspruchsvoller, aber aus Sicht der Lernenden auf einem passenden Niveau. Es ergaben sich zu Kapitel 2 Diskussionen darüber, wie einzelne Fragestellungen am besten zu bearbeiten seien. Daraus ergibt sich für den Unterricht die Empfehlung, dass Kapitel 1 im Vorfeld oder auch alleine erledigt werden kann, es sich für Kapitel 2 allerdings anbietet, die Lernenden in Kleingruppen arbeiten zu lassen. Die Experimente und ein Teil der Auswertung können in einer Unterrichtseinheit, bzw. in einer Doppelstunde abgeschlossen werden. Für die vollständige Bearbeitung des Lernmaterials schlagen wir jedoch 3 UE vor. Zur Art der Aufgabenstellungen gab es durchaus positive Rückmeldungen. So wurde das Thema als interessant empfunden und die Schüler\*innen hätten durchaus auch im Regelunterricht mehr dazu erfahren wollen. Die Schrittweite der Aufgaben war ihrer Ansicht nach perfekt gewählt und sie hatten bei keinem Abschnitt das Gefühl, zu lange oder zu kurz fest zu stecken. Des Weiteren hoben die ersten Proband\*innen hervor, dass die theoretischen Inputs und Aufgabenstellungen sich mit dem praktischen Teil der Aufgabe gut ergänzten und die Strukturierung durch die Kapitel unterstützend war [14].

## 6. Tipps und Tricks und für den Einsatz im Unterricht

Die *Lernvoraussetzungen* sind

- Kenntnisse über das Ohmsche Gesetz für Stromkreise (wird als Analogie strapaziert)
- Arbeiten mit Proportionalitäten
- sicherer Umgang mit der Potenzschreibweise und mit Potenzfunktionen (Interpretation des Ausdrucks  $r^{-b}$  und der Einfluss des Parameters  $b$  auf den Funktionsgraphen).

Sinnvoll bei der praktischen Durchführung ist es sicherlich, sich als Lehrkraft an einigen Stellen die Ergebnisse der Lernenden berichten zu lassen, um ein Weiterarbeiten mit möglicher Weise falschen oder ungünstigen Zwischenergebnissen zu vermeiden.

Beim experimentellen Aufbau ist es wichtig, dass die Halterung die Spritze gut umfasst, da es zu einiger mechanischer Beanspruchung kommt. Hier kann es sinnvoll sein, zwischen Halterung und Spritze ein Gummiband einzuklemmen, das die Reibung erhöht. Optional kann man das Massestück am Stempel der Spritze z. B. durch ein doppelseitiges Klebeband oder ein Poster Strip fixieren. Auch kann eine Verbreiterung des Stempels der Spritze mit einer aufgeklebten Scheibe (Heißklebepistole) sinnvoll sein, damit das Massestück stabiler hält.

Die *Beschaffung* der Spritze und der Kanülen kann in kleineren Mengen über die Apotheke geschehen, aber auch über die Firma LCEM (<https://lcem.de>). Ein Problem bei Kanülen ist oft, dass ihr Außendurchmesser zwar angegeben ist, aber nicht der Innendurchmesser, der hier gebraucht wird. Dazu schlagen die Autor\*innen vor, den Innendurchmesser entweder optisch mittels eines Fotos zu schätzen, oder aber mit einem dünnen Draht zu bestimmen. Drähte mit sehr kleinen Durchmessern bis 0,1 mm sind im Fachhandel erhältlich oder finden sich in vielen Physiksammlungen beim Material für die Elektrizitätslehre. Eine Alternative besteht auch darin, auf einer Medizintechnikseite zu recherchieren (z. B. [15]: Hier sind auch die Innendurchmesser der Kanülen der Firma Braun angegeben).

Im Falle weiteren Interesses zum Thema Physikunterricht im Kontext von Biologie und Medizin wird die Dissertation von Colicchia [16] zum Weiterlesen empfohlen.

Die Autor\*innen wünschen viel Spaß beim Umsetzen des Lernmaterials!

## Danksagung

Herzlichen Dank an Engelbert Stütz für die Hinweise zu den Durchmessern der Kanülen.

---

Marianne Korner *Senior Lecturer an der  
Universität Wien, Fakultät für Physik*

Florian Kleiss *Masterstudierender Lehramt Physik*

Dominik Kögel *Masterstudierender Lehramt Physik*

## Literatur

- [1] Hoffmann, L. and M. Lehrke, Eine Untersuchung über Schülerinteressen in Physik und Technik. *Zeitschrift für Pädagogik*, 1986. 32(2): S. 189-204.
- [2] Herbst, M., E. Fürtbauer, and A. Strahl. Interesse an Physik - in Salzburg. in DPG Frühjahrstagung. 2016. Hannover: PhyDid B.
- [3] Häußler, P., et al., *Naturwissenschaftsdidaktische Forschung: Perspektiven für die Unterrichtspraxis*. 1998, Kiel: Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften.
- [4] Austria, S. Todesursachen 2020, <https://www.statistik.at/statistiken/bevoelkerung-und-soziales/bevoelkerung/gestorbene/todesursachen>. [abgerufen am 05.08.2022];
- [5] Radtke, R. Häufigste Todesursachen in Deutschland. 2022; [abgerufen am 05.09.2022] Available from: <https://de.statista.com/themen/69/todesursachen/#dossierKeyfigures>.
- [6] Muckenfuß, H., *Physik im sinnstiftenden Kontext*. 1995, Berlin: Cornelsen.
- [7] Giancilo, D.C., *Physik*. 2006, München: Pearson.
- [8] Wikipedia. Gesetz von Hagen-Poiseuille. 07.03.2022, [https://de.wikipedia.org/wiki/Gesetz\\_von\\_Hagen-Poiseuille](https://de.wikipedia.org/wiki/Gesetz_von_Hagen-Poiseuille). [abgerufen am 05.09.2022]
- [9] Meschede, D., *Gerthsen Physik*. 2006, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- [10] Matzig, S. and M. Feichter. Herzinsuffizienz. *netdoktor.at* 2020, <https://www.netdoktor.at/krankheiten/herzinsuffizienz/>. [abgerufen am 17.10.2022]
- [11] Posner, G.J., et al., Accommodation of a Scientific Conception: Toward a Theory of Conceptual Change. *Science Education*, 1982. 66: p. 211-227.
- [12] BMUKK. Lehrpläne der AHS Unter- und Oberstufe. 2000, <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10008568>. [abgerufen am 06.09.2022];
- [13] Höttecke, D. and H. Schecker, Unterrichtskonzeptionen für Nature of Science (NOS), in *Unterrichtskonzeptionen für den Physikunterricht. Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis*, T. Wilhelm, H. Schecker, and M. Hopf, Editors. 2021, Springer Spektrum: Berlin. p. S. 401 - 434.
- [14] Kleiss, F. and D. Kögel, *Der Blutkreislauf aus Sicht der Biomechanik. Seminararbeit im SoSem 2022*, Universität Wien: Wien.
- [15] Meier, M. Meier-Medizintechnik GmbH. 2021, <https://www.meier-medizintechnik.de/topseller-bei-meier-medizintechnik/topseller-praxisbedarf/b.-braun-sterican-standard-kanuelen/standardkanuelen>. [abgerufen am 19.10.2022]
- [16] Colicchia, G., *Physikunterricht im Kontext von Medizin und Biologie*, in Fakultät für Physik. 2002, LMU: München.

# Sprechen und Hören

Leopold Mathelitsch

*Die Natur hat uns nur einen Mund, aber zwei Ohren gegeben, was darauf hindeutet, dass wir weniger sprechen und mehr zuhören sollten.*

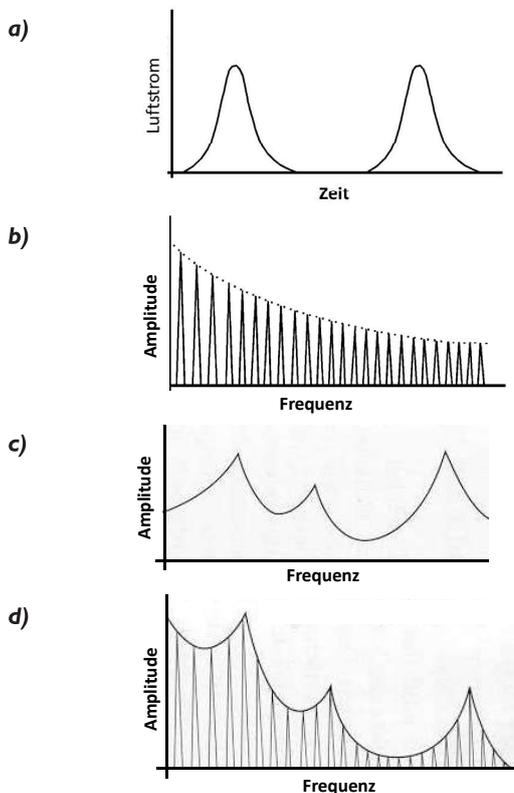
Zenon von Elea der Ältere (490 – 430 v. Chr.)

Um Schall anwendungsorientiert und lernendengemäß zu unterrichten, werden von Lehrkräften die Grundlagen der Akustik häufig anhand verschiedener Musikinstrumente eingeführt. Bedeutender als Musik ist für die Menschheit jedoch die Kommunikation über die Sprache. Biophysikalische Aspekte der Stimme und des Ohres ist in den Schulbüchern weniger ausführlich behandelt, darum sollen in diesem Artikel Eigenheiten beider Systeme etwas genauer vorgestellt werden.

## 1. Die Stimme

### 1.1 Formung einer Stimme

Stimmbildung ist ein komplexer Vorgang, der mit der Atmung beginnt und mit dem Aussenden von Schallwellen aus dem Mundraum endet. In Abb. 1 sind die einzelnen Schritte der Stimmbildung, genauer gesagt der Erzeugung von Vokalen, skizziert [1]. Die physikalischen Grundlagen dazu und die unterschiedlichen Darstellungen der Abbildungen sind im Anhang zusammengefasst.



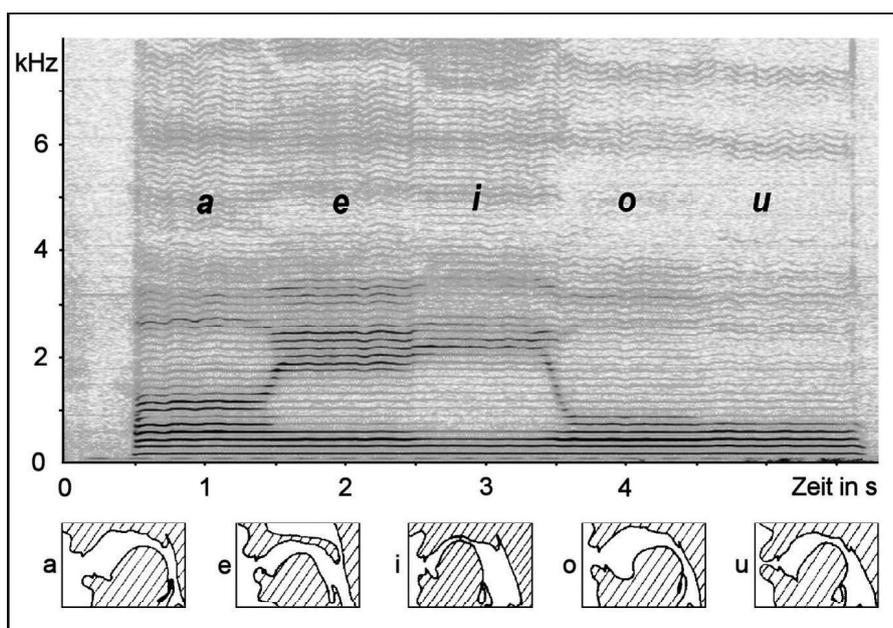
**Abbildung 1:** a) Öffnen und Schließen der Stimmlippen; b) Frequenzspektrum des erzeugten Klangs; c) Resonanzen des Mundraums; d) Spektrum des ausgesandten Klangs.

Durch Muskelanspannung um und unter dem Brustkorb wird Luft aus der Lunge durch die Luftröhre nach oben gepresst. Dabei muss eine Engstelle passiert werden, die durch die Stimmlippen im Kehlkopf gebildet wird. Die umgangssprachlichen Stimmbänder sind nur die äußersten Ränder der Stimmlippen. Die Grundstellung der Stimmlippen ist beim Sprechen eine geschlossene, durch die gestaute Luft werden sie geöffnet. Danach wirken zwei Kräfte, um sie wieder zu schließen: die Muskelkraft, weil ja die Ausgangsstellung eine geschlossene ist, und der Unterdruck, der durch die strömende Luft entsteht (Bernoulli Effekt). In der Abb. 1a ist ersichtlich, dass die Stimmlippen etwa die Hälfte der Zeit geschlossen sind. Aus der Frequenz des Öffnens ergibt sich die Tonhöhe des Klangs. In Abb. 1b erkennt man, dass neben diesem Grundton viele, relativ starke Obertöne im Klang enthalten sind.

Der Klang strömt durch den Mundraum und wird durch diesen maßgeblich modifiziert. Der Raum zwischen Stimmlippen und Lippen besitzt, genau wie jeder Hohlkörper, eigene akustische Resonanzen. Die Frequenzen dieser Resonanzen hängen primär von der Größe des Hohlraums ab, die Tonhöhe einer Flöte wird z. B. in erster Linie durch ihre Länge bestimmt. Aber auch die Form des Hohlraums, z. B. Verengungen an bestimmten Stellen, beeinflussen die Resonanzen. In Abb. 1c sind die ersten drei Resonanzen des Mundraums gezeigt, die Formanten genannt werden.

Aus der Wechselwirkung von Stimmlippenklang und Mundresonanz resultiert der ausgesandte Schall (Abb. 1d), in grafischer Sicht eine Überlagerung von Abb. 1b und 1c: Der Grundton bestimmt weiter die Tonhöhe, die Formanten modifizieren die Obertöne. Wesentlich für die Artikulation einer Sprache ist, dass die Formanten durch unterschiedliche Mund- besonders Zungenstellungen beeinflusst werden können. In Abb. 2 ist der Mundraum bei der Bildung der fünf Vokale a, e, i, o und u gezeigt. Bei bewusster Artikulation kann man selbst kontrollieren, ob die Abbildungen die eigene Mundstellung wiedergeben. Im oberen Teil der Abbildung sieht man im Sonogramm, wie sich die Mundstellungen bezüglich der Formanten, der dunklen Bereiche im Spektrum, auswirken. Beim „o“ oder „u“ liegen die ersten beiden Formanten bei tiefen Frequenzen eng beisammen, bei „i“ ist der zweite Formant hoch hinaufgerückt.

Die Konsonanten, der zweite Teil einer Wortbildung, entstehen zum Großteil durch das Hindurchströmen von Luft durch Engstellen, was physikalisch zu einem Rauschen führt. Bei den stimmlosen Konsonanten „f“, „s“, „sch“ sind dies Strömungsgeräusche durch Engstellen im vorderen Teil des Mundes. „p“, „t“ und „k“ werden Plosivlaute genannt, weil



**Abbildung 2:** Mundstellungen und Sonogramme bei Erzeugung der verschiedenen Vokale der deutschen Sprache (aus [2]).

Luft an unterschiedlichen Stellen angestaut und dann plötzlich, knallartig freigegeben wird. Bei den stimmhaften Konsonanten „b“, „d“, „g“ kommt ein Stimmklang hinzu. Und Halbvokale, wie „r“, „l“, „n“, „m“ haben überhaupt einen vokalähnlichen Klangcharakter, diesen kann auch eine Tonhöhe zugeordnet werden [2].

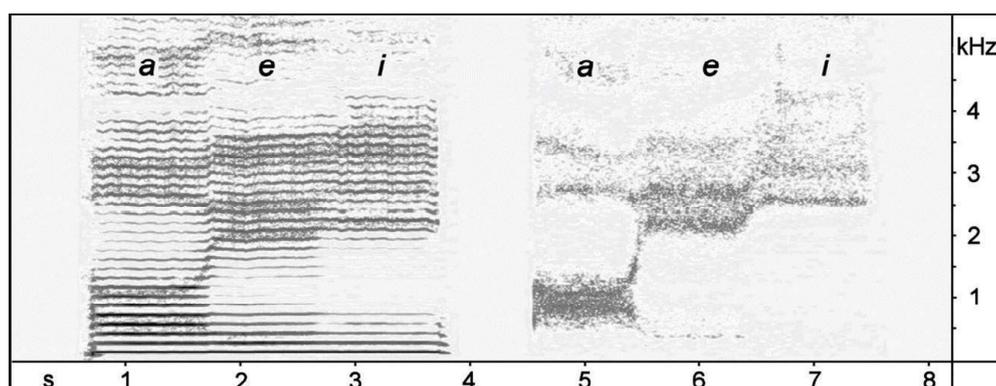
Beim Flüstern kann, wie bei stimmlosen Konsonanten, keine Tonhöhe festgestellt werden. Die Stimmlippen sind nie vollständig geschlossen, die durchströmende Luft erzeugt lediglich ein Rauschen. Die Umformung durch den Mundraum, das heißt die Bildung der Formanten, besteht aber weiterhin (Abb. 3), womit auch ein geflüsterter Text verständlich ist. Das Flüstern bildet keine natürliche Form der Stimmgebung und sollte über einen längeren Zeitraum vermieden werden, da es stimmschädigend sein kann.

## 1.2 Die Stimme bricht

Im Schulunterricht kann das Phänomen des Stimmbruchs häufig beobachtet werden. Die Stimme von jungen Burschen hüpf manchmal unkontrollierbar zwischen hoch und tief. Woran liegt dies?

Bei Buben wird in der Pubertät vermehrt das Hormon Testosteron erzeugt, welches unter anderem ein Wachstum des Kehlkopfs bewirkt. Besonders stark entwickelt sich der vordere Teil, der Schildknorpel, nach vorne, was beim erwachsenen Mann als Adamsapfel erkennbar ist. Damit müssen sich jedoch auch die Stimmlippen verlängern, was letztlich zu einer Absenkung der Tonlage um etwa eine Oktave führt. Auch Mädchen erfahren eine Mutation, die jedoch früher und unauffälliger mit einer geringeren Änderung der Tonlage verläuft.

Der Stimmapparat ist ein komplexes Gebilde, ein Zusammenspiel von Stimmlippen, umgebenden Muskeln und neuronaler Steuerung. Dieses System ist auf den kindlichen Kehlkopf abgestimmt. Die Verlängerung der Stimmlippen bedeutet eine gravierende Änderung und diese benötigt bei Knaben etwa ein Jahr. Aber ihre endgültige Ausprägung erfährt die Stimme erst in einer mehrjährigen Postmutationsphase. Danach können etwa Stimmgattungen, wie Tenor oder Bass, endgültig zugeordnet werden. Es ist interessant, dass Soprane unter den Knabenstimmen häufig zu Bässen, Altstimmen dagegen zu Tenören mutieren [1].



**Abbildung 3:** Die Vokale a, e und i einmal gesprochen bzw. geflüstert (aus [2]).

### 1.3 Warum können Affen nicht sprechen?

Die Evolution der Stimme und damit einer komplexen Kommunikation bildeten einen Meilenstein in unserer Entwicklung. Für René Descartes war die Seele die Basis der Sprache und nur der Mensch besitzt beides. Dennoch war es über lange Zeit ein Rätsel, warum unsere nächsten tierischen Verwandten, die Affen, keine ähnliche Kommunikation entwickelt haben, denn anatomisch sind im Kehlkopf kaum Unterschiede erkennbar [3]. Fürs erste meinte man, dass das Steuerungssystem, das Gehirn, zu wenig entwickelt sei für einen derart komplexen Vorgang. Inzwischen hat sich gezeigt, dass der Unterschied dann doch im Anatomischen liegt. Bei den Affen liegt der Kehlkopf relativ hoch im Hals, was den Vorteil hat, dass Atmen und Fressen in getrennten Kanälen passieren. Bei Menschen sinkt der Kehlkopf in den ersten Lebensmonaten und -jahren nach unten. Dies bringt zwei Vorteile: Beim Baby, in den ersten Lebensmonaten, ermöglicht ein hoher Kehlkopf, dass Atmen und Trinken gleichzeitig möglich sind. Das Baby kann ohne Unterbrechungen nuckeln und durch die Nase atmen. Danach sinkt der Kehlkopf so tief, dass sich darüber ein zusätzlicher Hohlraum bildet. Und diese Erweiterung ist ausschlaggebend, dass die verschiedenen Vokale erzeugt werden können. Wobei sich allerdings der Nachteil ergibt, dass sich Luft- und Esskanal kreuzen und dass man sich – im schlimmsten Fall tödlich – verschlucken kann.

Obwohl es Untersuchungen gibt, dass Affen anatomisch zu einer etwas variablen Lautbildung fähig wären, haben sie eine solche nicht entwickelt. Damit stellt sich die Frage, wann der Mensch sprechen lernte? Konnte der Neandertaler bereits so kommunizieren wie wir heute?

Diese Frage war nicht leicht zu beantworten, weil der Kehlkopf aus einem knorpeligen Gewebe besteht, das in fossilen Resten nicht erhalten geblieben ist. Dennoch ergab sich, wenn auch auf Umwegen, eine Antwort auf die obige Frage: Das Absenken des Kehlkopfs, welches zur Entwicklung einer Artikulation notwendig ist, bedingt eine stärkere Aufhängung an den Knochen des Unterkiefers. Dies wurde durch eine Ausbuchtung des Unterkiefers nach unten ermöglicht, womit sich eine größere Fläche bildete, an der die Muskeln angreifen konnten. Ein solcher Höcker wurde beim *Homo erectus* (etwa vor 400 000 Jahren) noch nicht festgestellt. Beim *Homo sapiens* und auch beim Neandertaler (vor etwa 100 000 Jahren) zeigten sich Ansätze des Höckers, sodass davon auszugehen ist, dass eine sprachliche Kommunikation vorhanden war. Beim Cro-Magnon Menschen (30 000 Jahre vor unserer Zeitrechnung) war die volle Sprachfähigkeit gegeben.

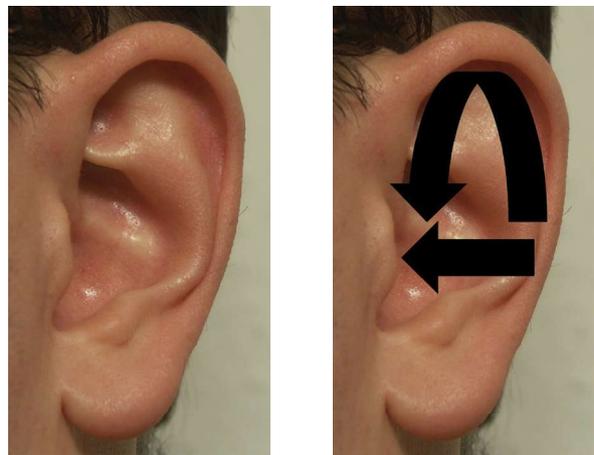
## 2. Das Ohr

### 2.1 Richtungshören

Wenn auch der Philosoph Zenon meinte, dass wir zwei Ohren besitzen, um genauer hinzuhören, ist der Grund ein anderer. Durch beide Ohren sind wir fähig, die Richtung festzustellen, aus der ein Schall kommt. Dazu tragen zwei Effekte bei:

Einerseits wird der Schall von einer Seite durch den Kopf abgeschirmt. Damit dringt er auf einer Seite leiser an das Ohr als an der anderen Seite. Zweitens gelangt der Schall schneller an das der Schallquelle zugeneigte Ohr als an das andere. Der Zeitunterschied ist sehr gering, etwa 0,1 ms. Allerdings kann ein solcher nachvollziehbar wahrgenommen werden, wie folgendes bekannte Experiment zeigt: Man verbindet beide Ohren mit einem Gummischlauch, der hinter dem Kopf verläuft. Klopfte eine zweite Person mit einem Gegenstand auf den Schlauch, so kann sehr deutlich entschieden werden, ob der Schlag rechts oder links der Mitte erfolgt ist.

Das Außenohr ist aber noch zu weiteren Meisterleistungen fähig. Haben sie sich schon einmal gefragt, warum die Ohrmuschel so aussieht, wie wir sie kennen, mit einem eingerollten Rand und Unebenheiten? Charles Darwin hat gemeint, dass die Form der Ohrmuschel vollkommen ohne Sinn sei – der große Naturforscher hat sich jedoch geirrt.



**Abbildung 4:** Ohrmuschel und die zwei Wege des ankommenden Schalls. (aus: Wikimedia commons, Autor Peter Niemayer)

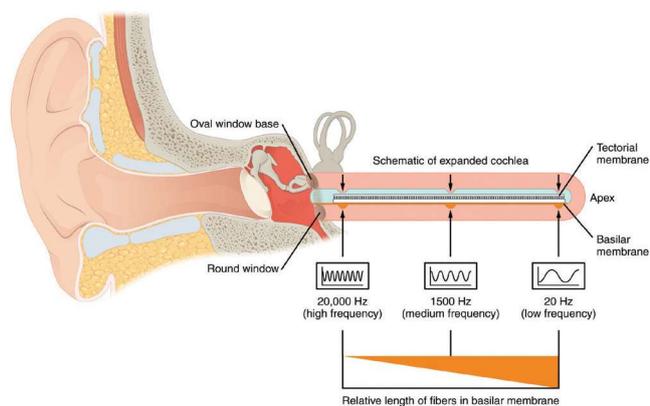
Aufgrund der Gestaltung der Muschel gelangt der ankommende Schall auf zwei Wegen ans Trommelfell (Abb. 4): Einerseits direkt durch die Öffnung; andererseits wird der Schall am inneren Rand des Ohrs herumgeleitet und gelangt dann in die Ohröffnung. Dies wurde experimentell gezeigt: Ein ans Ohr gelangter Klicklaut erzeugte im Innenohr zwei zeitlich getrennte Reaktionen. Der Zeitunterschied beträgt etwa 0,2 ms. Dieser hängt jedoch von der Neigung des Ohrs ab und damit kann eine vertikale Ortung des Schalls erfolgen, eine Feststellung, ob der Schall von oben oder unten kommt [4].

### 2.2 Schallwandlung im Ohr

In der Folge regt der Schall das Trommelfell zu Schwingungen an. Beim leisesten Geräusch, das noch wahrgenommen werden kann, bewegt sich das Trommelfell lediglich einige Pikometer ( $10^{-12}$  m), das ist geringer als der Durchmesser eines Wasserstoffatoms!

Die Schwingungen des Trommelfells werden im Mittelohr über die drei kleinsten Knöchelchen des Körpers, Hammer, Amboss

und Steigbügel, ans Innenohr weitergegeben (Abb. 5). Welchen Zweck erfüllt dieses komplizierte Übertragungssystem? Zum einen wirken die drei Knochen wie ein mechanischer Hebel, wobei eine Kraftverstärkung von etwa 30 - 50 % erzielt wird. Aufgrund der Größenunterschiede der beteiligten Flächen am Trommelfell und dem Steigbügel ergibt sich ein Verstärkungsfaktor von 15 - 20. Letztlich wird mit den drei Knöchelchen eine weitere Schwierigkeit überwunden: Der Schall soll ins Innenohr übertragen werden, das jedoch von einer Flüssigkeit erfüllt ist. Die Übertragung einer Schallwelle auf eine Flüssigkeit erfolgt jedoch relativ ineffektiv, der meiste Schall wird reflektiert. Wenn die Flüssigkeit des Innenohrs jedoch mechanisch durch den Stempel des Steigbügels erregt wird, wird der Schall um einen Faktor drei besser übertragen, als wenn es direkt geschähe.



**Abbildung 5:** Querschnitt durch das Ohr, die Cochlea ist ausgerollt dargestellt. (aus: Wikimedia commons, Autor OpenStax)

Über die Membran eines ovalen Fensters werden die Schwingungen durch den Steigbügel auf den Innenraum der Cochlea übertragen. Diese ähnelt einer bohnen großen Schnecke mit zweieinhalb Windungen, der Innenraum ist zusätzlich durch eine Basilarmembran unterteilt. Der Schall gelangt auf der oberen Hälfte der Windungen bis zum Ende, gelangt über das Schneckenloch in die untere Hälfte, wo am Ende am runden Fenster ein Druckausgleich erfolgt. In Abb. 5 ist die Schnecke aufgerollt dargestellt.

### 2.3 Frequenzauflösung im Innenohr

Es ist klar, dass die Basilarmembran wesentlich für die Informationsverarbeitung sein muss, denn die darauf befindlichen Sinneshörchen sind über Nerven letztendlich mit dem Gehirn verbunden. Wie die verschiedenen Frequenzen eines Schalls aufgelöst werden, hatte man sich vorerst dergestalt vorgestellt: Die Sinneshörchen haben unterschiedliche Größe und Steifheit und werden von Schallwellen unterschiedlicher Frequenz verschieden stark angeregt. Diese Idee zeigte sich jedoch als falsch, die Hörchen unterscheiden sich nicht in diesem Sinne.

Die Frequenzauflösung findet über die Eigenschaft der Basilarmembran selbst statt. Diese ist am Beginn etwa 0,04 mm dick,

3 mm schmal und steif; am äußeren Ende wird sie 0,5 mm dick, 7 mm breit und schlaff. Wird durch den Steigbügel über das ovale Fenster eine Schwingung auf die Flüssigkeit übertragen, so bewirkt die Inkompressibilität der Flüssigkeit, dass die Basilarmembran zu schwingen beginnt. Diese Schwingungen setzen sich als sogenannte Wanderwellen in der Basilarmembran fort. Aufgrund der unterschiedlichen Dicke und Steifheit der Basilarmembran ist diese Wanderwelle für einzelne Frequenzen der Schwingungen unterschiedlich stark ausgeprägt – beim ovalen Fenster am stärksten für die hohen Frequenzen, an der Spitze der Cochlea für die tiefen (Abb. 5). Diese Theorie der Wanderwellen ist erst in der zweiten Hälfte des vorigen Jahrhunderts vom Ungarn Georg von Békésy entdeckt worden, er erhielt dafür 1961 den Nobelpreis für Medizin. Die Auflösung verschiedener Frequenzen wurde durch dieses System in eine Ortsauflösung übergeführt: Der Stelle, an der die Hörchen am stärksten schwingen, wird eine bestimmte Frequenz zugeordnet.

Vielleicht sollte noch erwähnt werden, wie die Erregungen der Nervenzellen vor sich gehen. Die Sinneshörchen sind in Büscheln an der Basilarmembran angeordnet. Bewegt sich die Membran, so neigen sich die Büschel zu Seite. Dabei werden durch ein mechanisches System Ionenkanäle geöffnet und der Ladungsunterschied wird als Aktionspotential weitergeleitet. Warum geschieht dies mechanisch, durch eine starre Verbindung, und nicht chemisch wie bei den Sinneszellen im Auge? Weil eine chemische Reaktion viel zu langsam vor sich gehen würde, um die hohe Zeitfolge von Schallsignalen verarbeiten zu können, eine starre Verbindung kann Energie rascher weiterleiten.

### 2.4 Aktives Ohr

Allerdings hat sich herausgestellt, dass das vorhin Gesagte nicht die ganze Wahrheit sein kann. Die Ortsauflösung ist viel zu ungenau, um Frequenzen in dem Maße unterscheiden zu können, wie wir dies vermögen. Man hat darum nach mindestens einem weiteren Filtersystem gesucht, etwa auch einer Zeitauflösung der Wanderwelle. Die Antwort kam jedoch von ganz anderer Seite: Man hat herausgefunden, dass es zwei Arten von Haarzellen gibt, sogenannte äußere und innere Haarzellen. Die inneren Haarzellen funktionieren so, wie ich es vorhin besprochen habe. Die äußeren Haarzellen haben aber Aktin eingelagert, das ist die Substanz, die bei Muskelkontraktionen wichtig ist. Die äußeren Haarzellen können sich tatsächlich um etwa 10 % ihrer Länge verändern. Außerdem haben die äußeren Haarzellen Zuleitungen, Information kommt vom Gehirn zu diesen Zellen und regt eine Kontraktion an. Die Wichtigkeit dieser äußeren Zellen erkennt man darin, dass es im Ohr etwa 4 000 innere und 12 000 äußere Haarzellen gibt.

Dass das Ohr „aktiv“ ist, wurde experimentell dadurch ermittelt, dass man ein ganz feines Mikrophon außen an das Ohr heranbrachte und Töne registrieren konnte, die von innen kamen! Der Weg, den ich oben besprochen habe

(Schall → Trommelfell → Gehörknöchelchen → ovales Fenster → Basilmembranschwingungen → Bewegung der Haarzellen → Information ans Gehirn), geht genau umgekehrt vor sich. Die Härchen bewegen sich auf Befehl des Gehirns aktiv und versetzen damit auch die Basilmembran in Schwingungen. Diese Wellen gelangen über das ovale Fenster zu den Gehörknöchelchen, die ihrerseits das Trommelfell zum Schwingen bringen. Eine schwingende Membran erzeugt einen sich ausbreitenden Schall.

Wodurch bewirkt dieses aktive Ohr eine bessere Frequenzauflösung? Nehmen wir an, eine Stelle des Ohrs schwingt bereits ein bisschen und sodann kommt genau dieselbe Schwingung als äußerer Reiz hinzu – dies schaukelt den Effekt stark auf und der ausgelöste Reiz wird um Einiges größer. Damit stellt sich aber die Frage: Wie kann das Ohr wissen, was kommen wird, um darauf einzuschwingen? Ein Klang besitzt ein bestimmtes Muster an Frequenzen und dementsprechend ein bestimmtes Muster bezüglich der Orte, die angeregt werden. Wenn erwartet, antizipiert wird, dass ein bestimmtes Geräusch kommt, so werden die entsprechenden Regionen aktiviert und der Klang kann leichter erkannt werden. Wenn ein Saxophonspieler sein Instrument zum Mund führt, wird höchstwahrscheinlich ein

Saxophonklang ans Ohr gelangen. Bestimmte Muster sind besonders manifest gespeichert, z. B. die Stimme der eigenen Kinder. Eine solche wird sofort erkannt, auch wenn sie nur sehr schwach ans Ohr dringt oder Teil eines Stimmengewirrs ist [5].

Sowohl Stimme als auch Ohr sind dem Leben des Menschen in der Gesellschaft extrem gut angepasst. Wissenschaftlich herausfordernder war, die exakten Grundlagen des Gehörs zu erforschen, wobei einige Fragen immer noch ungeklärt sind, z. B. sind die Ursachen des Tinnitus bis jetzt nicht genau ergründet. Andererseits lassen die bisherigen Kenntnisse Cochleaimplantate zu entwickeln, die bereits sehr kleinen, tauben Kindern ein Hören ermöglichen.

Ich hoffe, dass diese Anmerkungen zu unserem wichtigsten Kommunikationssystem Ihr Interesse gefunden und vielleicht auch angeregt haben, diesem Thema im Unterricht mehr Raum zu geben.

---

Leopold Mathelitsch *Institut für Physik,*  
*Karl-Franzens-Universität Graz*

## Literatur

- [1] L. Mathelitsch, G. Friedrich: *Die Stimme*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1995.
- [2] L. Mathelitsch, I. Verovnik: *Akustische Phänomene*, Aulis Verlag Deubner, Köln, 2004.
- [3] N. Paschek: *Das verborgene Sprachtalent der Affen*, Spektrum der Wissenschaft, Oktober, 2017, S. 28.
- [4] J. M. Burchard: *Neues zur akustischen Funktion der Ohrmuschel*, Spektrum der Wissenschaft, April 1997, S.23.
- [5] N. Sieroka, St. Uppenkamp: *Paradoxien beim Hören*, Physik in unserer Zeit 53, Jänner 2022, S. 28.

## Anhang: Akustische Grundlagen und Darstellungsweisen

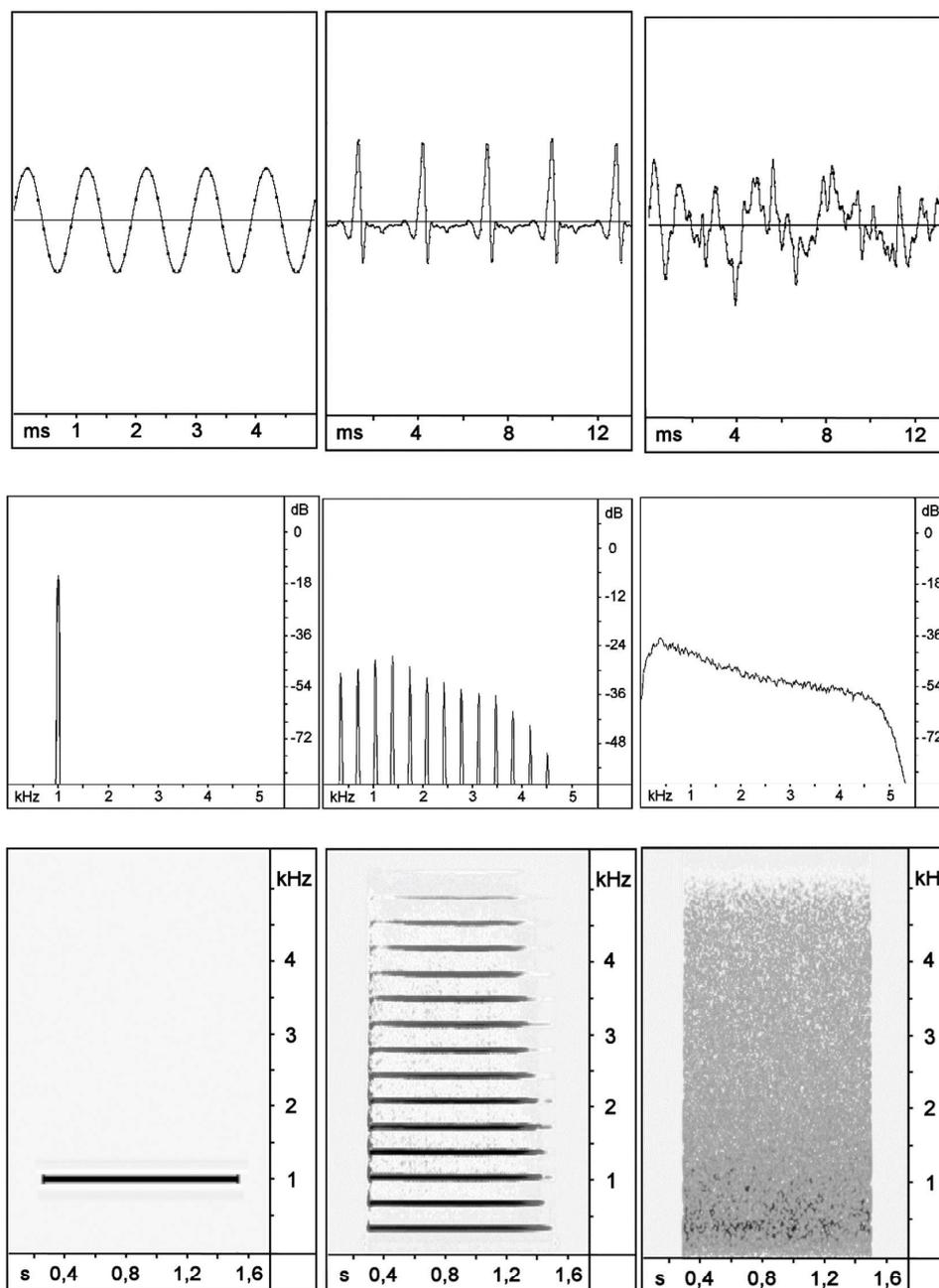
Zur Erklärung von Charakteristika der menschlichen Stimme ist, genau wie für andere Schallgeräte, eine Unterscheidung der Begriffe Ton, Klang und Geräusch wichtig. Es bieten sich mehrere Möglichkeiten einer grafischen Darstellung an, jede stellt andere Aspekte in den Vordergrund.

Die erste Ebene wird häufig Wellendarstellung genannt. Bei einem Ton kann die gleichmäßige Auslenkung einer Saite oder einer Membran mit dieser Wellenform intuitiv nachvollzogen werden. Aufgenommen und gezeigt werden jedoch meist Druckschwankungen. Bei einem Klang liegt das Charakteristische in der Periodizität einer komplexen Wellenform, wohingegen bei einem Geräusch keinerlei Regelmäßigkeit auftritt.

Den regelmäßigen Schwingungen eines Tons kann eindeutig eine Frequenz als Anzahl dieser Schwingungen pro Sekunde zugeordnet werden, was in dem Frequenzdiagramm in der

zweiten Ebene gezeigt ist. Die Eigenschaften eines Tons umfassen nur seine Frequenz (Tonhöhe) und seine Intensität (Lautstärke). Daraus kann z. B. nicht auf den Ursprung des Tons, ob durch eine Pflöfe oder ein Musikinstrument erzeugt, geschlossen werden.

Warum die periodische Wellenform eines Klangs zu dem gezeigten kammförmigen Frequenzspektrum führt, ist weniger verständlich. Aus der Periodizität ergibt sich wiederum eindeutig eine Frequenz, die als unterster Teil des Spektrums aufscheint. Dieser Grundton bestimmt die Tonhöhe des Klangs. Die weitere Aufspaltung in Vielfache der Grundfrequenz kann am ehesten in Umkehrrichtung gezeigt werden: Man überlagert mehrere Wellenformen von Tönen mit ganzzahligem Frequenzverhältnis und erhält als Ergebnis periodische Muster. Die relativen Intensitäten der Obertöne eines Klangs geben Kenntnis über seine Erzeugung und führen dazu, dass wir einen Klavierklang von dem einer Trompete unterscheiden können.



**Abbildung A1:** Ton (linke Spalte), Klang (Mitte) und Geräusch (rechte Spalte) in drei Darstellungen: Wellenform (in relativen Einheiten, oberste Reihe), Frequenzspektrum (mittlere Reihe), Sonogramm (unterste Reihe).

Für ein Geräusch ist eine solche Aufspaltung nicht möglich, ein Rauschen enthält sämtliche Frequenzen. Dennoch kann man verschiedene Arten von Rauschen unterscheiden, die farbige Namen tragen (weißes, rosa, blaues Rauschen). Dabei ist entweder der nieder- oder hochfrequente Anteil stärker ausgeprägt.

Ein Sonogramm als dritte Ebene enthält eigentlich keine neuen Informationen, da die Frequenzanalyse lediglich auf die vertikale Achse gelegt ist. Damit ist aber die horizontale Achse frei für die zeitliche Entwicklung. Dadurch ist diese Darstellung anschaulicher und realitätsnäher als die abstrakte Frequenzanalyse der zweiten Ebene.

Die drei Möglichkeiten sind auch die Darstellungsformen diverser elektronischer Programme. Manche mobilen Geräte haben bereits ein Frequenzanalyseprogramm implementiert bzw. kann eine App installiert werden. Damit können nicht nur Eigenschaften einer Stimme von den Schülerinnen und Schülern selbstständig nachvollzogen werden, es öffnet Raum für kreative Vorschläge und Projekte. Von der Sprech- kann auf die Singstimme übergegangen werden und Tierstimmen bilden vielfältige und spannende Untersuchungsmaterialien.

#### Programme zur Klanganalyse

<http://audacity.sourceforge.net>  
<https://phyphox.org/de/home-de/>  
<https://www.sonicvisualiser.org/>  
<https://spectroid.de.aptoide.com/app>

# Wie hören wir?

## Ein physikalischer Lernpfad zum Thema Hören

Michael Schwarzer, Peter Schleich und Aniketa Seelos-Prock

### 1. Einleitung

Der menschliche Hörvorgang wird in Biologie ausführlich behandelt, in Physik dagegen kann in der Sekundarstufe 2 die Schallwelle in der Akustik auch ohne Bezug zum Ohr besprochen werden, denn der Lehrplan sieht diese Verknüpfung nicht explizit vor [1]. Die in diesem Beitrag vorgestellte Unterrichtssequenz mitsamt den zur Verfügung gestellten Materialien möchte diese Lücke schließen. Damit wird eine vertiefende Behandlung der Schallwelle, der Resonanz und anderer akustischer Phänomene in Physik ermöglicht. Fragen wie „Warum haben wir zwei Ohren?“ oder „Warum können wir die Tonhöhe unterscheiden?“ werden in diesem Lernpfad beantwortet. Das gesamte Paket eignet sich auch besonders gut für den Einsatz in einem Wahlpflichtfach oder für fächerübergreifenden Unterricht.

Die entwickelte Unterrichtssequenz (Abb. 1) besteht aus vier Teilen. In den ersten drei Teilen arbeiten die Schüler\*innen mit „Switch on Life“, einer von der Firma MED-EL erstellten Online-Lernplattform mit Videos und interaktiven Lernspielen, die viele verschiedene Aspekte von Hörverlust und Hörtechnologie in einfacher englischer Sprache behandelt. Man lernt, wie ein Konzert klingt, wenn man nur die hohen Töne hört und wie viel man versteht, wenn man auf einem Ohr taub ist. Der vierte Teil, „Essentials of Hearing“, basiert auf einem funktionsfähigen mechanischen Holzmodell, mit dem die Schallwelle sowie das Mittel- und Innenohr modellhaft dargestellt werden. Für diesen Teil des Lernpfades stehen den Schüler\*innen stumme Videofilme zur Verfügung, mit denen sie kreativ arbeiten sollen. [2]

### 2. Grundidee – Projektverlauf

Der ursprüngliche Plan der Projektteilnehmer\*innen der Firma MED-EL und der Pädagogischen Hochschule Tirol (PHT) war es, einen Hörkoffer für die Primarstufe zu gestalten, mit

dem die Schüler\*innen den Hörvorgang spielerisch erforschen können.

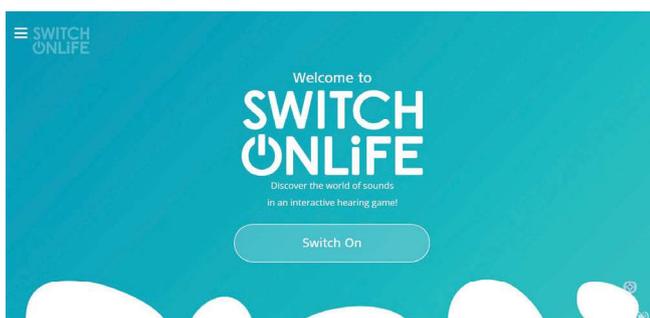
Als Kernstück des geplanten Koffers wurde ein mechanisches Holzmodell entwickelt, das den gesamten Hörvorgang von der Schallwelle bis zum Innenohr veranschaulicht (Abb.2). Dabei überträgt eine durch Antippen angeregte Magnetpendelkette (A) Schwingungen über das Trommelfell (B) durch das Mittelohr (C) ins Innenohr (D). Dort werden die als Pendel mit unterschiedlicher Länge modellierten Nervenzellen in Abhängigkeit von der Frequenz angeregt. Das Modell funktioniert und wurde in der Primarstufe bereits eingesetzt. Da das Holzmodell für die ursprünglich geplante Vervielfältigung nicht stabil genug und zu teuer ist, entstand während der Coronapandemie die Idee der Verbreitung des Konzepts als Online-Lernpfad. Daraus entwickelte sich eine vierstufige Unterrichtssequenz für die Sekundarstufe 2, die in der Eduthek unter „Wie hören wir?“ zu finden ist [3].



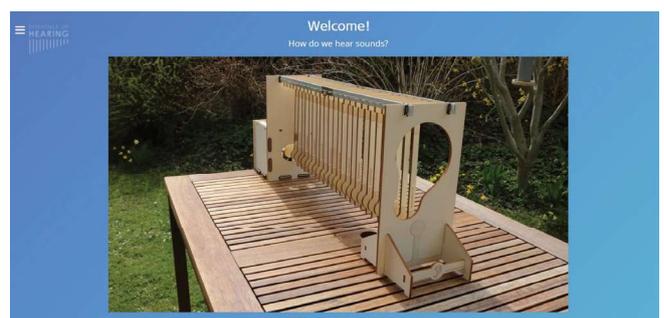
**Abbildung 2:** Das Holzmodell im Überblick. Der Schallimpuls wird von der Magnetpendelkette (A) auf das Trommelfell (B) und Mittelohr (C) in das Innenohr (D) übertragen.

#### 2.1 Das Holzmodell

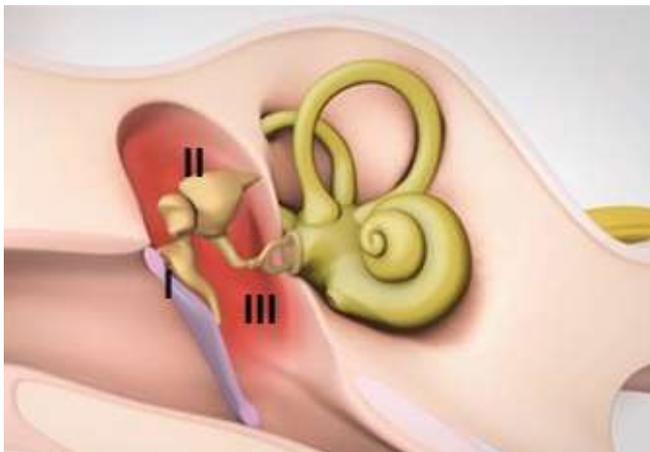
Das letzte Pendel der als Magnetpendelkette modellierten Schallwelle setzt eine Holzplatte (Trommelfell) in Be-



**Abbildung 1:** Startbildschirme von Switch on Life und Essentials of hearing



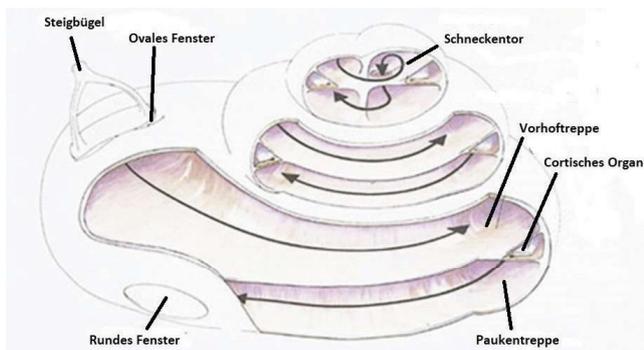
wegung. Im Mittelohr (Abb. 3) befinden sich die winzigen Gehörknöchelchen, die das Außenohr mit dem Innenohr verbinden. Mit dem Trommelfell ist der Griff des Hammers (I) verwachsen. Der Hammer ist gelenkig mit dem Amboss (II)



**Abbildung 3:** Das Mittelohr



**Abbildung 4:** Das Mittelohr im Modell



**Abbildung 5:** Die Cochlea



**Abbildung 6:** Die Bewegung des Trommelfells versetzt die Nervenzellen in der Cochlear in Schwingung

verbunden, der wiederum mit dem Steigbügel (III) in Kontakt steht. Der Steigbügel ist mit seiner Fußplatte in das ovale Fenster des Innenohrs eingepasst. Die Gehörknöchelchen bilden ein Hebelsystem, das die Schwingungen des Trommelfells mechanisch auf das Innenohr überträgt. Im Modell (Abb. 4) bestehen die Gehörknöchelchen aus beweglich aufgehängten Holzteilen. Es gibt kein ovales Fenster. Der Steigbügel wurde über das Mittelohr hinaus verlängert und überträgt die Schwingung direkt auf ein Seil.

Im Innenohr befindet sich die Hörschnecke (Abb. 5), ein schneckenförmiger Hohlraum mit zweieinhalb Windungen (lateinisch Cochlea, Schnecke). Die Basis der Hörschnecke grenzt an das ovale Fenster. Hinter dem ovalen Fenster liegt die Vorhoftrappe, diese geht an der Spitze der Schnecke über das Schneckenloch in die Paukentreppe über. Beide bilden also einen zusammenhängenden Kanal, der entlang der Schnecke durch die Basilarmembran getrennt ist. Tritt der Schall in das Innenohr ein, erzeugt er dort eine Welle – eine Auslenkung der Basilarmembran und den darauf liegenden Sinneszellen - die durch das Innenohr wandert. Die Schwingungseigenschaften der Basilarmembran ändern sich in Abhängigkeit vom Abstand zum ovalen Fenster. In der Nähe des ovalen Fensters ist die Basilarmembran steif und schmaler und deshalb empfindlich für hohe Frequenzen, in der Nähe der Schnecken Spitze ist sie nachgiebig und breiter und empfindlich für niedrige Frequenzen. Im Holzmodell (Abb.6) überträgt der Steigbügel die Schwingung auf ein Seil. Über dieses Seil läuft dann die Welle durch die „Cochlea“. Das Seil simuliert die Wassersäule, die Pendelkörper die Basilarmembran und die äußeren Haarzellen. Die unterschiedlich langen Pendelkörper beginnen zu schwingen, wenn ihre Eigenfrequenz mit der Erregerfrequenz übereinstimmt.

## 2.2 Der Lernpfad

Die gesamte Unterrichtssequenz besteht aus vier Übungen und dauert insgesamt maximal sechs Unterrichtseinheiten. In den ersten drei Teilen (Switch on Life) arbeiten die Schüler\*innen selbstständig am Computer, im vierten Teil (Essentials of Hearing) sollen die Schüler\*innen Videos, die Teile des Holzmodells in Funktion zeigen, in Gruppen vertonen. Die Teile können als Gesamtpaket oder einzeln eingesetzt werden.

Im ersten Abschnitt „Hören mit zwei Ohren“ wird ein Gruppengespräch in einem lauten Restaurant simuliert. Die Schüler\*innen, die mit Ohrsteckern/Kopfhörern arbeiten, werden aufgefordert, Geräuschquellen zu lokalisieren und Fragen zum Inhalt des Gesprächs zu beantworten. So können sie testen, wie viel man von einem Gespräch mit nur einem Ohr verstehen kann. Anschließend erklärt der amerikanische Hör- und Sprachwissenschaftler Prof. Michael Dorman in einem professionellen Audiolabor den physikalischen Hintergrund.

Im zweiten Abschnitt „Hohe, tiefe Töne“ kann man in verschiedenen Hörsituationen (Wald, Konzert und Party) tiefe,

mittlere oder hohe Frequenzen auswählen. Dadurch bekommen die Schüler\*innen einen Eindruck, was es bedeutet, wenn man nicht (mehr) alle Frequenzen hören kann. Der belgische HNO-Chirurg Prof. Paul van de Heyning erklärt im Anschluss, welche Rolle Töne und Frequenzen beim natürlichen Hören spielen. Danach können die Schüler\*innen mit Hilfe der „Magic Curtains“ selbst das Spektrum der gehörten Töne verändern und erfahren spielerisch, welche Frequenzen einen Wasserfall kraftvoll klingen lassen oder welcher Frequenzbereich am wichtigsten ist, um Gespräche zu verstehen.

Der dritte Abschnitt „Cochlea-Implantat“ verbindet das bereits Gelernte mit der menschlichen Anatomie. Die Schüler\*innen erfahren, in welchen Bereichen der Cochlea welche Töne wahrgenommen werden. Die Frequenzwahrnehmung in der Cochlea wird mit der Anordnung der Cochlea-Implantat-Elektroden verknüpft. Mozarts „Eine Kleine Nachtmusik“ kann mit verschiedenen Kombinationen von Elektrodenlängen und -positionen gehört werden. Wie der Rhythmus der Elektrostimulation mit der wahrgenommenen Tonhöhe zusammenhängt, wird in einer „sportlichen“ Analogie erarbeitet.

Selbst kreativ werden können die Schüler\*innen im vierten und letzten Teil des Lernpfads. Der als Gruppenarbeit organisierte Teil „Essentials of Hearing“ basiert auf dem bereits beschriebenen Holzmodell. Fünf stumme Videos zeigen jeweils einen Teil des Hörvorgangs am Modell. Die Schüler\*innen werden in Gruppen geteilt und erhalten den Arbeitsauftrag, eines dieser Videos zu vertonen. Sobald die Schüler\*innen ausreichende Informationen im Internet gesammelt haben, sollen sie ihre Kreativität aktivieren und den anderen Gruppen den Inhalt des Videos anschaulich erklären. Didaktische und technische Hilfestellung für Lehrer\*innen findet man im Internet ([4],[5]).

### 3. Evaluation

Der gesamte Lernpfad wurde an mehreren Schulen in Tirol erprobt und evaluiert. Der erste Testlauf fand im Rahmen des schulautonomen Wahlpflichtfachs Medizin statt. Die insgesamt zehn Schüler\*innen hatten vier Unterrichtsstunden Zeit, um die gesamte Sequenz zu bearbeiten. Mitten in einem Coronalockdown wurde zusätzlich ein virtueller Besuch im Audioversum in Innsbruck [6] organisiert, bei dem noch offenen Fragen geklärt werden konnten.

Für die Evaluierung wurden vor und nach dem Unterricht Interviews geführt. Dabei wurde einerseits Faktenwissen abgefragt (Wie ist das Ohr aufgebaut?) und andererseits das Verständnis ermittelt (Wie kommt der Schall ins Ohr?). Die

Interviews vor dem Unterricht zeigten große Schwächen im Verständnis des Hörvorgangs, unabhängig davon, wann die Akustik in Biologie oder Physik besprochen wurde. Zusätzlich füllten Schüler\*innen des Wahlpflichtfachs und Mitschüler\*innen, die nicht das WPF besuchten, 6 Monate später einen Fragebogen aus. Die Auswertung des Fragebogens und der Interviews zeigten, dass WPF-Schüler\*innen die Teile des Ohres in ihrer Funktion besser beschreiben und zuordnen und die Bedeutung der beiden Ohren richtig beschreiben können, was in der Vergleichsgruppe niemandem gelungen ist. Der Lehrgang wurde als sehr interessant und spannend wahrgenommen.

In einem zweiten Schritt haben drei Lehrer\*innen, die nicht in die Erstellung der Unterrichtssequenz involviert waren, das Modell in ihren Klassen ausprobiert. Die Evaluation fand wieder mit einem Fragebogen statt. Auch bei diesen Schüler\*innen ist ein verbessertes Verständnis für den Hörvorgang messbar. Große Kreativität bewiesen manche Schüler\*innen bei der Vertonung der stummen Videos. So wurde z. B. ein Video mit einem Rap unterlegt.

Es hat sich gezeigt, dass viele Schüler\*innen mit dem Begriff der Schallwelle Probleme haben. Es fiel ihnen schwer, das Modell der Magnetpendelkette mit der Schallwelle in Verbindung zu bringen. Daniel Schwendinger zeigt in seiner Diplomarbeit, dass auch ältere Schüler\*innen noch nicht in der Lage sind, die Schwingung als Ursache von Schall zu erkennen [7]. Dies sollte bei der Arbeit mit dem Lernpfad berücksichtigt werden.

### 4. Fazit

Die Unterrichtssequenz stellt eine gute Möglichkeit dar, das Thema Hören in Physik umfassend zu behandeln oder in einem fächerübergreifenden Unterricht einzusetzen. Das gesamte Paket bildet eine abgeschlossene Einheit, bei der die Schüler\*innen selbstständig am Computer / Mobilgerät arbeiten und ihr erworbenes Wissen kreativ präsentieren können. Alle Materialien sind auf der Eduthek abrufbar. Beim Einstieg erhalten die Lehrer\*innen direkt alle wichtigen Informationen über den Einsatz im Unterricht. Als Beitrag zur Verbreitung des Konzepts wurde der Lernpfad im Herbst 2022 im Rahmen einer Fortbildung mit dem MED-EL Mitarbeiter und Physiker Dr. Peter Schleich an der PHT vorgestellt.

---

Michael Schwarzer *Pädagogische Hochschule Tirol*  
 Peter Schleich *MED-EL*  
 Aniketa Seelos-Prock *MED-EL*

## Literatur

- [1] Bundesministerium: Lehrpläne der AHS – Fassung 2018 [https://www.bmbwf.gv.at/Themen/schule/schulpraxis/lp/lp\\_ahs.html](https://www.bmbwf.gv.at/Themen/schule/schulpraxis/lp/lp_ahs.html) der AHS (bmbwf.gv.at)
- [2] Essentials of Hearing: Overview. <https://www.essentials-of-hearing.com/overview/the-wooden-ear/wooden-ear-experiments/set-up-overview/3328/>
- [3] Eduthek: Unterrichtsmaterialien für die Sekundarstufe -Physik- Wie hören wir; [https://eduthek.at/resource\\_details?full\\_data=0&resource\\_id=30369559&return\\_url=/resource\\_detailshek](https://eduthek.at/resource_details?full_data=0&resource_id=30369559&return_url=/resource_detailshek)
- [4] Membis-Radaktion: Nachvertonung „Stummer Erklärvideos“, in: mebis – Landesmedienzentrum Bayern, <https://www.mebis.bayern.de/p/63709>
- [5] Philipps Annika: Videos nachvertönen – so klappt's. Chip. [https://praxistipps.chip.de/video-nachvertonen-so-klappt's\\_51711](https://praxistipps.chip.de/video-nachvertonen-so-klappt's_51711) chvertönen - so klappt's - CHIP
- [6] Audioversum – Die akustische Erlebniswelt in Innsbruck. <https://www.audioversum.at/>
- [7] Schwendinger Daniel: Schülervorstellungen zum Thema Schall. Diplomarbeit, Universität Wien. 2017



## Glückwünsche zum Ruhestand

HS-Prof. Mag. Dr. Erich Reichel, Professor für Fachdidaktik der Naturwissenschaften und Technik, ging mit 1.6.2022 in den wohlverdienten Ruhestand. Er zählt zu den Urgesteinen der Fachdidaktik Physik in Österreich, vor allem in Graz und der Steiermark. Wegen seiner Tätigkeit als langjähriger Lehrer, Landesfachkoordinator, Organisator und Referent der Begleitlehrveranstaltungen zum Unterrichtspraktikum, gibt es kaum Lehrkräfte in der Region, die den Namen Erich Reichel nicht kennen. Durch sein über 20-jähriges Wirken in der Aus-, Fort- und Weiterbildung hat er einige Generationen von Lehrkräften mit seiner Begeisterung für Physik motiviert und sein breites physikalisches Wissen an sie weitergegeben. Als Begründer der Fachgruppe Physik innerhalb des IMST-Netzwerks Steiermark und Mitbegründer des Regionalen Fachdidaktikzentrums für Physik (RFDZ Physik oder auch PDG – Physikdidaktik Graz genannt) schuf und gestaltete er für das Fach Physik bedeutsame Strukturen, die bis heute noch eine fruchtbare und tragende Rolle in der Bildungslandschaft haben. Erich Reichel zeichnet vor allem seine Begeisterung für Experimente und seine Vielfältigkeit bzgl. Unterrichtspraxis-Projekten aus. In den letzten Jahren seiner Dienstzeit fokussierte er sich, als Leiter des Zentrums für fachdidaktische Forschung in naturwissenschaftlich technischer Bildung (NATech), auf die Kooperation mit Partnern der Industrie. Erich Reichel setzte sich stets dafür ein, den Lehrkräften Materialien für den Unterricht zu liefern. So ist er u. a. auch Schulbuchautor und arbeitete auch z. B. bei diversen Experimentierheften mit. Bei seinen Experimentierauftritten bspw. im Rahmen seiner Abschiedsvorlesung steckte er das Publikum mit seiner Begeisterung stets an. Das Experimentieren wird er, laut eigener Angabe, auch weiterhin gerne und mit Freude betreiben.



Wir danken dir, lieber Erich, für all das, was du für das Fach Physik in der Steiermark und auch für Österreich geleistet hast und wünschen dir nur das Beste und vor allem Gesundheit für einen reisereichen und wunderbaren Ruhestand.

Im Namen all jener, die auf dem fruchtbaren Boden deiner Arbeit für das Fach Physik derzeit aufbauen,

Ingrid Krumphals *Pädagogische Hochschule Steiermark*

# Reelles und virtuelles Bild: gegensätzliche Begriffe – gleiche Wahrnehmung

Andreas Gumbsch und Ingrid Krumphals

## 1. Einleitung

Den beiden Begriffen *reelles Bild* und *virtuelles Bild* wird im Physikunterricht derzeit oft eine zentrale Rolle eingeräumt. In Schulbüchern werden sie auf dem Gebiet geometrische Optik vielfach standardmäßig verwendet, zumeist im Zuge der Bildkonstruktion bei Spiegel oder Linse eingeführt und als ‚selbstverständliche‘ Bildattribute verwendet. Als praktische Arbeitsbegriffe finden *reelles/virtuelles Bild* auch in der Technik und im Wissenschaftsbetrieb Verwendung, da bei mehrstufigen Abbildungsvorgängen am Ende immer ein reelles Bild das Ziel ist, welches von Sensoren aufgefangen oder auf der Netzhaut des betrachtenden Auges von Sinneszellen erfasst werden kann. [1]

Vor diesem Hintergrund fallen zwei Umstände auf: In Schulbüchern wie auch in Fachbüchern sind uneinheitliche und teilweise fachlich problematische Darstellungen und Erklärungen der Begriffe *reelles/virtuelles Bild* zu finden [1, 2]. Weiters können die beiden Begriffe Verständnisschwierigkeiten bei den Lernenden bereiten, vielfach werden ihnen wenig zielführende Bedeutungen zugeschrieben; die Lernendenvorstellung vom virtuellen Bild als ‚Trugbild‘ sei hier beispielhaft genannt [1, 3, 4]. Sind die Begriffe also doch nicht so ‚selbstverständlich‘ oder selbsterklärend, wie so manche kurze Abhandlung in der Literatur suggerieren könnte?

Im vorliegenden Artikel werden die Begrifflichkeiten *reell* und *virtuell* hinsichtlich der zentralen dahinter liegenden fachlichen Konzepte und der dahinter liegenden Lernendenvorstellungen betrachtet. Zudem werden Vorschläge des Umgangs mit den beiden Begriffen im Optikunterricht dargestellt sowie dazugehörige Experimente vorgestellt.

## 2. Begriffe reell und virtuell aus unterschiedlichen Blickwinkeln betrachtet

Die Begriffe *reelles/virtuelles Bild* werden im Optikunterricht zur Unterscheidung zweier unterschiedlicher Bildarten verwendet. Als nützlich (wenn auch nicht einziges) Unterscheidungskriterium wird oft der Umstand herangezogen, ob am Ort des Bildes Licht(-energie) vorhanden ist oder nicht. Mittels der Bezeichnung von Bildern als *reell* oder *virtuell* wird bei Bildkonstruktionen dieser prinzipielle Unterschied hervorgestrichen. Auf Wortebene ist zu bemerken, dass die Wörter *reell* und *virtuell* selbst, sowie die in Schulbüchern oft zu findenden Übersetzungen *wirklich* und *scheinbar*, etwas grundlegend Unterschiedliches vermitteln, ja einen Gegensatz.

Bei einem ersten Kontakt mit den Begriffen *reelles* und *virtuelles Bild* kann demnach bei Lernenden die Erwartung entstehen, dass sich die Bilder fundamental unterscheiden müssen und dass beim Wahrnehmen der Bilder sofort ein prinzipieller qualitativer Unterschied erkennbar sein sollte.

Und doch gilt für das praktische Wahrnehmen beider Bilder etwas anderes: Die Wahrnehmung von reellem und virtuellem Bild ist gleich! Präziser formuliert: Bei einer ersten Annäherung insbesondere (aber nicht nur!) durch auf dem Gebiet der Optik unbedarfte Personen – Kinder wie Erwachsene – wird die Wahrnehmung von reellem und virtuellem Bild als ‚vollkommen gleich‘ beschrieben [1]. Erst mit gewissen Optikkenntnissen und dem Lenken des Augenmerks auf andere Bildattribute (z. B. Auffangbarkeit, Bildort, Ausrichtung) wird der wahrgenommene Unterschied bewusst; dieser Unterschied ist dann aber trotzdem ein Detail, das vom identischen Wahrnehmungseindruck beider Bilder überdeckt wird. Jedenfalls gilt, dass beide Bildarten gleichermaßen mit dem Auge beobachtbar und mit Geräten abbildbar (z. B. fotografierbar) sind. Die Versuche, die in diesem Beitrag beschrieben werden, rücken eben diese Gemeinsamkeiten von reellem und virtuellem Bild in den Vordergrund, was gerade für den praktischen Umgang mit den Begriffen beim Experimentieren von Bedeutung erscheint.

Die gleiche Wahrnehmbarkeit von reellem und virtuellem Bild lässt sich nicht nur durch Versuche nachvollziehen, sondern auch durch einen Vergleich des Strahlenverlaufes argumentieren: Der Strahlenverlauf im Bereich der divergierenden Lichtstrahlen beim reellem Bild (also auf der Bildseite nach dem Ort des nicht aufgefangenen reellem Bildes) und der Strahlenverlauf im Bereich der divergierenden Lichtstrahlen beim virtuellen Bild (d. h. die gesamte Bildseite) sind für weitere Abbildungen z. B. durch das Auge *gleichwertig*. Das bedeutet: Die Information, die durch die Lichtstrahlen zu einem beobachtenden Auge gelangt, ist in beiden Fällen dieselbe – nämlich als würde sie von einem Gegenstand am Bildort kommen [7].

Die Diskrepanz in der Bedeutung von reellem/virtuellem Bild in unterschiedlichen Lebenswelten macht die Schwierigkeit mit den Begriffen noch nachvollziehbarer. Für Schüler\*innen ist aus ihrer Alltagserfahrung das virtuelle Bild das weitaus vertrautere: Sie kennen es vom Blick in den Badezimmerspiegel, in den Verkehrsspiegel, in den Vergrößerungsspiegel, durch die Lupe auf vergrößerte Bilder und durch die Brillengläser auf die (Bilder der) Augen der Brillenträger\*innen. Für die betrachtende Person ist das Scharfstellen auf virtuelle Bilder

hinter Linse/Spiegel somit oft gewohnter als auf reelle Bilder vor Linse/Spiegel [5]. Auf der anderen Seite ist für technisch-naturwissenschaftliche Beschreibungen gerade das reelle Bild das wichtigere: Das reelle Bild ist das Ziel/Ergebnis von jedem Abbildungsvorgang – beim Beamer auf der Leinwand, beim Auge auf der Netzhaut, beim Fotoapparat auf dem Bildsensor usw.

Dann gibt es noch die Wörter selbst, die für die Unterscheidung der Bildarten verwendet werden – *reell* und *virtuell*. Während das Wort *reell* für Schüler\*innen außer bei den reellen Zahlen eher keine Vergleichsmöglichkeiten bietet, weckt das Wort *virtuell* wohl automatisch Assoziationen – man denke etwa an die *virtuelle Realität*, die vom Computer simulierte Realität, die dem Menschen über hochtechnologische Schnittstellen auf vielen Sinnesebenen so wirklichkeitsnah wie möglich vorgetäuscht wird. Bei Übertragung dieser Bedeutung auf die optische Abbildung stellt sich wohl aus Lernendensicht die Frage: Das für mich gewohnte Bild ist ‚nicht wirklich vorhanden‘, eine ‚Täuschung‘ und das ungewohnte Bild (das ich ev. nur vom ‚fälschen‘ Verwenden einer Lupe kenne) ist das ‚echte‘, das ‚wirkliche‘ Bild? Sollte aus der Wortdeutung heraus nicht eigentlich das reelle Bild leichter greifbar sein und einem somit öfter begegnen? Wenn man bedenkt, wie sehr sich die Verwendung des Wortes *virtuell* in den letzten Jahrzehnten in der Alltagssprache durch die Verbreitung der digitalen Medien gehäuft hat, kann man wohl auch von einer starken Wandlung von diesbezüglichen Lernendenvorstellungen ausgehen.

Blendet man kurz das fachliche Hintergrundwissen (z. B. bezüglich Auffangbarkeit, Orientierung, Ort von Bildern) aus, ist nachvollziehbar: Warum werden Bilder, die ich gleich wahrnehme, mit Attributen versehen, die einen fundamentalen Gegensatz ausdrücken und in ihrer Bedeutung auf die Wahrnehmungsebene bezogen werden können?

## 2. Versuche

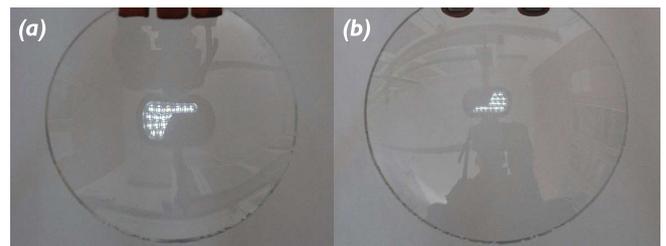
Im Folgenden werden drei einfache Versuche vorgestellt, die die Vielfältigkeit des Themas „reell oder virtuell“ aufgreifen und spannende Fragen durch praktisches Erleben der Bildarten aufwerfen.

### 2.1 Reelles und virtuelles Bild unmittelbar hintereinander wahrnehmen – ein Uhrglas als Hohl- und Wölbspiegel

Es wird ein einfacher Versuch ohne umständliche optische Aufbauten vorgestellt, mit dem man ein virtuelles und ein reelles Bild unter gleichen Rahmenbedingungen und mit demselben Versuchsgegenstand unmittelbar hintereinander wahrnehmen kann [1]. Im Gegensatz zu Linsen hat man bei Spiegeln die Möglichkeit, mit einem Gegenstand beide Spiegelarten zu realisieren. Um ein und denselben Gegenstand sowohl als Hohl- als auch als Wölbspiegel zu verwenden, bieten sich verschiedene Alltagsgegenstände an, z. B. Suppenlöffel,

Glas- und Metallschüsseln [5]. Bei den hier beschriebenen Versuchen wird ein sogenanntes Uhrglas verwendet. Uhrgläser oder Uhrglasschalen sind Laborgegenstände in der Chemie zum Einwiegen kleinerer Stoffmengen, zum Verdampfen, zum Abdecken usw. und sind kostengünstig über Laborausstatter zu beziehen. Ein Uhrglas bietet den Vorteil, dass es als durchlässiger Spiegel verwendet werden kann und somit auch ein Blick durch den Spiegel hindurch möglich ist. Außerdem bietet ein Uhrglas durch seine Brennweite (als Spiegel) von etwa 4 cm bei einem Schalendurchmesser von etwa 8 cm einen relativ großen Öffnungswinkel, unter dem man die Bilder betrachten kann.

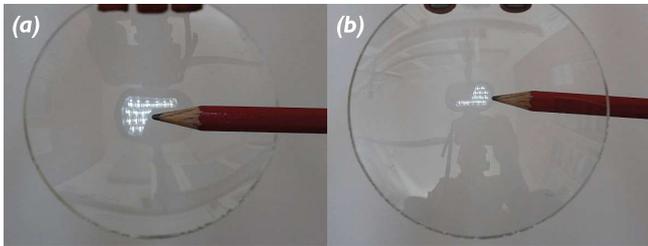
Zunächst kann man auf einfache Weise das **gleiche Wahrnehmen von reellem und virtuellem Bild** zeigen, indem man das Uhrglas in enger zeitlicher Abfolge als Wölbspiegel und dann durch Umdrehen als Hohlspiegel verwendet: Man betrachtet das Spiegelbild eines hellen Gegenstands, der einige Meter vom Uhrglas entfernt ist, z. B. einer eingeschalteten Deckenlampe; zunächst blickt man auf die konkave Seite, gleich darauf auf die konvexe Seite des Uhrglases. Somit sieht man einmal das reelle Bild der Lampe vor dem Uhrglas (Hohlspiegel) und das andere Mal das virtuelle Bild der Lampe hinter dem Uhrglas (Wölbspiegel). Wenn die Lampe symmetrisch ist und der Abstand zur Lampe so gewählt wird, dass die Bilder eine ähnliche Größe haben, ist es für die betrachtende Person schwierig, überhaupt Unterschiede zwischen den beiden Bildern zu erkennen. In Abb. 1 ist dies für eine asymmetrische Lampe bei unterschiedlichen Bildgrößen festgehalten. Auch einige Fachexpert\*innen, denen dieser Versuch vorgeführt wurde, sprachen die ähnliche Wahrnehmung der Bilder und dabei das nachvollziehbare Verwirrungspotenzial der Begriffe für Schüler\*innen an [1].



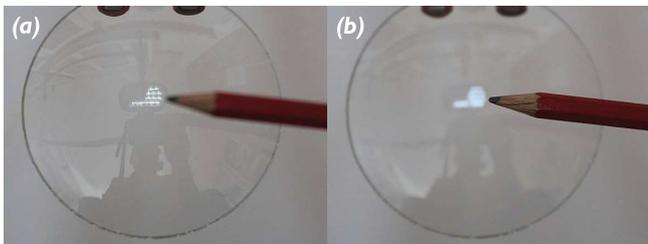
**Abbildung 1:** (a) Versuch mit dem Uhrglas als Hohlspiegel. Zu sehen ist das reelle Bild einer LED-Lampe auf der Objektseite des (halbdurchlässigen) Hohlspiegels. (b) Versuch mit dem Uhrglas als Wölbspiegel. Zu sehen ist das virtuelle Bild einer LED-Lampe auf der Rückseite des (halbdurchlässigen) Wölbspiegels.

In einem zweiten Schritt kann man den Vorteil, den ein Uhrglas als durchlässiger Spiegel bietet, nutzen: Durch Positionieren eines Gegenstandes, z. B. des eigenen Fingers, vor und hinter dem Uhrglas kann man das Scharfstellen des Auges auf unterschiedliche Entfernungen spüren, mit dem Scharfstellen auf das jeweilige Bild vergleichen und so über die Augenakkommodation den **Bildort vor bzw. hinter dem Spiegel wahrnehmen**. Dies ist in Abb. 2 für das reelle Bild vor dem Hohlspiegel und für das virtuelle Bild hinter dem

Wölbspiegel festgehalten, wobei ein Bleistift an den ungefähren Bildort gehalten wird. Für den Wölbspiegel ist in Abb. 3 das Scharfstellen des Auges auf Orte vor bzw. hinter dem Spiegel fotografisch nachgestellt: Das virtuelle Bild hinter dem Uhrglas und der Bleistift vor dem Uhrglas können nicht gleichzeitig scharfgestellt werden; der Ort des virtuellen Bildes hinter dem Uhrglas wird hier also unmittelbar nachempfindbar.



**Abbildung 2:** (a) Versuch mit dem Uhrglas als Hohlspiegel mit Bleistiftspitze am Bildort des reellen Bildes vor dem Uhrglas. (b) Versuch mit dem Uhrglas als Wölbspiegel mit Bleistiftspitze am Bildort des virtuellen Bildes hinter dem Uhrglas.



**Abbildung 3:** Versuch mit dem Uhrglas als Wölbspiegel mit Bleistiftspitze vor dem Uhrglas, die Kamera ist in (a) auf das virtuelle Bild fokussiert, in (b) ist sie auf die Bleistiftspitze fokussiert.

Weiters kann bei Abbildung eines sehr hellen Gegenstandes das **Auffangen des reellen Bildes** mittels Transparentpapiers ausgenutzt werden, um den Ort des reellen Bildes beim Hohlspiegel vor dem Uhrglas zu verdeutlichen. Besonders empfehlenswert ist ein teilweises Auffangen, wie es in Abb. 4 festgehalten ist: Das aufgefangene reelle Bild und das reelle Bild als ‚Luftbild‘ können gleichzeitig wahrgenommen werden, der gleiche Bildort wird deutlich.



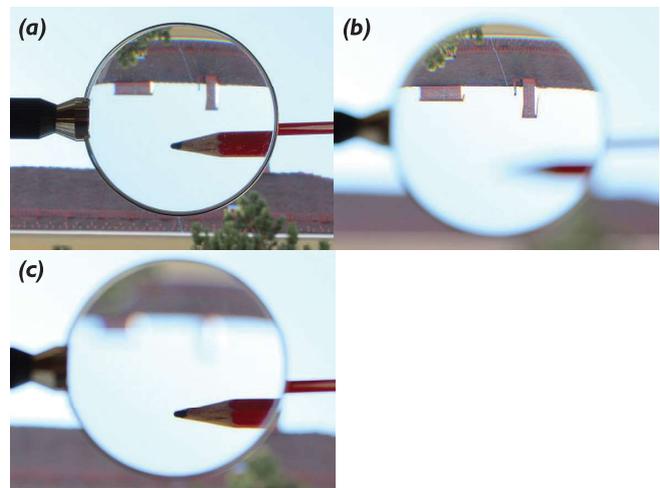
**Abbildung 4:** Versuch mit dem Uhrglas als Hohlspiegel mit dem zum Teil auf Transparentpapier aufgefangenen reellen Bild.

In weiterer Folge kann auch die **Orientierung des Bildes** herangezogen werden: Das aufrechte Bild ist das virtuelle, das umgekehrte Bild ist das reelle, was bei einer asymmetrischen Lampe wie in Abb. 1 die Bilder leicht unterscheidbar macht. Eine einfache Möglichkeit zwischen symmetrischem und asymmetrischem Objekt zu wechseln, bieten die sich in

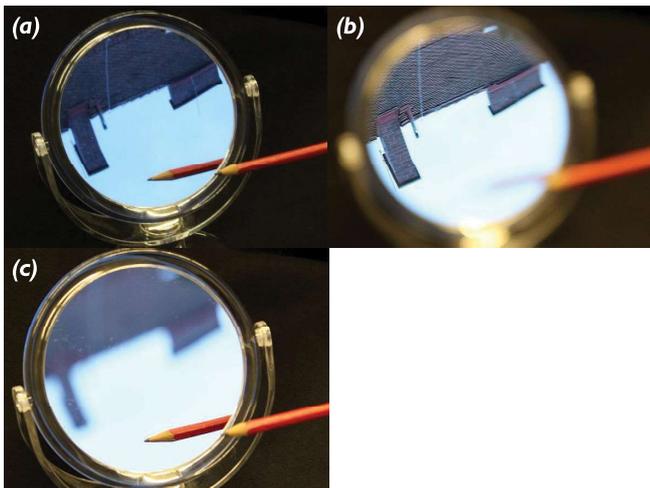
Klassenzimmern oft über den Raum erstreckenden Leuchtstoffröhren- oder LED-Paneele: Bei Abbildung der Paneelen-Mitte ist die Orientierung des Bildes nicht zu erkennen, am Paneelen-Ende hingegen sehr wohl.

## 2.2 Reelles und virtuelles Bild gleichzeitig wahrnehmen – Lupe und Vergrößerungsspiegel mit zwei Gegenständen

Das soeben beschriebene schnell hintereinander erfolgende Wahrnehmen von reellem und virtuellem Bild kann in seinem Effekt noch verstärkt werden, wenn die Bilder *gleichzeitig* betrachtet werden können. Da bei Sammellinse und Hohlspiegel in Abhängigkeit von der Objektweite reelles *und* virtuelles Bild auftreten, kann man Arrangements finden, bei denen man die beiden Bildarten *gleichzeitig* sehen kann: Im Wesentlichen positioniert man einen Gegenstand nahe an Linse/Spiegel vor einem weit entfernten Hintergrundobjekt, sodass beide gleichzeitig ‚durch Linse/Spiegel betrachtbar‘ sind [1, 6]. In Abb. 5a ist das für eine Lupe (Brennweite etwa 18 cm) und in Abb. 6a für einen Kosmetikspiegel (Brennweite etwa 40 cm) festgehalten. Ein Bleistift ist jeweils knapp hinter der Lupe bzw. knapp vor dem Spiegel positioniert, als weit entferntes Objekt dient ein Hausdach. Die Zuordnung reell – umgekehrt – vor Linse/Spiegel bzw. virtuell – aufrecht – hinter Linse/Spiegel ist hier unmittelbar zu erkennen. Das Erspüren der Augenakkommodation auf die Bildorte vor bzw. hinter Linse/Spiegel ist in den Abb. 5b und 5c bzw. 6b und 6c fotografisch festgehalten.



**Abbildung 5:** Versuch mit einer Lupe, bei dem reelles Bild (Dach) und virtuelles Bild (Bleistift) gleichzeitig wahrgenommen werden können: (a) Aufnahme mit großer Schärfentiefe, die Kamera ist auf die Lupe (zwischen den beiden Bildern) fokussiert. (b) Aufnahme mit kleiner Schärfentiefe, die Kamera ist auf das reelle Bild vor der Lupe fokussiert. (c) Aufnahme mit kleiner Schärfentiefe, die Kamera ist auf das virtuelle Bild hinter der Lupe fokussiert.



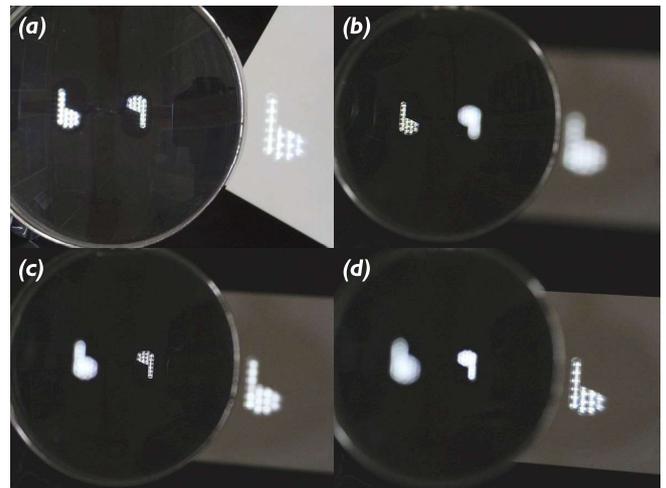
**Abbildung 6:** Versuch mit einem Hohlspiegel, bei dem reelles Bild (Dach) und virtuelles Bild (Bleistift) gleichzeitig wahrgenommen werden können: (a) Aufnahme mit großer Schärfentiefe, die Kamera ist auf den Spiegel (zwischen den beiden Bildern) fokussiert. (b) Aufnahme mit kleiner Schärfentiefe, die Kamera ist auf das reelle Bild vor dem Spiegel fokussiert. (c) Aufnahme mit kleiner Schärfentiefe, die Kamera ist auf das virtuelle Bild hinter dem Spiegel fokussiert.

### 2.3 Drei Bilder eines Objekts gleichzeitig wahrnehmen – Lupe als Sammellinse & Hohlspiegel & Wölbspiegel

Die Thematik „reelles und virtuelles Bild gleichzeitig wahrnehmen“ ist bei Bedarf noch ausbaubar und kann noch komplexer gestaltet werden, dies zeigt die folgende Anordnung [1]. Ein helles Objekt wird durch eine bikonvexe Sammellinse auf einen Schirm abgebildet, wobei die beiden Grenzflächen der Linse auch als (durchlässiger) Wölbspiegel bzw. Hohlspiegel fungieren. Man kann dadurch drei Bilder gleichzeitig wahrnehmen: das (aufgefangene) reelle Bild hinter der Linse (erzeugt durch Brechung an der Sammellinse), das reelle (Luft-)Bild vor der Linse (erzeugt durch Reflexion an der hinteren Linsengrenzfläche – Hohlspiegel) und das virtuelle Bild hinter der Linse (erzeugt durch Reflexion an der vorderen Linsengrenzfläche – Wölbspiegel). In Abb. 7a sind die drei Bilder einer asymmetrischen LED-Lampe bei einer Lupe (Brennweite etwa 18 cm) mit großer Schärfentiefe fotografiert. Die reellen Bilder sind umgekehrt, das virtuelle Bild ist aufrecht. In den Abb. 7b - 7d wurde mit kleiner Schärfentiefe auf das vorderste, das mittlere bzw. das hinterste Bild fokussiert, die unterschiedlichen Bildorte werden deutlich erkennbar.

## 3. Theoretisch-fachliche Grundlagen

Ein Theorie-Abschnitt zum Thema reelles/virtuelles Bild – ist das wirklich nötig? Was auf den ersten Blick als eher ‚überschaubarer‘ Stoff anmutet, kann sich bei genauerem Befassen dann doch als umfangreicher als gedacht herausstellen. Im schulischen Optikunterricht kann die Unterscheidung von reellem und virtuellem Bild durch das Kriterium, ob am Ort des Bildes Licht vorhanden ist oder nicht, getroffen werden. Oft unberücksichtigt bleibt dabei aber der Geltungsbereich



**Abbildung 7:** Versuch mit einer Lupe, bei dem drei Bilder (einer LED-Lampe) gleichzeitig wahrgenommen werden können, nämlich v. l. n. r. das vom Hohlspiegel (= hintere Linsengrenzfläche) erzeugte reelle Bild, das vom Wölbspiegel (= vordere Linsengrenzfläche) erzeugte virtuelle Bild und das von der Sammellinse erzeugte reelle Bild (aufgefangen auf einem Blatt Papier): (a) Aufnahme mit großer Schärfentiefe, alle drei Bilder sind scharf abgebildet. (b) Aufnahme mit kleiner Schärfentiefe, die Kamera ist auf das vorderste Bild fokussiert. (c) Aufnahme mit kleiner Schärfentiefe, die Kamera ist auf das mittlere Bild fokussiert. (d) Aufnahme mit kleiner Schärfentiefe, die Kamera ist auf das hinterste Bild fokussiert.

von diesem ‚einfacheren‘ Konzept (in der Folge auch als ‚Licht-ja/nein-Kriterium‘ bezeichnet): Man ist dabei auf die Beschreibung von einstufigen Abbildungen beschränkt, also auf die Abbildung durch eine Linse, einen Spiegel oder eine brechende Grenzfläche. Während das für den Schulunterricht zweifelsohne vollkommen ausreicht, lohnt sich für Lehrkräfte und interessierte Personen doch ein Blick „über den Tellerrand“ dieses einfacheren Konzepts hinaus – insbesondere dann, wenn man Kombinationen von mehreren Abbildungsvorgängen hintereinander betrachtet. Man kann nämlich auch bei der Diskussion von einfachen Anwendungsfällen, die im schulischen Kontext auftreten können, ausgerüstet alleine mit dem ‚einfacheren‘ Konzept, in Erklärungsnot geraten. Dies sollen die folgenden Beispiele zeigen [1]:

**Bsp. 1:** Welches Bild sieht eine brillentragende Person durch ihre Brille und wie erklärt man den Abbildungsvorgang? Bei kurzsichtigen Personen mit Zerstreuungslinsen in der Brille reicht das einfachere Konzept für eine Erklärung aus: Die Person sieht durch die Zerstreuungslinse das virtuelle Bild eines Gegenstandes. Der Ort des virtuellen Bildes ist näher als der Ort des Gegenstands; liegt das virtuelle Bild näher als der Fernpunkt des Auges, ist es vom kurzsichtigen Auge scharf als reelles Bild auf der Netzhaut abbildbar. Bei weitsichtigen Personen mit Sammellinsen in ihrer Brille reicht das einfachere Konzept aber nur für eine Erklärung bei nahen Gegenständen: Die Person sieht das virtuelle Bild des Gegenstandes. Der Ort des virtuellen Bildes ist weiter entfernt als der Gegenstand; liegt das virtuelle Bild auch weiter entfernt als der Nahpunkt des Auges, ist es vom weitsichtigen Auge scharf als reelles Bild abbildbar. Was sieht die Person aber bei weit entfernten

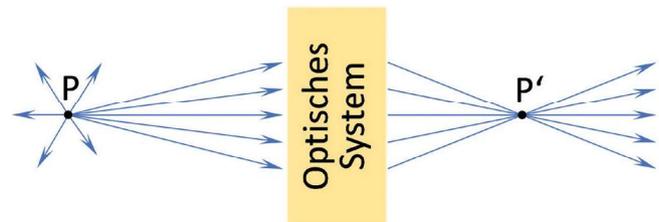
Gegenständen (weiter entfernt als die Brennweite der Sammellinse)? Die Sammellinse erzeugt in diesen Fällen ein reelles Bild, welches aber hinter dem Auge zustande käme. Vor der Augenlinse ist kein von der Sammellinse erzeugtes Bild, weder ein reelles noch ein virtuelles Bild.

**Bsp. 2:** Wie ist der Abbildungsvorgang bei einem Fernrohr zu erklären, welches Bild sieht man durch das Okular? Für die Erklärung eines keplerschen (astronomischen) Fernrohres ist wieder das einfachere Konzept ausreichend: Das Objektiv (im einfachsten Fall eine Sammellinse) erzeugt ein reelles Zwischenbild, welches durch die Sammellinse des Okulars wie mit einer Lupe betrachtet wird; man sieht das vergrößerte virtuelle Bild des reellen Zwischenbildes hinter dem Okular, welches dann durch das Auge auf die Netzhaut reell abgebildet wird. Wie kann man aber die Situation beim galileischen (holländischen) Fernrohr beschreiben? Hier liegt die Zerstreuungslinse des Okulars vor dem reellen Zwischenbild, welches die Sammellinse des Objektivs erzeugt. Was betrachtet man nun durch das Okular? Vor der Okularlinse ist kein vom Objektiv erzeugtes Bild, weder ein reelles noch ein virtuelles Bild.

Die erwähnten Beispiele stellen mehrstufige Abbildungen dar: Es werden zwei oder mehr optische Systeme hintereinander verwendet, Bilder werden nochmals abgebildet. In der Fachliteratur [8] ist für mehrstufige Abbildungen ein ‚umfassenderes‘ Konzept beschrieben, welches neben reellen und virtuellen Bildern auch reelle und virtuelle Objekte unterscheidet und als logische Erweiterung des zuvor erwähnten ‚einfacheren‘ Konzeptes gesehen werden kann. Erfolgt die Unterscheidung von reellem/virtuellem Objekt/Bild in der Literatur oft über das Vorzeichen von Objekt- bzw. Bildweite (reelles Objekt/Bild bei positiver Objekt-/Bildweite, virtuelles Objekt/Bild bei negativer Objekt-/Bildweite), so soll hier ein pragmatischerer Zugang vorgestellt werden [1]. Durch die in der Folge vorgestellte Version des ‚umfassenderen‘ Konzeptes können auch die Wörter *reell* und *virtuell* in ihrer Verwendung besser gedeutet werden.

Bei einem allgemeinen Abbildungskonzept [8] geht es darum, dass die von einem Objekt divergierenden Lichtstrahlen<sup>1</sup> derart durch ein optisches System abgelenkt werden, dass sie nach dem optischen System zu Bildpunkten konvergieren (um danach wieder zu divergieren). Dies ist in Abb. 8 schematisch dargestellt. Wir betrachten zunächst die Bildseite: Entspricht nun eine Abbildung auf der Bildseite diesem allgemeinen Abbildungskonzept, d. h., verlassen die Lichtstrahlen das optische System *konvergierend*, spricht man von einem reellen Bild. Andernfalls – also bei das optische System *divergierend* verlassenden Lichtstrahlen – spricht man von einem virtuellen Bild. Aus dieser Festlegung lässt sich auch das Licht-ja/nein-Kriterium folgern. Dieselbe Festlegung trifft man nun analog

(quasisymmetrisch) für die Objektseite: Entspricht eine Situation auf der Objektseite dem allgemeinen Abbildungskonzept, d. h., treffen die Lichtstrahlen *divergierend* auf das optische System, spricht man von einem reellen Objekt. Andernfalls – also bei *konvergierend* auf das optische System auftreffenden Lichtstrahlen – spricht man von einem virtuellen Objekt. Da von Gegenständen die Lichtstrahlen immer divergierend ausgehen, sind Gegenstände immer reelle Objekte. Auch Bilder (reelle wie virtuelle!) können bei einer weiteren Abbildung reelle Objekte sein (auch von ihnen können Lichtstrahlen divergierend ausgehen). Der Fall der konvergierenden Lichtstrahlen tritt nun vor reellen Bildern auf. Das bedeutet: Reelle Bilder können als virtuelle Objekte dienen, wenn sie vor ihrem Zustandekommen (als Zwischenbilder) weiter abgebildet werden. Die vorgestellte Festlegung von reellem/virtuellem Objekt bzw. Bild ist in Abb. 9 zusammengefasst. Aus ihr ergibt sich folgende Deutungsmöglichkeit für die Begriffe *reell* und *virtuell* in der Optik: *Reell* bedeutet ‚dem allgemeinen Abbildungskonzept entsprechend‘, *virtuell* bedeutet ‚nicht dem allgemeinen Abbildungskonzept entsprechend‘.



**Abbildung 8:** Verlauf der Lichtstrahlen bei der idealen Abbildung einer Punktquelle P in einen Bildpunkt P' durch ein optisches System. (in Anlehnung an [8])

Kriterium: Wie treffen die Strahlenbüschel auf das opt. System/wie gehen sie von ihm aus?	
Objektseite (einfallende Strahlen)	Bildseite (austretende Strahlen)
<b>Reelles Objekt</b>	<b>Reelles Bild</b>
Auf der Objektseite treffen die Strahlenbüschel <b>divergierend</b> auf das optische System.	Auf der Bildseite verlassen die Strahlenbüschel <b>konvergierend</b> das optische System.
<b>Virtuelles Objekt</b>	<b>Virtuelles Bild</b>
Auf der Objektseite treffen die Strahlenbüschel <b>konvergierend</b> auf das optische System.	Auf der Bildseite verlassen die Strahlenbüschel <b>divergierend</b> das optische System.

**Abbildung 9:** Tabelle zur Unterscheidung von reellem/virtuellem Objekt bzw. Bild anhand der Strahlen-Konvergenz und -Divergenz.

Unter Zuhilfenahme des Begriffs virtuelles Objekt lassen sich die obigen Beispiele nun konsistent beschreiben [1]:

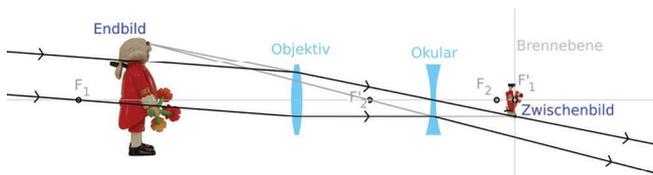
**Bsp. 1:** Welches Bild sieht eine weitsichtige Person durch die Sammellinse ihrer Brille, wenn der Gegenstand weiter als die Brennweite der Brille entfernt ist und wie erklärt man den Abbildungsvorgang? Die Sammellinse der Brille erzeugt ein reelles Bild hinter dem Auge, da die Bildweite für ein reelles Bild stets größer als die Brennweite ist (letztere beträgt bei 10 dpt noch 10 cm.). Die Lichtstrahlen treffen somit konvergierend

<sup>1</sup> Die Begriffe Strahlenbündel und Strahlenbüschel finden in diesem Zusammenhang immer wieder Verwendung, wobei Strahlenbündel grundsätzlich als parallele Lichtstrahlen im Gegensatz zu Strahlenbüscheln mit nichtparallelen Lichtstrahlen modelliert werden (siehe dazu bspw. [9]).

auf die Sammellinse des Auges, das (nicht zustande kommende) reelle Bild fungiert also als virtuelles Objekt für die Abbildung durch die Sammellinse des Auges auf die Netzhaut.

**Bsp. 2:** Wie ist der Abbildungsvorgang in einem galileischen Fernrohr zu erklären, was sieht man durch das Okular? Vor der Zerstreuungslinse des Okulars existiert wie bereits erwähnt weder ein reelles noch ein virtuelles (Zwischen-)Bild, die Okularlinse befindet sich vor dem (Zwischen-)Bild des Objektivs. Die das Objektiv verlassenden Lichtstrahlen treffen somit konvergierend auf das Okular, das (Zwischen-)Bild des Objektivs fungiert demnach als virtuelles Objekt für die Abbildung durch das Okular.

In Abb. 10 ist ein Strahlengang skizziert, der dem galileischen Fernrohr entspricht, wobei hier (wegen der Darstellbarkeit des Endbildes) die Brennpunkte  $F_1'$  des Objektivs und  $F_2$  des Okulars nicht ganz zusammenfallen, wie das bei der afokalen Einstellung der Fall wäre.



**Abbildung 10:** Strahlengang bei einer Linsenordnung, die dem galileischen Fernrohr entspricht. Die Brennpunkte  $F_1'$  des Objektivs und  $F_2$  des Okulars fallen hier nicht zusammen, wie das bei der afokalen Einstellung der Fall wäre. Das betrachtete Objekt befindet sich in großer Entfernung vor dem Objektiv, sodass die Lichtstrahlen von einem Objektpunkt praktisch parallel auf die Objektiv-Sammellinse treffen und von dieser in die Brennebene bei  $F_1'$  abgebildet werden. Das reelle Zwischenbild ist virtuelles Objekt für die Abbildung durch die Okular-Zerstreuungslinse; es entsteht ein aufrechtes virtuelles Endbild. (in Anlehnung an [8])

Wenn die virtuellen Objekte im umfassenderen Konzept für den schulischen Gebrauch auch denkbar ungeeignet sind und zugegebenermaßen noch wesentlich mehr Verwirrungspotenzial haben als die virtuellen Bilder alleine, so erscheint es doch wichtig darauf hinzuweisen, dass mit reellem/virtuellem Bild alleine noch nicht ‚die ganze Geschichte erzählt‘ wird. Für eine konsistente Beschreibung von mehrstufigen Abbildungsvorgängen analog zu einstufigen Abbildungen sind eben auch virtuelle Objekte nötig. Man kann natürlich diskutieren, wie unumgänglich eine solche Beschreibung ist.

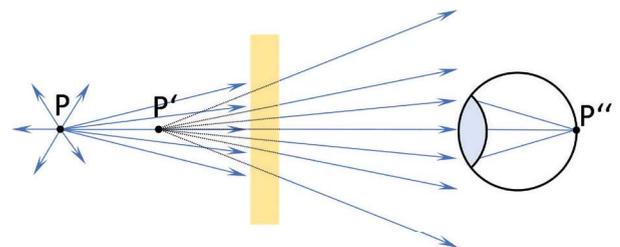
#### 4. Fazit

Im schulischen Kontext sollte die Ambivalenz berücksichtigt werden, mit der sich das Thema reelles/virtuelles Bild den Schüler\*innen darbieten kann: Bei der Abbildungskonstruktion wird die Unterscheidung der beiden Bildarten betont und es wird auch durch die Wörter *reell* und *virtuell* ihre Gegensätzlichkeit hervorgehoben. Umgekehrt kann sich den Schüler\*innen beim praktischen Umgang mit Abbildungsvorgängen ein

vollkommen gleicher Wahrnehmungseindruck bieten, was dann insbesondere wegen anderer Verwendungen des Wortes *virtuell* in ihrer Alltagswelt schwierig für sie abzugleichen ist.

Ein pragmatischer didaktischer Zugang kann darin bestehen, die Begriffe zwar zu verwenden, in ihrer Bedeutung aber etwas zu relativieren – Bildkonstruktionen kann man im Prinzip auch ohne die Begriffe erklären – und darauf hinzuweisen, dass sie als Fachbegriffe von anderen Verwendungen insbesondere des Wortes *virtuell* zu entkoppeln sind. Besonders die virtuelle Realität mit ihrer Bedeutung als von Computern vorgetäuschte, ‚vorgedaukelte‘ Realität verleitet zur Lernendenvorstellung, dass sich die betrachtende Person beim Wahrnehmen eines virtuellen Bildes im Gegensatz zum reellen Bild etwas einbildet, dass es sich um eine vorgetäuschte Sinneswahrnehmung handelt. Gerade hier gibt es aber überhaupt keinen Unterschied zwischen den beiden Bildarten: Beide Bilder sind ‚reale‘ Bilder in dem Sinn, dass sie durch ins Auge gelangende Lichtstrahlen wahrgenommen und in ein reelles Bild auf der Netzhaut abgebildet werden. Beide Bilder können auch fotografiert werden. Beim virtuellen Bild braucht es also z. B. keine zusätzliche Leistung des Gehirns und kein zusätzliches Extrapolieren der Lichtstrahlen durch das Auge [6, 8, 9] oder Ähnliches – auch das Sehen *virtueller* Bilder bleibt ein passiver Prozess. Wenn etwas ‚vorgetäuscht‘ wird, dann passiert dies sowohl bei virtuellen als auch bei reellen Abbildungen gleichermaßen: Jedes Bild täuscht einen vergrößerten/verkleinerten aufrechten/umgekehrten Gegenstand am Bildort vor, darin unterscheiden sich reelles und virtuelles Bild nicht [7]! Ironischerweise gelingt das Vortäuschen eines Gegenstandes besonders eindrucksvoll gerade mit *reellen* Abbildungen wie z. B. beim Mirascope [10, 11].

Der Aufbau von Schulbüchern weist oft folgende Reihenfolge auf: Reflexion und Bildkonstruktion bei Spiegeln – Brechung und Bildkonstruktion bei Linsen – optische Geräte inkl. Auge. Schon beim ersten Thema, dem Reflexionsgesetz, gibt es beim ebenen Spiegel die Möglichkeit, das virtuelle Bild anzusprechen. Das Auge, welches den wichtigen Schritt der finalen Abbildung in ein reelles Bild auf der Netzhaut schafft, steht hier am Ende der Erklärungskette. Um die Bedeutung des reellen Bildes für jeden (mehrstufigen) Abbildungsvorgang hervorstreichen, könnte es nützlich sein, auf die Abbildung durch das Auge schon früher einzugehen und diese dann etwa bei der



**Abbildung 11:** Strahlendiagramm zu einem virtuellen Bild mit dem Objektpunkt  $P$  und dem virtuellen Bildpunkt  $P'$ , das gelbe Rechteck symbolisiert ein optisches System. Im funktionellen Augenmodell entsteht auf der Netzhaut der reelle Bildpunkt  $P''$ .

Diskussion von virtuellen Bildern auch in der graphischen Darstellung zu berücksichtigen – etwa so wie in Abb. 11 skizziert [1]. Damit wäre klar: Wie auch immer ein Gegenstand abgebildet wird, ob Zwischenbilder virtuell oder reell sind, in einem letzten Schritt entsteht immer ein reelles Bild (auf der Netzhaut oder auf einem Bildsensor etc.). Dieses Wissen kann bei einer Bewertung der grundlegenden Unterscheidung von Bildern durch die Begriffe *reell* und *virtuell* hilfreich sein.

Die Idee, hinsichtlich Lernendenvorstellungen problematische etablierte Begriffe durch andere weitreichend ersetzen zu können, ist natürlich illusorisch. Was aber möglich ist, sind ein

reflektierter Umgang mit den Begriffen reelles und virtuelles Bild und ein Berücksichtigen von Lernendenvorstellungen sowie einer sich ständig ändernden Alltagssprache der Schüler\*innen beim Unterrichten und bei der Wahl der Unterrichtsmittel.

Bildquellen: A. Gumbsch CC BY-NC-SA 3.0 AT

---

Andreas Gumbsch *Modellschule Graz*

Ingrid Krumphals *Pädagogische Hochschule Steiermark*

## Literatur

- [1] Gumbsch, A. Die Bedeutung der Begriffe reelles Bild und virtuelles Bild für den Optikunterricht der Sekundarstufe, 2020. Graz: Diplomarbeit.
- [2] Peinsipp, H. „Reelles und virtuelles Bild“ in Physikschulbüchern: eine Analyse von österreichischen Schulbüchern für die 8. Schulstufe. 2021, Graz: Masterarbeit.
- [3] Krumphals, I. und Haagen-Schützenhöfer, C. Lernumgebung zum Thema 3D-Sehen. Nachhaltige Bildung: Tagungsband zur VII. CARN D.A.CH-Tagung an der Pädagogischen Hochschule Tirol, 18.-19.01.2019, Innsbruck (Beiträge zur Fachdidaktik) ed A Habicher et al. 2020. S. 231–47.
- [4] Haagen-Schützenhöfer, C. und Hopf, M. Schülervorstellungen zur geometrischen Optik. Schülervorstellungen und Physikunterricht ed H Schecker et al. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 2018, S. 89–114.
- [5] Schneider, W. B. Bemerkungen zur Sichtbarkeit reeller Bilder bei einem Hohlspiegel. Physik und Didaktik. 1989, S. 150–3.
- [6] Gmelch, M. und Reineke, S. Durchblick in Optik: Mit Phänomenen, Formeln und Fragen zum Verständnis (Lehrbuch). 2019, Berlin: Springer Spektrum.
- [7] Tipler, P.A. und Mosca, G. Physik: Für Studierende der Naturwissenschaften und Technik 8th edn. 2019, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [8] Hecht, E. Optik (De Gruyter Studium) 7th edn. 2018, Berlin, Boston: de Gruyter.
- [9] Bergmann, L. Lehrbuch der Experimentalphysik: Zum Gebrauch bei Akademischen Vorlesungen und zum Selbststudium; Band 3: Optik (Lehrbuch der Experimentalphysik Band 3) 7th edn. 2018, Berlin, Boston: de Gruyter.
- [10] Krumphals, I. Das Mirascope. Plus Lucis. 2019, S. 31–4
- [11] Krumphals, I. The Mirascope: an explanation on a conceptual level. Phys. Educ. 2019, 54 45013.

# Erratum zu Artikel Das Mirascope

Krumphals Ingrid (2019): Das Mirascope.

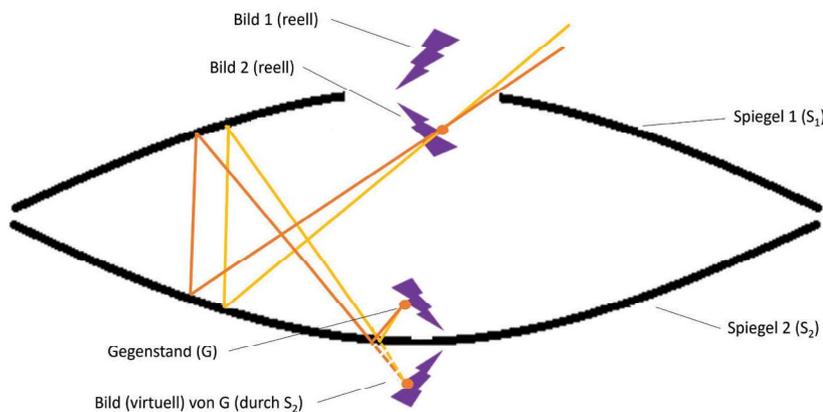
Plus Lucis (3/2019). S.31-34

*Ingrid Krumphals*

Im Artikel wird Bild 2 als virtuelles Bild bezeichnet. Dies ist jedoch ein reelles Bild und ist nicht, wie im Artikel bezeichnet, ein virtuelles Bild. Bild 1 und Bild 2 sind reelle Bilder. Bild 2 entsteht folgendermaßen (siehe Abbildung 1): Das virtuelle Bild des Gegenstandes (G), welches durch Spiegel 2 „unterhalb“ des Spiegels 2 entsteht, wird als reelles Bild abgebildet und kann auch mit einem Blatt Papier (im Idealfall Transparentpapier) abgebildet werden – hier ist es beim Experimentieren besonders

wichtig, zu erkennen wann Bild 1 aufhört und Bild 2 beginnt, sodass es keine Vermischung von Bild 1 und Bild 2 gibt.

Abbildung 1 zeigt exemplarisch den Strahlenverlauf von einem Gegenstandspunkt bis zu Bild 2. Abbildung 2 zeigt die Bildentstehung mit einer dreidimensionalen Orientierung des Gegenstandes (Würfel) und den entstehenden Bildern.

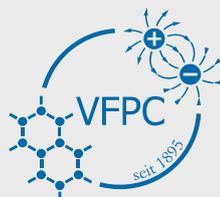


**Abbildung 1:** Strahlenverlauf der Entstehung von Bild 2



**Abbildung 2:** Dreidimensionale Orientierung des Gegenstandes und der Bilder

Ingrid Krumphals *Pädagogische Hochschule Steiermark*



## Neues aus dem Verein

### **Das war die 77. Fortbildungswoche – wir sagen Dankeschön!**

Von 20. bis 22. Februar 2023 fand - endlich wieder in Präsenz - die 77. Fortbildungswoche an der Fakultät für Physik der Universität Wien statt.

Das Programm bot eine Vielzahl an Vorträgen, Workshops und Exkursionen rund um didaktische Fragestellungen in Physik, Chemie und Sachunterricht, sowie zu Aspekten aktueller wissenschaftlicher Forschung. Abgerundet wurden diese Veranstaltungen durch ein unterhaltsames Abendprogramm: Von einer Science-Show mit Magic Andy und dem nachträglichen Geburtstagsfest zum 75. Jubiläum der Fortbildungswoche angefangen, bis hin zu einer spannenden Scavenger Hunt durch den 9. Bezirk mit anschließendem Punschtrinken.

Vielen Dank an über 200 Besucher\*innen, 30 Vortragende und das Organisationsteam bestehend aus Louisa Winter, Florian Budimaier, Christoph Wimmer und Martin Hopf.

### **ERRATUM**

Das wunderbare Titelbild der Ausgabe 04/2022 (Radioaktivität) stammt von Mag.<sup>a</sup> Magdalena Micoloi, TU Dresden.

### **7. Werner Rentzsch-Fotowettbewerb**

Die Preisträger\*innen des 7. Werner Rentzsch-Fotowettbewerbs stehen fest! Sie wurden im Zuge der 77. Fortbildungswoche am 20. Februar feierlich im Lise-Meitner-Hörsaal der Fakultät für Physik ausgezeichnet. Den ersten Platz konnten dabei Patricia Gaida, Gabriela Filipova und DI Dr. Rainer Rene Prokopec von der HGBLuVA Leyserstraße erreichen.

Alle ausgezeichneten Fotos finden Sie auf unserer Homepage.



Österreichische Post AG  
SM 17Z041123 S  
Verein zur Förderung des physikalischen  
und chemischen Unterrichts,  
Porzellangasse 4, Stiege 2, 1090 Wien  
DVR 0558567  
VRN 668472729