

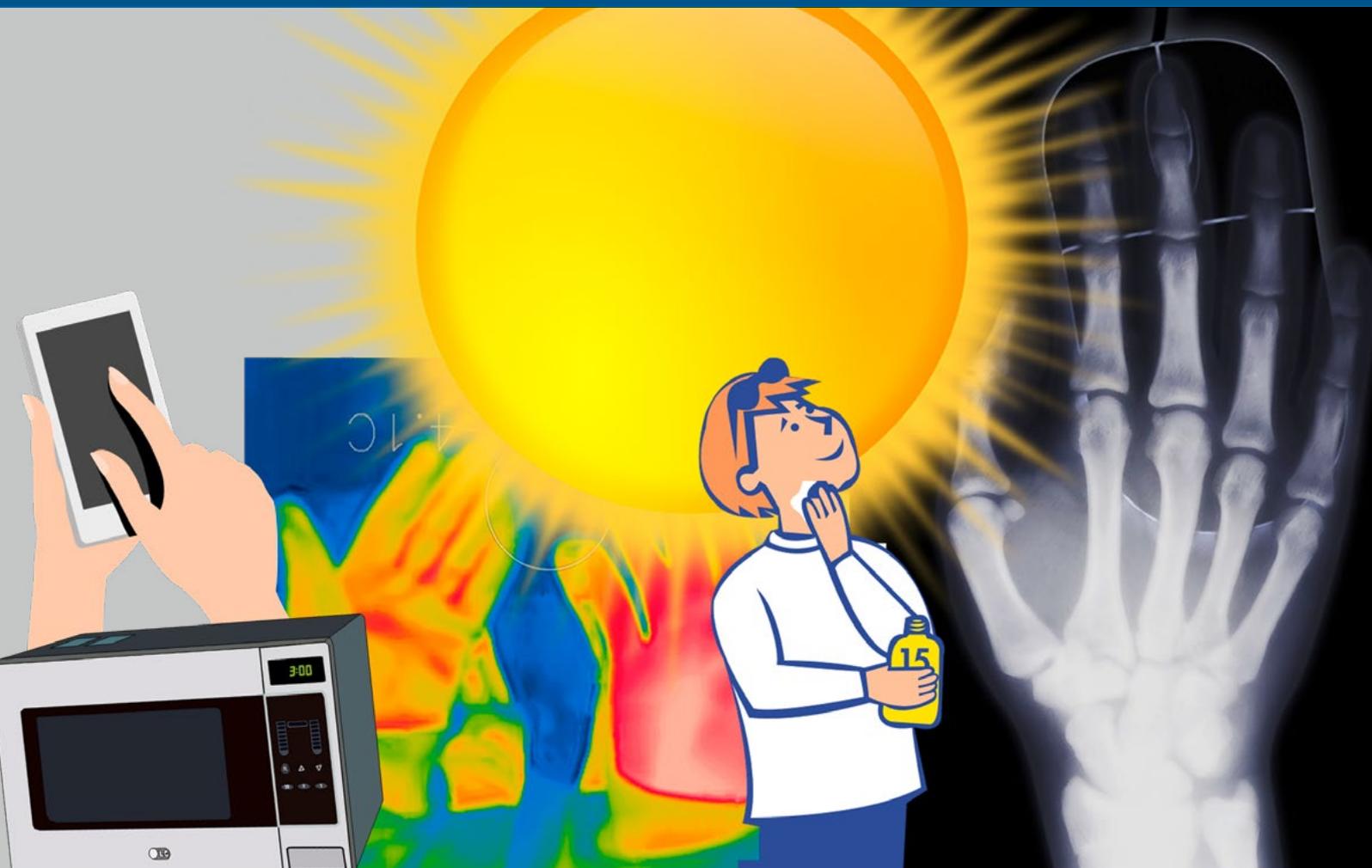


universität
wien

Zentrum für Lehrer*innenbildung

Elektromagnetische Strahlung in der Sekundarstufe I unterrichten

Handreichung für Lehrpersonen



Das vorliegende Konzept hat das Ziel, die wichtigsten Aspekte elektromagnetischer Strahlung lernendengerecht für die Sekundarstufe I aufzubereiten. Das Konzept unterscheidet sich dabei vom traditionellen Unterricht vor allem dadurch, dass auf eine ausführliche Behandlung des Wellen- oder Teilchenmodells verzichtet wird. Dies hat zwei Gründe: Zum einen stehen diese beiden Modelle nicht aus dem vorangegangenen Physikunterricht zur Verfügung, es müsste also Zeit darauf verwendet werden, zumindest eines der beiden einzuführen. Außerdem wird auch im Einführungsunterricht zur Optik in der Sekundarstufe I auf eine intensive Behandlung des Wellen- bzw. Teilchencharakters von Licht verzichtet. Das vorliegende Unterrichtskonzept versteht sich als Erweiterung des Optikunterrichts der Sek. I. Dort bewährte didaktische Konzepte [1] werden nun für das restliche elektromagnetische Spektrum adaptiert und erweitert. Auch wenn das Thema „elektromagnetische Strahlung“ im aktuellen Physiklehrplan nicht explizit erwähnt wird, kann es im Anschluss an den Optikunterricht in der 4. Klasse gut eingeordnet werden. Das Thema wird voraussichtlich in den nächsten Jahren in den Physiklehrplan aufgenommen werden. Das Konzept baut dabei auf den von Plotz formulierten Basisideen zu elektromagnetischer Strahlung auf [2].

Das Konzept versucht, wo möglich, an Vorerfahrungen der Schüler*innen anzuknüpfen bzw. durch einfache Experimente im Unterricht Erfahrungen zu schaffen, auf denen das Lernen der Schüler*innen aufgebaut werden kann. Auf komplizierte Experimentieraufbauten und mathematischen Formalismus wird verzichtet. Die Eigenschaften elektromagnetischer Strahlung werden zuerst am bekannten Beispiel „Licht“ demonstriert, da die Schüler*innen so elektromagnetische Strahlung einfach beobachten und erfahren können. Als nächster Schritt wird mit Infrarotstrahlung gearbeitet, da die Schüler*innen diese Strahlung zwar noch aufgrund ihrer wärmenden Wirkung wahrnehmen können, dabei aber feststellen, dass sie für uns Menschen nicht sichtbar ist. Im nächsten Schritt wird mit UV-Strahlung gearbeitet – mit dieser lässt sich leicht im Unterricht experimentieren, sie eignet sich daher als Beispiel für eine Strahlungsart, die wir mit keinem unserer Sinnesorgane wahrnehmen können. Durch diese Reihenfolge werden die Schüler*innen im Alltag abgeholt und erfahren schrittweise, dass wir nur einen sehr kleinen Teil des elektromagnetischen Spektrums wahrnehmen können.

Das Konzept gliedert sich in sechs Themenbereiche, die insgesamt in einem Ausmaß von ca. sechs Unterrichtsstunden bearbeitet werden können. In der vorliegenden Handreichung wird zu Beginn jedes Themas eine kurze Einführung gegeben. Anschließend wird die Unterrichtssequenz schrittweise beschrieben. Formulierungen, die sich in Vorstudien als besonders lernwirksam erwiesen haben, werden kursiv dargestellt. Wir empfehlen die Verwendung dieser Formulierungen. Die Handreichung liefert eine fachliche Strukturierung inklusive geeigneter Erklärungen und Formulierungen, und weist aus, welche Schlüsselerfahrungen essentiell für den Lernprozess sind. Wie die Unterrichtssequenz methodisch ausgestaltet wird, bleibt dabei Ihnen als Lehrperson überlassen.

Das Konzept wurde in mehreren Forschungszyklen evaluiert und überarbeitet. Dabei wurden die Lernprozesse von einzelnen Schüler*innen sehr genau beobachtet und analysiert, um zu eruieren, welche Erklärungen, Formulierungen, Darstellungen und Erfahrungen lernförderlich sind. Anschließend wurde das Konzept von Lehrpersonen im eigenen Physikunterricht erprobt. Basierend auf diesen Erfahrungen erfolgte eine weitere Überarbeitung. Wie so oft in der Forschung kann das Projekt noch nicht als abgeschlossen betrachtet werden. Nichtsdestotrotz stellt es bereits in dieser Form eine hilfreiche Grundlage für die Gestaltung von Unterricht zu elektromagnetischer Strahlung in der Sekundarstufe I dar. Falls Sie das Konzept in Ihrem Unterricht einsetzen, würden wir uns über Ihre Erfahrungen und Verbesserungsvorschläge sehr freuen! Wenden Sie sich gerne an das AECC Physik. Ich hoffe, dass Ihnen die vorliegende Handreichung eine Stütze für die Gestaltung von Unterricht ist, und wünsche Ihnen viel Freude dabei dieses spannende Thema in Ihren Unterricht zu integrieren!



Abb. 1: Wärmelampe, bei der der Leuchtkörper durch eine Keramiklampe ersetzt wurde.



Abb. 2: UV-Taschenlampe und UV-Perlen, die sich durch UV-Strahlung verfärben.

Benötigte Materialien

Bei der Konzipierung wurde darauf geachtet, nur Materialien zu verwenden, die leicht erhältlich und kostengünstig sind:

- Lampen (z. B. Handytaschenlampe)
- Infrarotlampen, die kein sichtbares Licht emittieren¹ (vgl. Abb. 1)
- UV-Perlen² (vgl. Abb. 2)
- UV-Lampen³
- verschließbare Plastiksackerl (bzw. -Beutel)⁴, Alufolie, Papier

Kopiervorlagen, Abbildungen und weitere Materialien zum Unterrichtskonzept finden Sie unter <https://phaidra.univie.ac.at/o:1433698>. Weitere Materialien und Ideen für den Unterricht zu elektromagnetischer Strahlung finden Sie unter <https://aeccp.univie.ac.at/lehrer-innen/fuer-den-unterricht/elektromagnetische-strahlung/>. Sollten Sie den Unterricht zu einzelnen Strahlungsarten vertiefen wollen, finden Sie konkrete Vorschläge und Materialien in [2].

1 Einführung des Begriffs „elektromagnetische Strahlung“

Was ist elektromagnetische Strahlung? Der Begriff der Strahlung wird über zwei Eigenschaften eingeführt: Die hohe Ausbreitungsgeschwindigkeit sowie der Unterschied zu Materie. Dass es wichtig ist, den Unterschied zwischen Licht und Materie zu explizieren, ist eine Erkenntnis aus Forschung zur Optik [1]. Mit dieser „Definition“ kann Schüler*innen leicht und plausibel erklärt werden, dass es sich bei den verschiedenen, im elektromagnetischen Spektrum vertretenen Strahlungsarten um Strahlung handelt. Wir empfehlen, den Begriff „elektromagnetische Wellen“ zu vermeiden und auf die genannten Eigenschaften zu konzentrieren.

1.1 „Materie“

Zuerst sollte der Begriff „Materie“ geklärt werden. Die wenigsten Schüler*innen haben eine genaue Vorstellung, was unter diesem Begriff zu verstehen ist. Sie kennen es als Synonym zu „Stoffe“ oder vom Begriff „dunkle Materie“ („Ich glaube, das hat was mit dem Weltraum zu tun“). Die Schüler*innen können zu Beginn von der Lehrperson gefragt werden, ob sie diesen Begriff bereits kennen und was sie sich darunter vorstellen. Der Begriff wird anschließend von der Lehrperson geklärt:

Materie ist alles, was man anfassen kann – auch, was man theoretisch anfassen kann, wie den Mond zum Beispiel.

Diese Erklärung stammt aus der didaktischen Forschung zur Teilchenphysik [3]. Diese Erklärung soll an expliziten Beispielen erprobt werden – beispielsweise, in dem ein Tisch oder ein Stift angefasst wird. Wichtig ist es, dass den Schüler*innen klar wird, dass auch Gase und Flüssigkeiten Materie sind. Bei Gasen ist das Anfassen natürlich schwer – hier kann argumentiert werden, dass man Gase (wie beispielsweise Luft) in einen Luftballon „einsperren“ und so angreifbar machen kann (nachher kann nochmal darauf zurückgegriffen werden, dass das mit elektromagnetischer Strahlung nicht gelingt). Als zusätzliche Erklärung kann angeboten werden, dass Materie etwas ist, dass Raum einnimmt. Auf jeden Fall vermieden werden sollte die Formulierung „spüren“ (beispielsweise: „Man kann Luft zwar nicht so einfach anfassen, aber man spürt sie als Wind“), da die Schüler*innen sonst im späteren Verlauf der Unterrichtseinheit argumentieren können, dass man ja auch IR-Strahlung spüren kann. Um die Idee, was alles Materie ist, zu bestärken, bietet es sich an, die Schüler*innen zu fragen, was im Raum alles Materie ist. Dabei sollte auch die im Raum

1 Hier eignen sich Leuchtkörper aus Keramik, wie sie in Terrarien verwendet werden. Diese werden unter dem Begriff „Wärmelampe Keramik“ oder „Dunkelstrahler“ verkauft. Lampen mit 50 bis 75 W sind für den Einsatz sinnvoll. Für eine einfache Handhabung hat sich bewährt, in herkömmlichen „Wärmelampen“ den Leuchtkörper durch eine Keramikbirne zu ersetzen.

2 Perlen, die sich durch UV-Strahlung verfärben. Es gibt auch Perlen, die zu Leuchten beginnen – diese wurden bewusst aussortiert, um nicht auf den Effekt der Fluoreszenz eingehen zu müssen. Es hat sich bewährt, je 4-5 Perlen auf einem Faden als Kette auffädeln zu lassen – das können natürlich die Schüler*innen übernehmen. Bei Beschaffung größerer Mengen von UV-Perlen sinken die Kosten pro Perle dramatisch. Wir haben zuletzt 1.000 Perlen für ca. 20 Euro beschaffen können.

3 UV-Lampen mit Blaulichtfilter wären natürlich wünschenswert. Nachdem diese aber nicht leicht erhältlich sind, ist das Konzept auf herkömmliche UV-Taschenlampen, die auch sichtbares blaues Licht emittieren, ausgelegt. Es sollte darauf geachtet werden, nicht zu starke Lampen zu kaufen, da diese für die Augen unangenehm sein können. UV-Taschenlampen, wie sie für den Freizeitgebrauch verwendet werden, eignen sich hier besser als jene, die für die Detektion von Tierurin verkauft werden.

4 Hier haben sich Gefrierbeutel bewährt.

vorhandene Luft als auch ggf. Pflanzen benannt werden. Auch dass wir Menschen selbst aus Materie bestehen, ist an dieser Stelle wichtig zu betonen. Ansonsten könnte der Eindruck entstehen, dass es sich bei Materie nur um unbelebte Objekte handelt. Die Erklärung, dass Materie alles ist, was man anfassen kann, kann als Hefteintrag festgehalten werden. Das Wort „theoretisch“ ist dabei bewusst eingefügt, um unnötige – oft spitzfindige – Diskussionen zu vermeiden.

1.2 „Elektromagnetische Strahlung“

Am Anfang des Unterrichts zu EM-Strahlung wird der Begriff wie folgt eingeführt:

Elektromagnetische Strahlung ist etwas Anderes als Materie! Man kann sie nämlich nicht anfassen und sie hat auch keine Masse. Die zweite wichtige Eigenschaft ist, dass sie sich sehr schnell bewegt – mit Lichtgeschwindigkeit! Nichts ist schneller als Strahlung!

Das Wort „elektromagnetisch“ wird von Schüler*innen erfahrungsgemäß nicht hinterfragt. Es wird in unserem Konzept benutzt, um EM-Strahlung von Teilchenstrahlung (Alpha- und Beta-Strahlung), die aus Materie „besteht“, zu unterscheiden.

Die Erklärung wird von einer Demonstration anhand der bereits vertrauten Strahlungsart „Licht“ demonstriert. Als Überleitung eignet sich der folgende Satz:

Eine Art von Strahlung kennt ihr ja schon alle – das Licht!

Die Schüler*innen probieren zeitgleich mit der Lehrperson aus, dass Licht diese Eigenschaften erfüllt. Auch wenn es trivial erscheinen mag – es ist eine wichtige Erfahrung für die Schüler*innen zu erleben, dass sie Licht nicht anfassen können.

Experiment 1.2

Material: Lampe (z.B. Handytaschenlampe)

Die Hand wird in den Lichtkegel der Lampe gehalten und gezeigt, dass man das Licht nicht anfassen kann. Um die hohe Geschwindigkeit (Schnelligkeit) zu demonstrieren, wird die Lampe auf ein Objekt in einiger Entfernung, beispielsweise die Wand am anderen Ende des Raumes, gehalten. Die Lampe wird ein- und ausgeschaltet. Es wird beobachtet, dass das Licht ohne erkennbare Verzögerung, quasi sofort, ankommt, da sich Licht „so irrsinnig schnell bewegt“. Dieses Experiment sollte, wenn möglich, von allen Schüler*innen durchgeführt werden.

An dieser Stelle kann die Erklärung des Begriffs „elektromagnetische Strahlung“ im Heft festgehalten werden.

2 Empfänger und Pfeildarstellung

Im nächsten Absatz wird das aus der Optik bewährte Sender-Empfänger-Modell eingeführt: Vorgänge werden konsequent vom Sender der Strahlung zum Empfänger verfolgt. Dabei werden divergente (auseinandergehende) Pfeile zur Darstellung von Strahlung verwendet **[1]**. Die Richtung repräsentiert die Ausbreitungsrichtung, die divergente Form symbolisiert, dass sich die Strahlung im Raum ausbreitet bzw. dass Strahlungsbündel breiter werden. Auf eine farbige Darstellung wird bewusst verzichtet, um nicht Lernendenvorstellungen wie „IR ist rot“ und „UV ist blau“ zu verstärken. Die Strahlungsart wird in den Pfeil hineingeschrieben. Der Weg der Strahlung wird dabei meist von links nach rechts verfolgt, da dies der Leserichtung entspricht.

Im Rahmen dieses Abschnitts werden mit UV- und IR-Strahlung „neue“ Strahlungsarten eingeführt.

In der Optik macht die explizite Diskussion des Empfängers klar, dass das Licht in unsere Augen fallen muss, damit wir ein Objekt wahrnehmen können. Im Unterricht zu elektromagnetischer Strahlung ist dies ebenfalls sehr wichtig. Darüber hinaus spielt der Empfänger eine wichtige Rolle, da für die Durchführung von Experimenten der jeweils passende Empfänger für die jeweilige Strahlungsart gewählt werden muss. Insbesondere bei Experimenten mit UV- und IR-Strahlung neigen die Schüler*innen dazu, den Versuchsausgang nur anhand ihrer optischen Wahrnehmung zu beurteilen und vergessen die Verwendung des richtigen Empfängers. Wird diese Schwierigkeit beobachtet, so können mit dem Satz „Nur, weil du etwas nicht siehst, heißt es nicht, dass es nicht da ist!“⁵ die Schüler*innen daran erinnert werden, dass sie einen passenden Empfänger benutzen müssen.

⁵ Bei diesem Spruch handelt es sich um ein sogenanntes „kognitives Stoppschild“, mit dem die Schüler*innen davor gewarnt werden, in typische „Fallen“ zu tappen.

Unterstützt werden die Fehlvorstellungen „IR ist rot“ und „UV ist blau“ durch die Tatsache, dass die meisten Sender im Alltag zusätzlich zur Strahlung auch sichtbares rotes oder blaues Licht aussenden – auch aus praktischen Gründen, da man so leichter erkennen kann, ob die Lampe eingeschaltet ist oder nicht.⁶ Daher wird zu Beginn mit IR-Lampen gearbeitet, die kein sichtbares Licht verwenden. Um die Assoziationen mit Farben zu vermeiden, empfehlen wir, konsequent von UV und IR anstatt von „ultraviolett“ und „infrarot“ zu sprechen.

2.1 Einführung der Darstellungsform

Es wird erneut an der bekannten Strahlungsart „Licht“ angeknüpft. Es ist nicht nur jene Strahlungsart, die die Schüler*innen am besten kennen, sie ist auch die einzige, die mit den Augen wahrnehmbar ist:

Licht ist auch eine ganz besondere Strahlungsart, denn sie ist die einzige, die wir mit unseren Augen wahrnehmen können! Alle anderen Strahlungsarten können wir nicht mit den Augen wahrnehmen. Unsere Augen sind sogenannte „Empfänger“ für Licht.

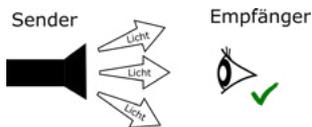


Abb. 3: Strahlungsvorgang

Parallel zur folgenden Erklärung wird die Zeichnung in Abb. 3 entweder als Zeichnung an der Tafel oder via Beamer angefertigt. Die Abbildung steht in animierter Form als PowerPoint-Präsentation zur Verfügung. Es ist wichtig, dass die Schüler*innen üben, solche Zeichnungen selbst anzufertigen, daher zeichnen die Schüler*innen die Darstellung parallel ins Heft.⁷

Für elektromagnetische Strahlung gilt immer folgendes: Es gibt immer einen Sender, von dem die Strahlung in alle möglichen Richtungen ausgesendet wird. In unserem Beispiel hier ist das eine Taschenlampe. Der Sender strahlt in alle möglichen Richtungen. Strahlung zeichnen wir als Pfeile, die breiter werden, um die Ausbreitung darzustellen. In die Pfeile schreiben wir „Licht“ hinein. Um die Strahlung wahrnehmen zu können, braucht man einen Empfänger. Die Strahlung muss auf den Empfänger strahlen, in diesem Fall die Augen. Die Augen können das Licht dann wahrnehmen – deshalb mache ich einen Haken zum Auge!“

Es ist empfehlenswert, einen Namen für diese Darstellungsform einzuführen, um im späteren Verlauf genaue Instruktionen zu ermöglichen (bittet man die Schüler*innen, eine Zeichnung anzufertigen, zeichnen sie ansonsten teilweise eine Skizze des Versuchsaufbaus). Wir empfehlen, von „wir zeichnen den Strahlungsvorgang“ zu sprechen.

2.2 Einführung IR-Strahlung

Experiment 2.2

Material: IR-Lampen mit Keramikstrahler

Die Schüler*innen sollen nun mit einer Strahlung arbeiten, die sie nicht sehen, aber spüren können – IR-Strahlung. Die Schüler*innen erhalten eine IR-Lampe. Diese sollen angesteckt (und falls ein Schalter vorhanden ist, eingeschaltet) werden.⁸ Es dauert etwas, bis die Lampen auf Betriebstemperatur sind. Die Schüler*innen sollten darauf hingewiesen werden, dass sie die Lampe nicht berühren sollen.

Den Schüler*innen wird gesagt, dass es sich bei dieser Lampe um einen Sender für IR-Strahlung handelt. Es handelt sich dabei nicht um Licht, daher wird ein anderer Empfänger benötigt. Die Schüler*innen sollen ihre Hand in etwas Abstand vor den Sender halten. Es wird erklärt, dass IR-Strahlung eine wärmende Wirkung auf unsere Haut hat, und dass wir daher unsere Hand als Empfänger für IR-Strahlung benutzen können.⁹

An dieser Stelle sollte auch thematisiert werden, woran man erkennt, dass es sich hierbei um Strahlung handelt. Dazu kann wieder demonstriert werden, dass man die Strahlung nicht anfassen kann. Um die Geschwindigkeit zu demonstrieren, kann die Lampe von der Hand weg- und wieder hingehalten werden – man kann erkennen, dass man die wärmende Wirkung sofort spürt, es gibt keine wahrnehmbare zeitliche Verzögerung.

6 Diese Formulierung hat sich auch bewährt um den Schüler*innen verständlich zu machen, warum Infrarotlampen rotes Licht aussenden.

7 Es hat sich gezeigt, dass, wenn Schüler*innen mit der Darstellungsform gut vertraut sind, dies sehr hilfreich für den weiteren Verlauf des Konzeptes ist. Wenn Schüler*innen unsicher sind, wie sie ein Experiment durchführen sollen, oder wie sie die Ausgänge der Experimente interpretieren sollen, hilft es ihnen, den Strahlungsvorgang aufzuzeichnen.

8 Es bietet sich hier auch an, die Schüler*innen die Lampen einfach in Betrieb nehmen zu lassen. Oftmals sind die Schüler*innen irritiert, dass sie nichts mit den Augen sehen können. Schüler*innen wissen zwar oftmals, dass IR-Strahlung nicht sichtbar ist, gleichzeitig verbinden sie Strahlung aber immer mit „etwas leuchtet“. Es kann daher ein willkommener Konflikt sein, dass sie bei diesen Lampen, entgegen ihrer Erwartung, nichts mit den Augen erkennen können.

9 Für den Fall, dass eine Infrarotkamera zur Verfügung steht, kann diese natürlich als Empfänger für IR-Strahlung verwendet werden. Beachten Sie dann aber die didaktischen Hinweise zum Einsatz von Infrarotkameras in Anhang A am Ende dieser Handreichung.

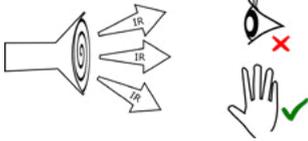


Abb. 4: Strahlungsvorgang IR

Der Strahlungsvorgang wird aufgezeichnet (Abb. 4), die Schüler*innen zeichnen diesen wieder parallel in ihr Heft. Hierbei wird auch zuerst das Auge als Empfänger eingezeichnet und mit einem roten X markiert, dass die Augen diese Strahlung nicht wahrnehmen können. („Immer, wenn wir eine Strahlung sehen können, ist es Licht – alle anderen Strahlungsarten sind nicht sichtbar“).

2.3 Die Sonne als Sender

Im nächsten Schritt experimentieren die Schüler*innen mit UV-Strahlung. Die UV-Lampen geben auch sichtbares, blaues Licht ab. Es wird daher am bekannten Beispiel „Sonne“ erarbeitet, dass Sender auch verschiedene Strahlungsarten gleichzeitig aussenden können. In der Zeichnung wird für jede Strahlungsart mindestens ein Pfeil gezeichnet und benannt.¹⁰

Die Schüler*innen werden gefragt, welche Strahlungsarten von der Sonne ausgesendet werden. Bei ihren Antworten wird nachgefragt, woran sie das erkennen können: Licht, da es mit den Augen wahrnehmbar ist; IR-Strahlung – hält man seine Hand in die Sonne, spürt man eine wärmende Wirkung. Eventuell kommt an dieser Stelle bereits UV-Strahlung; vermutlich wird als Nachweis der Sonnenbrand genannt. Anhand eines Sonnenbrandes kann natürlich erst im Nachhinein beurteilt werden, ob ein Sender UV-Strahlung ausgesendet hat. Sollte UV-Strahlung nicht von den Schüler*innen genannt werden, wird es von der Lehrperson ergänzt. Die Schüler*innen können darauf hingewiesen werden, dass sie von dieser Strahlungsart vermutlich schon in Zusammenhang mit Sonnenschutz(-mitteln) oder Solarien gehört haben. UV-Strahlung ist eine Strahlung, die wir nicht wahrnehmen können – wir können sie weder mit den Augen sehen noch mit unserer Haut (sofort) spüren. Man braucht also einen UV-Empfänger. Als solche können UV-Perlen verwendet werden. Diese verfärben sich, wenn sie mit UV-Strahlung bestrahlt werden. Zur Demonstration können die UV-Perlen aus dem Fenster gehalten bzw. kurz auf die äußere Fensterbank gelegt werden. Auch bei indirektem Sonnenlicht verfärben sich die Perlen. (Bei starker Bewölkung funktioniert es leider nicht.)

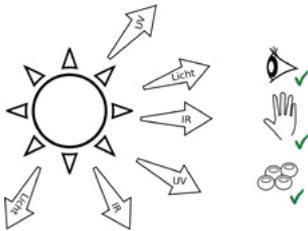


Abb. 5: Es wird eingezeichnet, dass die Sonne UV, IR und Licht (in alle möglichen Richtungen) aussendet. Alle drei verwendeten Empfänger empfangen Strahlung. Die Augen nehmen das Licht wahr, die Hand die IR-Strahlung und die UV-Perlen die UV-Strahlung.

Jedem* jeder Schüler*in werden UV-Perlen ausgeteilt.¹¹ Der Strahlungsvorgang wird wieder aufgezeichnet (Abb. 5).

2.4 Erkennen von Strahlungsarten

Experiment 2.4

Material: UV-Lampen, UV-Perlen

Den Schüler*innen werden die UV-Taschenlampen ausgeteilt. Dabei wird darauf geachtet, dass diese neutral als „Taschenlampen“ oder „Lampen“ bezeichnet werden. **Die Schüler*innen müssen darauf hingewiesen werden, dass sie sich mit diesen Lampen nicht in die Augen leuchten dürfen.** Am besten ist es, den Lichtkegel am Tisch als Nachweis für Licht zu verwenden. Die Aufgabe an die Schüler*innen lautet herauszufinden, welche Strahlungsart bzw. Strahlungsarten diese Lampe aussendet und den Strahlungsvorgang wie gehabt aufzuzeichnen. Oftmals vergessen die Schüler*innen auf andere Empfänger als ihre Augen. Man kann sie während des Arbeitens darauf hinweisen, dass sie überlegen sollen, welche Empfänger sie schon kennengelernt haben und welche Strahlungsarten man damit nachweisen kann. Mit dem Satz: „Nur weil du es nicht sehen kannst, heißt es nicht, dass es nicht da ist.“ können die Schüler*innen daran erinnert werden, dass sie das Experiment nicht nur anhand ihrer Augen beurteilen können.

Diese Aufgabe steht auch in Form eines virtuellen Experimentes zur Verfügung.

Musterlösung: Anhand der Augen erkennen die Schüler*innen, dass die Lampe (blaues) Licht ausstrahlt. Sie können mit ihrer Hand keine IR-Strahlung wahrnehmen.¹² Anhand der Verfärbung der UV-Perlen kann man erkennen, dass die Taschenlampen UV-Strahlung aussenden. Die zugehörige Zeichnung sollte wie Abb. 4 aussehen.¹³

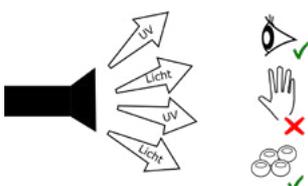


Abb. 6: Strahlungsvorgang bei einer UV-Taschenlampe

- 10 Von den Schüler*innen wurden teilweise alle auftretenden Strahlungsarten in einen Pfeil geschrieben. Davon wird abgesehen, da mit unterschiedlicher Pfeilgröße dargestellt werden kann, wenn ein Sender von einer Strahlungsart mehr als von einer anderer Strahlungsart aussendet. Außerdem tendieren Schüler*innen dazu, dem „Sonnenlicht“ auch sonnenbrandverursachende Wirkung zuzuschreiben – daher wird Wert daraufgelegt, die verschiedenen Strahlungsarten klar zu trennen.
- 11 Eine besondere Freude haben Schüler*innen, wenn sie die Perlen behalten dürfen – sie können z. B. am Rucksack oder Schlüsselbund befestigt werden. Damit können die Schüler*innen untersuchen, in welchen Situationen sich die Perlen verfärben – z. B. auch wenn man im Park im Schatten sitzt!
- 12 Im späteren Verlauf des Unterrichtskonzepts wird auch thematisiert, dass alles IR-Strahlung aussendet. An dieser Stelle sollte dies aber noch nicht diskutiert werden. Sollten Schüler*innen dies an dieser Stelle ansprechen, kann natürlich geklärt werden, dass die Lampe ein wenig IR-Strahlung aussendet, dies aber in der Regel zu wenig ist, als dass man es mit der Hand spüren kann (in diesem Fall kann ein kleiner IR-Pfeil eingezeichnet werden).
- 13 Bei leistungsstarken UV-Lampen kann ev. auch Wärme gespürt werden. Sollte dies von den Schüler*innen angemerkt werden, so wird dies als Nachweis für emittierte IR-Strahlung verwendet und in dem Fall bei Abb. 6 natürlich auch IR-Strahlung eingezeichnet.

3 Interaktion mit Materie

Elektromagnetische Strahlung kann von Materie reflektiert (bzw. gestreut), absorbiert und transmittiert werden. Diese vereinfachte Betrachtungsweise der Interaktion von Strahlung mit Materie stammt aus [2]. Betrachtet man, wie die verschiedenen Strahlungsarten mit Materie interagieren, lässt sich beispielsweise die Entstehung von Röntgenbildern erklären, sowie die Wirkung auf den menschlichen Körper beschreiben. In diesem Teil des Unterrichtskonzepts wird erarbeitet, dass die Wechselwirkung von Strahlung mit Materie sowohl strahlungs- als auch materialabhängig ist. Absorbierte Anteile von Strahlung werden mit gewellten Pfeilen mit abgeschnittener Spitze dargestellt [1]. Als vereinfachte Variation der Begriffe können die Wörter „zurückstrahlen“, „aufnehmen“ und „durchstrahlen“ verwendet werden, allerdings sind die Schüler*innen mit dem Wort „reflektieren“ und „absorbieren“ (vermutlich aus dem Optikunterricht) vertraut. Ob für transmittieren das Wort „durchstrahlen“ verwendet oder das Fachwort eingeführt wird, bleibt der Lehrperson überlassen. Es ist durchaus sinnvoll, für alle drei Begriffe je beide Worte anzubieten. Falls im vorangegangenen Optikunterricht der Begriff „Streuung“ verwendet worden ist, kann dieser statt „Reflexion“ auch für EM-Strahlung verwendet werden.

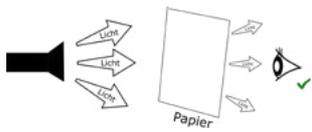


Abb. 7: Transmission von Licht

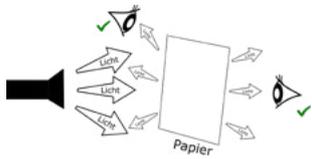


Abb. 8: Auch von der anderen Seite kann mit dem Empfänger Licht wahrgenommen werden – es wird also ein Teil reflektiert.

3.1 Einführung von Reflexion, Absorption und Transmission

Was passiert, wenn man Materie zwischen Sender und Empfänger hält?

Das folgende Experiment kann von den Schüler*innen selbstständig durchgeführt werden:

Experiment 3.1 a)	Material: Taschenlampe (z. B. Handytaschenlampe), ein Blatt Papier Es wird demonstriert, dass man weiterhin Licht erkennen kann, wenn man ein Stück Papier zwischen den Sender (die Lampe) und den Empfänger (unsere Augen) hält, allerdings weniger als vorher.
------------------------------	--

Es wird wieder gemeinsam mit den Schüler*innen der Strahlungsvorgang gezeichnet (Abb. 7). Dass nun weniger Licht zum Auge gelangt, wird durch einen kleineren Pfeil dargestellt.

Experiment 3.1 b)	Das Papier wird von der anderen Seite betrachtet. Man kann auch von hier mit den Augen Licht wahrnehmen, d. h. ein Teil des Lichts wurde zurückgestrahlt/reflektiert/gestreut.
------------------------------	--

Die Zeichnung wird ergänzt (Abb. 8)

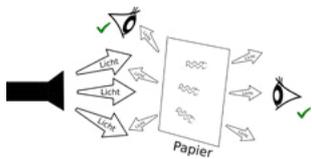


Abb. 9: Darstellung von Absorption als geschwungene Pfeile

Anschließend wird erklärt, dass auch ein Teil des Lichts vom Papier aufgenommen, also absorbiert, wird, und dass dies mit geschwungenen Pfeilen dargestellt wird (Abb. 9 & Abb. 10). Um dies zu demonstrieren, bietet sich an, sukzessive mehr Papier zwischen Sender und Empfänger zu halten. Die Schüler*innen können dann beobachten, dass sich am reflektierten Anteil nichts ändert, während immer weniger Licht transmittiert wird, bis schließlich gar kein Licht mehr durch den Papierstapel kommt. Erfahrungsgemäß ist es dann für die Schüler*innen einleuchtend, dass die Strahlung absorbiert worden sein muss.

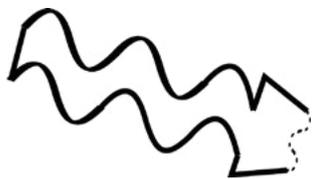


Abb. 10: Absorption wird mit geschwungenen Pfeilen mit abgeschnittener Spitze dargestellt.

3.2 Abhängigkeit von Strahlungsart und Materie

Den Schüler*innen wird folgendes erklärt:

Welche Anteile der Strahlung reflektiert, absorbiert oder transmittiert werden, hängt sowohl von der Strahlungsart als auch von der Materie ab.

Dazu werden nun selbstständig Experimente durchgeführt.

Experimente 3.2. a-d)	Material: IR-Lampen (genügend Anzahl an Steckdosen!), Gefrierbeutel und Verschlüsse, Alufolie, Zugang zu einer Wasserleitung Durchführung: Siehe Arbeitsblatt 3.2. Die Schüler*innen vergessen oftmals, auch die Empfänger einzuzichnen. Sie sind manchmal unsicher, wo der Empfänger platziert werden muss, um Reflexion zu untersuchen. Hier hilft es, wenn man die Schüler*innen auffordert, den Strahlungsvorgang aufzuzeichnen – anhand der Zeichnung können sie nämlich meist Reflexion problemlos einzeichnen. So wird klar, wo der Empfänger platziert werden muss. Achtung: Den Plastikbeutel nicht zu nahe an die IR-Lampe halten, da er schmelzen kann.
----------------------------------	--



Abb. 11: Bild einer geröntzten Hand, © Nevit Dilmen, CC BY-SA 3.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>, via Wikimedia Commons

3.3 Interpretation von Röntgenbildern

Schüler*innen wissen meist nicht, wie ein Röntgenbild entsteht. Dass Knochen auf einem Röntgenbild weiß erscheinen, erklären sie oft damit, dass die Knochen Röntgenstrahlung reflektieren. (Tatsächlich absorbieren Knochen Röntgenstrahlung).

Mithilfe von Transmission, Reflexion und Absorption kann nun das Zustandekommen eines Röntgenbildes erklärt werden. Dazu wird den Schüler*innen zuerst Abb. 11¹⁴ gezeigt:

Die Schüler*innen werden gefragt, ob sie schon einmal geröntgt wurden. Die meisten Schüler*innen wissen zumindest, dass sie schon bei einer Zahnuntersuchung geröntgt wurden. Es kann weiter gefragt werden, ob sie wissen (bzw. eine Vermutung haben), wie das Bild beim Röntgen zustande kommt. Es wird erklärt, dass beim Röntgen die sogenannte Röntgenstrahlung verwendet wird – dabei handelt es sich auch um elektromagnetische Strahlung. Das erkennt man auch daran, dass man die Röntgenstrahlung bei einer Röntgenuntersuchung nicht anfassen kann. Generell ist auch Röntgenstrahlung eine Strahlung, die wir mit keinem unserer Sinne wahrnehmen können. Als Empfänger dient Röntgenfolie oder eine Röntgenkamera. Es wird erklärt (und mit den Schüler*innen gemeinsam aufgezeichnet, siehe Abb. 12), dass ein Röntgengerät ein Sender für Röntgenstrahlung ist. Röntgenfolie ist weiß – wird sie mit Röntgenstrahlung angestrahlt, so verfärbt sie sich schwarz. Bei den Vorerhebungen ist es in Einzelfällen passiert, dass die Schüler*innen das Röntgenbild mit einer Live-Aufnahme der Hand verwechselt haben – auf diese mögliche Fehlvorstellung ist bei den Antworten der Schüler*innen zu achten.

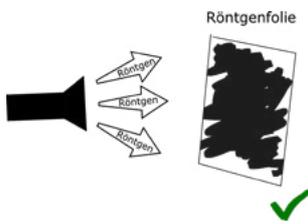


Abb. 12: Röntgenfolie als Empfänger für Röntgenstrahlung

Anschließend wird den Schüler*innen das Aufgabenblatt 3.3 ausgeteilt (siehe Abb. 13).

Den Schüler*innen kann zuerst Zeit gegeben werden zu überlegen, warum Knochen weiß und das Gewebe grau erscheint. Dann folgt die Erklärung der Lehrperson, wobei gleichzeitig an der Tafel bzw. am Beamer mit den Schüler*innen die Strahlung und das entstehende Röntgenbild aufgezeichnet wird. Zuerst wird die Strahlung betrachtet, die neben dem Körper vorbeigeht. Die Strahlung trifft ungehindert auf die Röntgenfolie und färbt diese schwarz (vgl. Abb. 14).

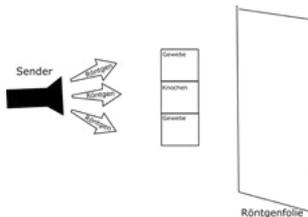


Abb. 13: Aufgabe Röntgen

Die Knochen erscheinen weiß bis hellgrau – das bedeutet, dass dort, wo die Knochen sind, (fast) keine Röntgenstrahlung auf die Röntgenfolie fällt – Knochen absorbieren einen Großteil der Strahlung, nur ein kleiner Teil wird durchgestrahlt/transmittiert.

Das Gewebe erscheint am Röntgenbild grau. Das bedeutet, dass Strahlung durch das Gewebe gestrahlt/transmittiert wird, aber auch ein Teil der Strahlung absorbiert wird.

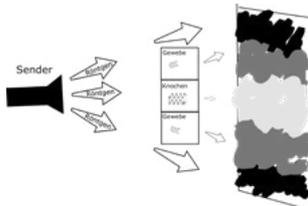


Abb. 14: Musterlösung zur Röntgenaufgabe

4 Das elektromagnetische Spektrum

Jetzt wird das elektromagnetische Spektrum eingeführt. Dabei wird eine sehr einfache und klare Darstellung verwendet. Das Spektrum wird vertikal dargestellt, wobei am oberen Ende Strahlung mit kleiner Wellenlänge abgebildet wird. Wellenlänge wird dabei als abstrakte Größe eingeführt. Eine genauere Ausführung zur Diskussion, ob Wellenlänge, Energie oder Frequenz besser zur Charakterisierung von elektromagnetischer Strahlung geeignet ist, findet sich in Anhang B am Ende der Handreichung. Das Spektrum wird insbesondere zur Diskussion der Gefährlichkeit von Strahlung in Abschnitt 6 verwendet. Als ordnende Größe wird die Wellenlänge verwendet, da sie vielen Schüler*innen bereits ein Begriff ist. Bei der Benennung der verschiedenen Strahlungsarten wird der Begriff „Welle“ vermieden und stattdessen konsequent das Wort „Strahlung“ verwendet.¹⁵ Radiowellen werden stattdessen als „Rundfunkstrahlung“ benannt, Mikrowellen als „Mikrostrahlung“.

4.1 Wellenlänge und Spektrum

Mit den Schüler*innen wird besprochen, dass sie ja nun bereits gesehen haben, dass es verschiedene Strahlungsarten gibt, die unterschiedliche Empfänger brauchen und unterschiedlich mit Materie wechselwirken. Es wird erklärt, dass es eine Eigenschaft gibt, die Wellenlänge heißt, durch die sich elektromagnetische Strahlung unterscheidet - verschiedene Strahlungsarten haben

¹⁴ Im Unterrichtskonzept liegt der Fokus auf schwarz-weiß-Bildern, wie man es aus medizinischen Kontexten kennen. Röntgenbilder, die mit Fluoreszenzschirmen und Schattenbildung entstehen, werden bewusst nicht gezeigt, um Verwirrung entgegenzuwirken. Das Ziel ist, dass die Schüler*innen das Zustandekommen von Röntgenbildern im medizinischen Kontext nachvollziehen können.

¹⁵ Es ist Ihnen vielleicht auch schon mal aufgefallen, dass von elektromagnetischer Strahlung mit kleiner Wellenlänge als „Strahlung“, bei Strahlung mit großer Wellenlänge von „Wellen“ gesprochen wird – nur beim Mobilfunk ist wieder von „Handystrahlung“ die Rede. Es wird daher ganz bewusst ein Begriff konsistent für das gesamte Spektrum verwendet. Da das Wellenmodell nicht Teil des Lehrplans der Sekundarstufe I ist, werden alle Teile des elektromagnetischen Spektrums als „Strahlung“ bezeichnet.

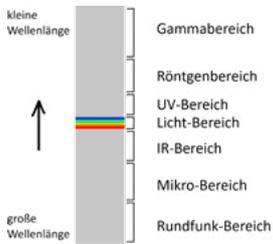


Abb. 15: Abbildung Spektrum

unterschiedliche Wellenlängen. Die Abbildung des Spektrums wird an die Schüler*innen ausgeteilt (Arbeitsblatt 4.1).

Es wird erklärt, dass im Spektrum die Strahlungsarten nach ihrer Wellenlänge geordnet werden: Unten befinden sich die Strahlungsarten mit großer Wellenlänge, oben die mit kleiner Wellenlänge. Strahlungsarten mit ähnlich großen Wellenlängen werden zu Bereichen zusammengefasst – das wird durch die Klammern rechts in der Abbildung dargestellt. Die Bereiche werden im Folgenden mit den Schüler*innen gemeinsam benannt (vgl. Abb. 15). Die Schüler*innen können hier gefragt werden, von welchen Strahlungsarten sie schon gehört haben, und wo sie diese im Spektrum vermuten. Wird nukleare („radioaktive“) Strahlung genannt, kann man dazusagen, dass diese (mit Ausnahme der Gammastrahlung) aus Materie besteht und daher keine elektromagnetische Strahlung ist.

4.2 Der Rundfunk-Bereich

Da Schüler*innen bei dem Wort „Radiobereich“ meist an Radioaktivität denken, wird dieser Bereich im Unterrichtskonzept als Rundfunk-Bereich bezeichnet. Die Schüler*innen haben mit der Übertragung von Radio- und Fernsehprogrammen nur mehr wenig Erfahrung, da Musik und Film Großteiles über das Internet bezogen wird. Das Radio kennen sie höchstens noch aus dem Auto.

Mit den Schüler*innen wird an dieser Stelle besprochen, dass Sendemasten Radio- und Fernsehprogramme aussenden. Radios und Fernseher besitzen Empfänger für Rundfunk-Strahlung und können das gesendete Signal in Bild und Ton umwandeln. Manche Schüler*innen glauben dann, dass man Rundfunkstrahlung hören kann – darauf ist bei den Aussagen, welche die Schüler*innen tätigen, zu achten.¹⁶ Um den Schüler*innen verständlich zu machen, dass es sich bei Rundfunkstrahlung um elektromagnetische Strahlung handelt, kann auf die Erklärung des Strahlungsbegriffes zurückgegriffen werden: Sie ist nicht fassbar und unglaublich schnell. Die hohe Geschwindigkeit kann am Beispiel Live-Übertragung plausibel gemacht werden.

4.3 Der Mikro-Bereich

Dass Daten kabellos übertragen werden können, begegnet uns zwar dauernd im Alltag, die meisten Schüler*innen scheinen sich darüber aber noch keine Gedanken gemacht zu haben. Dies kann als Anlass genommen werden, um darüber zu sprechen, dass die Informationen beim Telefonieren oder beim mobilen Internetsurfen mit EM-Strahlung aus dem Mikrobereich erfolgt: Die Information wird über Strahlung an den nächsten Handymasten gesendet bzw. vom Handymasten ans Handy. Die hohe Ausbreitungsgeschwindigkeit von Strahlung macht es möglich, Gespräche ohne merkbare Verzögerung über große Distanzen zu führen.

4.4 Der IR-Bereich

Diese Strahlungsart wurde in den vorangegangenen Einheiten bereits behandelt. Nun kann der Name dieser Strahlung erklärt werden: IR steht für infrarot, was übersetzt „unter rot“ bedeutet, weil sich dieser Strahlungsbereich im Spektrum unterhalb des roten Lichts befindet. Die Namensklärung hilft Schüler*innen oft als Gedächtnisstütze, um sich die Position dieser Strahlungsart im Spektrum zu verdeutlichen (und damit auch die Unterscheidung zum Licht-Bereich).

4.5 Der Licht-Bereich

Dieser Bereich ist bereits aus der Optik bekannt. Für Schüler*innen ist es oftmals interessant zu sehen, wie klein der Bereich des elektromagnetischen Spektrums ist, den wir mit den Augen wahrnehmen können.

4.6 Der UV-Bereich

Analog wie beim IR-Bereich kann nun erklärt werden, dass UV für „ultraviolett“ steht, was so viel wie „über dem Violetten“ bedeutet, da es sich im Spektrum über dem blauen Licht befindet.

¹⁶ Hier kann die relativ geringe Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schall als Argument herangezogen werden.

4.7 Der Röntgenbereich

Auch Röntgenstrahlung wurde bereits thematisiert – sie hat eine kleine Wellenlänge und schließt im Spektrum an den UV-Bereich an.

4.8 Gammabereich

Der Bereich mit der kleinsten Wellenlänge. Sollten die Schüler*innen diesen Begriff bereits in Zusammenhang mit Radioaktivität kennen, kann natürlich thematisiert werden, dass Gammastrahlung u.a. bei radioaktiven Zerfällen frei wird.¹⁷ Bei radioaktiven Zerfällen werden auch Alpha- und Betastrahlung ausgestrahlt, allerdings handelt es sich dabei um Teilchenstrahlung, also um Materie, und nicht um elektromagnetische Strahlung.

5 Strahlung ist überall!

Nachdem wir die meisten Strahlungsarten mit keinem unserer Sinnesorgane wahrnehmen können, ist den meisten Schüler*innen nicht bewusst, dass wir ständig elektromagnetischer Strahlung ausgesetzt sind. Diese Tatsache ist für die meisten Schüler*innen sogar sehr überraschend und spannend!

5.1 Vermutungen aufstellen

Zuerst sollen die Schüler*innen einzeln ihre Vermutungen zur Frage, welche Strahlungsarten uns im Alltag begegnen, festhalten (Arbeitsblatt 5.1). Die zweite Spalte bleibt fürs Erste leer.

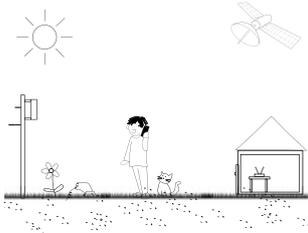


Abb. 16: In diese Abbildung wird nach und nach EM-Strahlung eingezeichnet

5.2 Erarbeitung anhand einer Abbildung

Anschließend werden auf der Zeichnung am Arbeitsblatt (Abb. 16) die verschiedenen Sender und die Strahlungsarten, die sie aussenden, eingezeichnet. Die Reihenfolge, in der die unterschiedlichen Sender besprochen werden, ist beliebig – hier können auch die Schüler*innen gefragt werden, was sie vermuten, warum die Gegenstände abgebildet sind.

Welche Strahlungsarten die Sonne aussendet, wissen die Schüler*innen bereits aus 2.3. Die Sonne sendet Licht, IR- und UV-Strahlung aus.¹⁸

Es wird weiter erklärt, dass Strahlung aus dem Rundfunkbereich für die Übertragung von Fernseh- und Radioprogrammen verwendet. Sie wird von Satelliten auf die Erde gesendet oder durch Sendemasten verbreitet. Es kann mit den Schüler*innen besprochen werden, dass überall, wo sie mit einem Radio ein Radioprogramm empfangen können, gerade Strahlung aus dem Rundfunk-Bereich „hinstrahlt“! Falls die Schüler*innen Orte nennen, wo man einen schlechten Empfang hat (z. B. in einem Tunnel beim Autofahren), kann man hier auch besprechen, dass das eine Folge davon ist, dass die Strahlung von Materie absorbiert oder reflektiert wird und daher nicht genug Strahlung zum Empfänger (zum Radio) gelangt. Dazu kann ggf. auch wieder der Strahlungsvorgang aufgezeichnet werden.

Als nächstes wird besprochen, dass die Informationsübertragung beim Handy, sowohl das Telefonieren als auch das Surfen im Internet, mittels Strahlung aus dem Mikrobereich funktioniert. Damit Informationen zu unserem Handy gelangen, wird von einem Handymast Strahlung gesendet (und vom Handy empfangen). Um Informationen zu verschicken, strahlt das Handy Mikrostrahlung ab (der Mast ist dann der Empfänger). Es ist an dieser Stelle empfehlenswert anzusprechen, dass dann die Informationen zu großen Teilen über Kabel weitergeleitet werden.¹⁹ Erfahrungsgemäß wissen Schüler*innen nicht, wie ein Handymast aussieht, weshalb Bilder von Handymasten hergezeigt werden sollten. Es bietet sich an, den Schüler*innen die Aufgabe zu geben, in ihrem Alltag nach Handymasten Ausschau zu halten und diese ggf. mittels Foto festzuhalten.

17 Es wird ganz bewusst nicht von „radioaktiver Strahlung“ gesprochen, da die Strahlung selbst ja nicht radioaktiv ist [4].

18 Genauer gesagt sendet die Sonne aller Strahlungsarten aus, allerdings werden die restlichen Strahlungsarten von der Atmosphäre absorbiert. Auch ein Großteil der ausgesendeten IR-Strahlung wird absorbiert. Es ist nicht vorgesehen, dies an der Stelle zu explizieren – falls gewünscht, kann man natürlich die Atmosphäre einzeichnen und die Absorption der anderen Strahlungsarten als gewellte Pfeile darstellen.

19 Es ist den Schüler*innen meist nicht bewusst, dass die Informationsübertragung bei Internet und Telefonieren großteils über Kabel funktioniert, und dass zwischen Kontinenten Kabel am Meeresboden gelegt sind. Die Schüler*innen nehmen oftmals fälschlicherweise an, das Internet und Mobiltelefonie, ähnlich wie Radio und Fernsehen, über Satelliten geschieht.

WLAN-Router sind ebenfalls Sender (und Empfänger) für Strahlung aus dem Mikro-Bereich. Generell kann gesagt werden, dass kabellose Informationsübertragung immer mit elektromagnetischer Strahlung funktioniert – z. B. auch Bluetooth (ebenfalls Mikro-Bereich).

Alles, was Materie ist, sendet IR-Strahlung aus. Auch wir Menschen senden IR-Strahlung aus! Die Idee, dass auch wir als Menschen Strahlung aussenden, überrascht die meisten Schüler*innen. Als kleines Nachweisexperiment können die Schüler*innen ihre Hände knapp vor die Wangen halten – so kann man die abgegebene IR-Strahlung auch spüren.²⁰ Schüler*innen haben teilweise Probleme zu akzeptieren, dass auch unbelebte Objekte Strahlung emittieren. Dass ein Stein IR-Strahlung emittiert, versuchen Schüler*innen teilweise so zu argumentieren, dass die Sonne den Stein erwärmt und er deshalb strahlt. Um zu verdeutlichen, dass alles strahlt, kann folgendes gemacht werden:

- Die Schüler*innen werden gebeten, Dinge zu nennen, die keine elektromagnetische Strahlung aussenden. Es soll herausgearbeitet werden, dass sie keine finden können.
- Die Schüler*innen sollen überlegen, wie man einen Raum bauen könnte, in dem keine Strahlung vorhanden ist. Dabei sollte herauskommen, dass man mit verschiedenen Materialien elektromagnetische Strahlung natürlich abschirmen kann, aber das ja auch diese Materialien wiederum IR-Strahlung emittieren!
- Sollte eine Infrarotkamera (ein „IR-Empfänger“) zur Verfügung stehen, kann man zeigen, dass auch ein kalter Stein in einem dunklen Raum IR-Strahlung emittiert, die vom IR-Empfänger empfangen werden kann.²¹

Schüler*innen scheinen teilweise Probleme mit dem Satz „alles sendet Strahlung aus“ zu haben, weil sie es gewohnt sind, dass es immer eine Ausnahme gibt.



Abb. 17: Mögliche Lösung

Gammastrahlung wird in geringen Mengen von Boden ausgesendet – z. B. von Granit. Deshalb ist man in Gebieten mit granithaltigem Boden (in Österreich beispielsweise das Waldviertel) mehr Gammastrahlung ausgesetzt.

Röntgenstrahlung begegnen wir im Alltag eigentlich nur bei Röntgenuntersuchungen (Krankenhaus, Zahnärzt*in) oder bei der Gepäckkontrolle im Flughafen.

Wie das Bild im Anschluss aussehen kann, ist in Abb. 17 dargestellt.

Nun werden die Schüler*innen gebeten, die Tabelle von vorher nochmals anzusehen und die zweite Spalte selbstständig auszufüllen (außer bei Röntgenstrahlung sollte überall ein ✓ markiert werden, außer es wird in der Klasse ausgehandelt, dass eine Röntgenuntersuchung als alltäglich interpretiert werden kann.)

Oftmals argumentieren Schüler*innen, dass ja auch alle Objekte Licht abgeben – insbesondere, wenn sie im Optikunterricht zuvor die Begriffe Selbst- und Zwischensender gelernt haben. Damit haben die Schüler*innen natürlich recht – alle Objekte sind Zwischensender für Licht. Dies kann entweder so aufgelöst werden, dass noch mehr Lichtpfeile eingezeichnet werden. Alternativ kann auch argumentiert werden, dass in dieser Zeichnung nur Selbst-Sender gezeichnet werden, da die Grafik sonst (noch) unübersichtlich(er) wird. Wichtig ist in solch einem Fall zu betonen, dass es sich bei den zuvor eingezeichneten Sendern tatsächlich um Selbst-Sender handelt. D.h. der Stein emittiert IR-Strahlung nicht aufgrund von Reflexion (als Zwischen-Sender), es handelt sich dabei tatsächlich um einen Selbstsender für IR-Strahlung.

6 Ist EM-Strahlung gefährlich?

Dieses Kapitel ist für die meisten Schüler*innen wohl das spannendste. Oft sprechen die Schüler*innen schon bei der ersten Erwähnung von Handystrahlung das Thema „Gefährlichkeit“ an – hier ist es wohl am besten, die Schüler*innen auf nachher zu vertrösten. Für die Diskussion der Gefährlichkeit ist die Position der Strahlungsart im Spektrum sowie die absorbierte Menge ausschlaggebend. Auch ob und an welcher Stelle die Strahlung überhaupt absorbiert wird, spielt eine Rolle.

Die Informationen zur Gefährlichkeit stehen als Text zur Verfügung. Dieser kann im Anschluss ausgeteilt werden, um sich die Zeit für einen längeren Hefteintrag zu sparen. Natürlich kann anstatt einer mündlichen Erklärung auch der Text von den Schüler*innen gelesen werden.

20 Sollten Schüler*innen an dieser Stelle erwidern, dass in Punkt 2 Beispiele behandelt worden sind, bei denen keine IR-Strahlung ausgesendet werden, so kann erklärt werden, dass die untersuchten Objekte zu wenig IR-Strahlung abgeben, als dass wir es mit unseren Händen spüren könnten.

21 Im thermischen Gleichgewicht unterscheidet sich der Stein nicht seiner Umgebung – würde er keine IR-Strahlung aussenden, müsste der Fleck schwarz bleiben.

Zum Thema elektromagnetische Strahlung ist für Schüler*innen vor allem die Frage, ob und inwiefern das eigene Handy gefährliche Strahlung aussendet, von Bedeutung, weshalb dies als eigener Punkt behandelt wird.

Schüler*innen haben meist insbesondere von ihren Eltern Warnungen gehört, sie sollen das Handy nicht zu viel benutzen und es nachts abschalten. Es ist daher gar nicht so einfach, zu erklären, dass die Mikrostrahlung, die ein Handy emittiert, nach wissenschaftlichem Stand nicht gefährlich für uns Menschen ist. Es hat sich auch empirisch gezeigt, dass Schüler*innen alle Effekte, vor denen in Zusammenhang mit dem Handy gewarnt wird, der „Handystrahlung“ zuschreiben. Außerdem glauben teilweise sogar sehr gute Schüler*innen, dass es sich bei der „Handystrahlung“ um die vom Bildschirm emittierte Strahlung handelt. Oftmals haben Schüler*innen davon gehört, dass ein Handybildschirm schädliches, blaues Licht abgibt – teilweise glauben sie dann, es handelt sich dabei um die schädliche Handystrahlung [5]. Es ist daher wichtig, einerseits zu klären, welche Arten von Strahlung ein Handy überhaupt aussendet, und andererseits, wie die Effekte, vor denen typischerweise gewarnt werden, eigentlich ausgelöst werden. Die Angaben zur Gefährlichkeitsbeurteilung und zum aktuellen Forschungsstand zu „Handystrahlung“ stammen aus [6].

6.1 Echt gefährlich – Strahlung mit kleiner Wellenlänge

Zu Beginn werden die Vorerfahrungen der Schüler*innen gesammelt:

Oft wird ja darüber diskutiert, ob elektromagnetische Strahlung gefährlich ist. Habt ihr das auch schon mal gehört? Was meint ihr dazu?

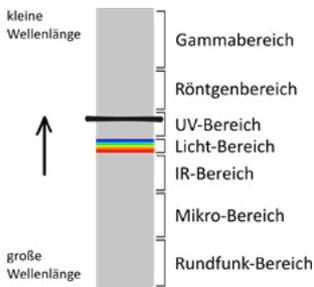


Abb. 18: Eine Linie wird im oberen UV-Bereich eingezeichnet – alles oberhalb dieser Grenze ist gefährlich.

Hier berichten Schüler*innen eigentlich immer davon, dass sie von Eltern oder von anderen Lehrpersonen gehört haben, dass Handys schädlich sind/dass man das Handy nicht in die Hosentasche geben sollte, oder dass die Eltern zuhause den Mikrowellenherd entsorgt haben. Diese Wortmeldungen sollten zunächst unkommentiert bleiben.

Die Schüler*innen werden gebeten, ihre Abbildung des Spektrums zur Hand zu nehmen. Dann wird gemeinsam mit ihnen im oberen UV-Bereich eine dicke Linie eingezeichnet und erklärt, dass Strahlung oberhalb dieser Grenze (also Strahlung mit kleiner Wellenlänge) für den Menschen gefährlich ist (vgl. Abb. 18). Strahlungsarten oberhalb dieser Grenze können erheblichen Schaden im Körper anrichten.²² Je weiter oben im Spektrum die Strahlung ist, desto gefährlicher ist sie.²³ Ist die Menge an Strahlung, die man absorbiert, größer, dann ist auch das Risiko höher, dass Schäden zurückbleiben.

Ihr fragt euch jetzt vielleicht, warum man dann trotzdem Röntgenstrahlung in der Medizin einsetzt.

Es wird geklärt, dass bei einer Röntgenuntersuchung nur eine kleine Menge an Röntgenstrahlung verwendet wird – vor allem klein im Vergleich zur Menge an Strahlung mit kleiner Wellenlänge, die wir im Laufe eines Jahres absorbieren. Eine Röntgenuntersuchung birgt immer ein gewisses Risiko, deshalb „röntgt man nicht zum Spaß“.

Falls vorher genannt worden ist, dass Handystrahlung (oder Mikrostrahlung) gefährlich ist, kann jetzt darauf aufmerksam gemacht werden, dass sich der Mikrobereich weit weg vom gefährlichen Bereich des Spektrums befindet.

22 Es handelt sich hierbei um eine sehr vereinfachte Darstellung des Gefährlichkeitspotentials. Eine DNA-schädigende Wirkung hat auch UV-Strahlung. Ein Unterschied liegt darin, dass UV-Strahlung in den Hautschichten absorbiert wird, während Röntgen- und Gammastrahlung tiefer in den Körper eindringt. Insbesondere können durch UV-Strahlung verursachte DNA-Schäden gut von körpereigenen Schutzmechanismen repariert werden. Gefährlich wird UV-Strahlung, wenn diese Schutzmechanismen überlastet sind – dies ist bei ca. 60% der Erythemschwelle der Fall. (Das ist jener Schwellenwert, bei dem ein Sonnenbrand entsteht – d.h. auf halbem Weg zum Sonnenbrand ist es eigentlich schon zu viel.) Fachlich ist mit der eingezeichneten Grenze die Ionisierungsgrenze gemeint. Ionisierende Strahlung (ab UVC) kann Elektronen aus Atomen und Molekülen freisetzen. Diese freiwerdenden Elektronen können eine Kaskade an Wirkungen und damit viele weitere Schäden auslösen. [7–9]

23 Man könnte annehmen, dass es für Schüler*innen nicht nachvollziehbar ist, dass eine kleine Wellenlänge eine größere Gefahr darstellt, da ja sonst „mehr ist mehr“ gilt. Dies wurde allerdings nicht beobachtet – Schüler*innen haben meist schon gehört, dass Röntgen- und/oder Gammastrahlung gefährlich ist. Daher ist für sie plausibel, dass dieser Bereich generell gefährlich ist.

6.2 UV-Strahlung darf man auch nicht unterschätzen!

UV-Strahlung ist eine Strahlungsart, von der wir wissen, dass sie auch andere Effekte auf den menschlichen Körper hat. Sie verursacht Sonnenbrand. Wenn man im Laufe seines Lebens zu viel UV-Strahlung absorbiert, so schädigt das die Haut, und es steigt das Risiko für Hautkrankheiten. Deshalb muss man sich vor zu viel UV-Strahlung schützen – indem man Sonnencreme²⁴ verwendet, den Körper mit Kleidung bedeckt und intensive Strahlung der Sonne vermeidet (insbesondere im Sommer zur Mittagszeit).

UV-Strahlung ist außerdem dafür verantwortlich, dass die Haut im Alter dünn und faltig wird. Menschen, die viel ins Solarium gehen, bekommen also schneller eine faltige Haut!

6.3 Wärmende Wirkung

Alle Strahlungsarten haben einen wärmenden Effekt, wenn sie vom Körper absorbiert werden. Wie stark diese Erwärmung ist, hängt davon ab, um welche Strahlung es sich handelt und wie viel Strahlung absorbiert wird. Damit aufgrund dieses thermischen Effektes der Körper geschädigt werden kann, müssen aber sehr große Mengen benutzt werden! Die Mengen, in denen uns elektromagnetische Strahlung im Alltag begegnet, sind für uns Menschen nach heutigem Wissenstand nicht bedenklich. In einer „Mikrowelle“ benutzen wir die thermische Wirkung von Strahlung aus dem Mikrobereich, um Speisen zu erwärmen. Dazu wird eine hohe Menge an Strahlung benötigt. *Deshalb solltest du dich auch nicht in eine Mikrowelle hineinsetzen!*²⁵

6.4 Und was ist jetzt mit „Handystrahlung“?

Zu Beginn kann mit den Schüler*innen gesammelt werden, was sie in ihrem Umfeld bzgl. Handy und Gefährlichkeit gehört haben (bzw. nochmal wiederholt werden, was bereits zu Beginn dieser Einheit seitens der Schüler*innen genannt wurde). Als erster Schritt wird dann geklärt, welche Strahlung ein Handy überhaupt aussendet. Dazu wird wieder auf die Repräsentationsform zurückgegriffen (siehe Abb. 19): Der Bildschirm sendet Licht aus. Das erkennt man ja daran, dass man es sehen kann – und wenn man eine elektromagnetische Strahlung mit den Augen wahrnehmen kann, ist es Licht! Außerdem sendet ein Handy IR-Strahlung aus, da ja alles, was Materie ist, IR-Strahlung aussendet. Und: Ein Handy sendet und empfängt Strahlung aus dem Mikrobereich. Dadurch werden Informationen gesendet und empfangen – beim Telefonieren, SMS-Schicken, und beim Up- und Download im Internet. Wenn man im Alltag von „Handystrahlung“ spricht, meint man normalerweise diese Strahlung im Mikrobereich.

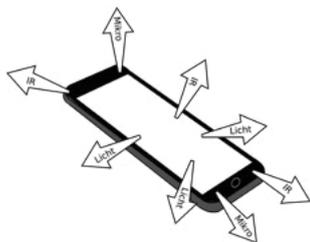


Abb. 19: Die verschiedenen Strahlungsarten, die von einem Smartphone emittiert werden.

Nun kann auf die verschiedenen Effekte, die von den Schüler*innen genannt worden sind, eingegangen werden. Mit folgenden Begründungen seitens der Schüler*innen für die vermeintliche Gefährlichkeit von Handystrahlung kann gerechnet werden [5]: Die Strahlung sei schädlich für die Augen (insbesondere: Blaulichtstrahlung) und für das Gehirn. Sie könne Krebs und Unfruchtbarkeit verursachen. Sie sei schlecht für den Schlaf. Es sei gefährlich, wenn das Handy nahe am Körper getragen wird, oder wenn man zu viel am Handy ist. Strahlung sei generell gefährlich. Es sei allgemein bekannt, dass Handystrahlung gefährlich ist – man höre es von vielen Seiten. Es wird vorgeschlagen, zuerst zu unterscheiden, was die (vermeintliche) Ursache dieser Effekte ist, und dann über den aktuellen Forschungsstand aufzuklären.

Die Schädlichkeit für die Augen, und dass man vor dem Schlafen nicht aufs Handy schauen soll, da dies den Schlafrhythmus stören könne, sind Wirkungen, die dem Licht, das vom Bildschirm ausgestrahlt wird, zugeschrieben werden (nicht der Mikrostrahlung!). Es wird vermutet, dass der erhöhte blaue Anteil an Licht, den ein Bildschirm aussendet, dem Auge evt. nicht gut tut. Es wird insbesondere vermutet, dass er evt. den Schlafrhythmus störe, da das blaue Licht dem Tageslicht ähnelt. Es gibt noch keine eindeutigen Antworten auf diese Fragen. Man sollte generell nicht zu lange ohne Pause auf Bildschirme schauen, da es die Augen anstrengt (insb. das Flimmern des Bildschirms). Auch das hat aber nichts mit Mikrostrahlung zu tun!

Oft hört man von den Eltern, dass man das Handy beim Schlafen nicht neben dem Bett liegen lassen soll. Das hat aber nichts mit Strahlung zu tun! Man weiß, dass das Handy eine ablenkende Wirkung hat, weil man regelmäßig auf Social Media nachschaut, auf die nächste Nachricht wartet, etc. Daher wird empfohlen, beim Lernen, und eben auch beim Schlafen, das Handy in einen anderen

24 Eine übersichtliche Darstellung zur Wirkung von Sonnenschutzmitteln findet sich in Plotz, T., & Hofer, E. (2020). Wie man sich vor UV-Strahlung schützt: eine fachliche Aufarbeitung eines Alltagsthemas. Plus Lucis(2), 20–24. https://www.pluslucis.org/ZeitschriftenArchiv/2020-2_PL.pdf

25 Wenn wir schon bei Mikrostrahlung sind: Es wird oft behauptet, dass die Strahlung im Mikrowellenherd das Essen ungesund mache. Auch dazu wurde viel geforscht. Es zeigt sich, dass teilweise das Essen aus der Mikrowelle sogar gesünder ist, da es nicht so stark erhitzt wird.

Raum zu legen. Hier sollte am besten nochmal betont werden, dass dies überhaupt nichts mit Strahlung zu tun hat, sondern mit dem Handy als Kommunikationsgerät.

Es schwirren im Internet Aussagen herum, die nahelegen, dass die vom Handy emittierte Mikrostrahlung für das Gehirn schädlich sei, oder gar Krebs auslösen könnte. Hier wird nochmals an die Position im Spektrum erinnert – Mikrostrahlung ist weit weg vom Bereich der gefährlichen Strahlung. Hier kann erklärt werden, dass Menschen oft bei dem Wort „Strahlung“ an den gefährlichen Teil des Spektrums denken, und ihnen gar nicht bewusst ist, dass die Strahlung des Handys sich in einem ganz anderen Bereich befindet. Es gibt zahlreiche Studien zur Wirkung von Mikrostrahlung auf den menschlichen Körper. Nach heutigem Wissensstand ist der einzige relevante Wirkungsmechanismus, mit dem Mikrostrahlung auf den menschlichen Körper wirkt, die thermische Wirkung. Für den menschlichen Körper ist es generell gefährlich, wenn die Temperatur 41°C übersteigt. Für Handys und auch für Handymasten gibt es daher Grenzwerte, wieviel Strahlung sie aussenden dürfen. Die Grenzwerte, die in Kraft sind, sind dabei um ein Vielfaches geringer, als der menschliche Körper vertragen würde!²⁶ Wichtig ist auch zu betonen, dass eine Erwärmung durch Mikrostrahlung sich nicht von anderen Arten der Erwärmung unterscheidet. Mit diesen Argumenten kann auch der Vorstellung, Körperrnähe sei schädlich, begegnet werden. Die Warnungen der Eltern können so umgedeutet werden, dass sie nicht möchten, dass ihr Kind den ganzen Tag am Handy hängt, da das Handy als Gerät eine nachweislich ablenkende Wirkung hat.

Auch hört man oft die Warnung, es mache unfruchtbar, das Handy in der Hosentasche zu tragen. Allerdings konnten bis jetzt keine negativen Auswirkungen von Mikrostrahlung in den Mengen, denen wir im Alltag begegnen, belegt werden.²⁷

Generell sollte betont werden, dass viele Menschen vor dem Wort „Strahlung“ zurückschrecken, da sie dabei oft an Strahlung mit kleiner Wellenlänge denken, die ja tatsächlich schädlich für den Körper ist, und oftmals gar nicht wissen, dass insbesondere Handystrahlung eine sehr große Wellenlänge hat. Es wird davon abgeraten als Lehrperson die Warnungen der Eltern als falsch abzutun, da man hier auf große Widerstände seitens der Schüler*innen stoßen kann („Wenn alle sagen, dass Handystrahlung gefährlich ist, dann muss ja etwas dran sein“). Stattdessen können die Warnungen der Eltern, wie bereits beschrieben, umgedeutet werden. Auch sollte natürlich nicht verheimlicht werden, dass, obwohl inzwischen viele Studien durchgeführt worden sind, es beispielsweise einfach schwer ist, kontrollierte Studien am Menschen durchzuführen, z. B. aufgrund ethischer Bedenklichkeit. Aufgrund der thermischen Wirkung wird teilweise empfohlen, bei langen Telefonaten ein Headset zu benutzen – das macht auch deshalb Sinn, weil langes Telefonieren sonst auch zu unangenehmen Verspannungen führen kann.

Als anschließende Aufgabe bietet es sich an, die Schüler*innen mit typischen Aussagen zur Gefährlichkeit von Handystrahlung zu konfrontieren und sie eine Antwort darauf verfassen zu lassen. Die Schüler*innen werden in der Arbeitsphase motiviert, verschiedene Argumente einzubauen. Anschließend werden die verschiedenen Argumentationen im Plenum gesammelt und diskutiert, ob die Schüler*innen glauben, dass ihre Argumente überzeugend sind. Es sollte darauf geachtet werden, dass auch die Position von Handystrahlung im Spektrum erwähnt wird.

Ganz grundsätzlich gilt:

Über Rückmeldungen zu Ihren Erfahrungen beim Unterrichten von elektromagnetischer Strahlung, insbesondere in diesem Punkt, würden wir sehr freuen!

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich ganz herzlich bei allen Schüler*innen und Lehrpersonen, die an den verschiedenen Studien des Forschungsprojekts teilgenommen haben, für ihre Beteiligung bedanken, sowie bei meinen Kolleg*innen des AECC Physik für ihre hilfreichen Rückmeldungen. Ein besonderer Dank gilt Martin Hopf, der das Forschungsprojekt betreut und mitgestaltet hat.

26 Nach heutigem Wissensstand gilt: Damit Telefonieren mit dem Handy zu einem relevanten Temperaturanstieg im Kopf führt, müsste man sich mehr als zehn Handys gleichzeitig um den Kopf schnallen und mit allen Handys simultan bei sehr schlechtem Empfang telefonieren.

27 Wenn man möchte, kann man darauf eingehen, dass Testikel generell sehr empfindlich auf Erhöhung der Temperatur reagieren, sodass z. B. zu viel Sitzen sich bereits negativ auf die Fruchtbarkeit auswirken kann. Wie bereits erwähnt, sind die Grenzwerte für Mikrostrahlung allerdings so niedrig gewählt, dass bei der Aufbewahrung des Smartphones in der Hosentasche nicht mit einem negativen Effekt gerechnet werden muss.

Hinweise zum Einsatz von Infrarotkameras im Unterricht

Schüler*innen sind mit den Bildern, die eine Infrarotkamera erzeugt, bereits bekannt – meist von Bildern zur Wärmedämmung. Daher ist damit zu rechnen, dass Schüler*innen bei einer Infrarotkamera an die Detektion von Wärme denken. Schüler*innen wissen meist nicht, wie eine Infrarotkamera funktioniert. Meist glauben sie, dass die Kamera Infrarotstrahlung aussendet und die Temperatur durch Reflexion misst. Wichtig ist daher zu betonen, dass eine Infrarotkamera ein passiver Empfänger für Infrarotstrahlung ist. Schüler*innen achten beim Interpretieren von Bildern, die eine Infrarotkamera aufnimmt, nicht auf die Skala. Es entsteht dadurch bei ihnen der Eindruck, dass Objekte, die blau angezeigt werden, „kalt“ sind, während Objekte, die rot angezeigt werden, „warm“ sind. Der Schlüsselfaktor für das Interpretieren der Bilder ist, dass die Schüler*innen mit der Skala vertraut werden. Dies kann man üben, indem man die Schüler*innen konkrete Werte der Temperatur ablesen lässt sowie Bildkombinationen betrachtet, bei denen ein Objekt, das in einem Bild als „rot“ angezeigt wird, als blau erscheint, wenn man ein Objekt mit höherer Temperatur danebenstellt. Sobald die Schüler*innen mit der Skala vertraut sind, lassen sie sich mit Hilfe der Infrarotkamera davon überzeugen, dass alles Infrarotstrahlung aussendet **[10]**. Im vorliegenden Konzept sollte von der Infrarotkamera konsequent als „IR-Empfänger“ gesprochen werden. Es empfiehlt sich zu erklären, dass man es im Alltag „Wärmebildkamera“ nennt, da man anhand der IR-Strahlung Rückschlüsse auf Temperaturen machen kann, wie in der Physik aber den Begriff „IR-Empfänger“ benutzen.

Überlegungen zu Energie, Wellenlänge und Frequenz

Elektromagnetische Strahlung kann sowohl anhand der Wellenlänge, der Photonenenergie, als auch der Frequenz im Spektrum geordnet werden. In den ersten Versionen des vorliegenden Unterrichtskonzeptes wurde Energie als ordnende Größe verwendet. Es wurde davon ausgegangen, dass bereits ein sehr naives Verständnis von Energie seitens der Schüler*innen helfen könnte zu verstehen, dass energiereiche Strahlung ein anderes Gefahrenpotential als energiearme Strahlung hat. Auch die Idee, dass die Aufnahme von Energie verschiedene Wirkungen nach sich zieht, schien naheliegend. Es hat sich zwar bestätigt, dass die Argumentation von hoher Energie beim Gefährlichkeitsaspekt die Schüler*innen überzeugen konnte. Allerdings zeigte sich, dass Schüler*innen davor zurückscheuen, das Wort „Energie“ selbst zu verwenden, und stattdessen auf Wörter wie „Stärke“ ausweichen. Auch die Präsentation von elektromagnetischer Strahlung als eine Form von Energie stieß auf keine gute Resonanz. Es zeigte sich aber, dass die meisten Schüler*innen das Wort „Wellenlänge“ bereits im Zusammenhang mit elektromagnetischer Strahlung kennen (vermutlich aus dem Optikunterricht zur Unterscheidung der verschiedenen Licht-Farben). Daher wird in der vorliegenden Version die Größe der Wellenlänge als eine Zahl, die elektromagnetischer Strahlung zugeordnet werden kann, und wodurch sich elektromagnetische Strahlung unterscheidet und geordnet werden kann, eingeführt. Dies hat sich in den meisten Fällen gut bewährt. In Einzelfällen sind Schüler*innen aber nicht mit dem Wort vertraut und fordern ggf. eine Erklärung ein. Die Frage, welche Größe sich am besten für den Unterricht zu elektromagnetischer Strahlung in der Sek. I anbietet, kann erst im Zuge weiterer Forschung beantwortet werden. Stattdessen die Größe der Frequenz einzuführen, ist bis dato noch nicht untersucht worden. Dies könnte evt. dazu führen, dass Schüler*innen denken, elektromagnetische Strahlung wäre etwas Ähnliches wie Schall, was Lernschwierigkeiten verursachen könnte.

Literatur

- [1]** Haagen-Schützenhöfer, C. (2016). Lehr- und Lernprozesse im Anfangs-optikunterricht der Sekundarstufe I. Habilitationsschrift. Universität Wien, Wien.
- [2]** Plotz, T., Zloklikovits, S. (2019). Strahlung konkret. Plus Lucis 2, 34–42.
- [3]** Wiener, G. J., Schmeling, S. M., Hopf, M. (2015). Can Grade-6 Students Understand Quarks? Probing Acceptance of the Subatomic Structure of Matter with 12-Year-Olds. *European Journal of Science and Mathematics Education* 3/4, 313–322.
- [4]** Plotz, T. (2016). Strahlung. Wichtiger Bestandteil im Unterricht oder wenig nützlicher Ballast? *Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule* 65/2, 5–8.
- [5]** Zloklikovits, S., Hopf, M. (in Druck). Lernendenvorstellungen zum Thema „Handystrahlung“. In: Unsicherheit als Element von naturwissenschaftsbezogenen Bildungsprozessen. Habig, S. (Hrsg.).
- [6]** International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (2020). Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz). *Health physics* 118/5, 483–524.
- [7]** Żbikowska, H. (2018). Radiobiology. In: CBRN. Security Manager Handbook. Bijak, M. (Hrsg.). Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego.
- [8]** Mang, R., Krutmann, J. (2003). Sonnenschutz im Urlaub. *Der Hautarzt; Zeitschrift für Dermatologie, Venerologie, und verwandte Gebiete* 54/6, 498–505.
- [9]** Stachelscheid, K., Luse, B. (2004). Sonnenschutz. Gesundheitsbewusstsein in Australien und Deutschland. *Chemie & Schule* 19/2, 5–10.
- [10]** Meiringer, M. (2013). Schülervorstellungen zur Infrarotkamera und deren Aufnahmen. Diplomarbeit. Universität Wien.