

Peer Instruction in der Theoretischen Physik

Philipp Scheiger^{**}, Ronny Nawrodt^{*}, Holger Cartarius[†]

^{*}Physik und ihre Didaktik, Universität Stuttgart, 70569 Stuttgart,

[†]AG Fachdidaktik der Physik und Astronomie, Friedrich-Schiller-Universität Jena, 07743 Jena
p.scheiger@physik.uni-stuttgart.de

Die Peer Instruction mit Verständnisfragen und Diskussionen in Kleingruppen hat sich als aktivierenden Lehrmethode in vielen Lehrveranstaltungen etabliert. Für Themengebiete wie die Theoretische Physik gibt es aber noch kaum konkrete Umsetzungen, bzw. kaum Peer-Fragen zur Adaption oder zur Orientierung für Dozierende. In diesem Artikel beschreiben wir, welche Art von Peer-Fragen sich in der Theoretischen Physik einsetzen lassen und geben dazu jeweils Beispiele. Neben den klassischen Verständnis- und Konzeptfragen, wie sie bisher in der Peer Instruction gefordert werden, liefern wir Argumente für das aktive Trainieren von Formelverständnis und den Umgang mit Formalismen im Rahmen der Peer Instruction in Theoretischer Physik. Fragen und Fragentypen, mit denen dies möglich ist, werden ebenfalls aufgezeigt und beschrieben. Abschließend werden kurz die ersten Lehrerfahrungen mit der Peer Instruction in Theoretischer Physik beschrieben, die überwiegend positiv sind.

1. Einleitung

Von Eric Mazur [1] entwickelt, hat sich die Peer Instruction (PI) in den USA schon lange etabliert und findet auch in Deutschland immer häufiger Anwendung in verschiedenen Vorlesungen [2]. Dies überrascht nicht weiter, wenn man die verschiedenen Nutzen aufzählt [3], die entstehen, sobald man Lernenden gezielt Verständnisfragen stellt und sie anschließend darüber diskutieren lässt.

Lernende werden bei zentralen Fragestellungen des jeweiligen Themas zum Nachdenken angeregt, lernen über fachliche Themen zu diskutieren und logisch zu argumentieren, können mit Hilfe der Kommiliton*innen bekannte Verständnisschwierigkeiten überwinden und erhalten substantielles Feedback, um den eigenen Lernfortschritt besser einschätzen zu können. Auch für Lehrende bietet die PI Vorteile. Sie erhalten im Rahmen der PI ebenfalls Feedback über den aktuellen Kenntnisstand der Lernenden und können mit Studierenden einfacher in fachliche Diskussionen kommen.

Gerade weil die Peer Instruction als Lehrmethode überzeugt hat, wurde sie zum Exportschlager aus der der Physiklehre in andere Fächer wie Mathematik und Naturwissenschaften [2]. Eine große Herausforderung bei der Umstellung von traditionellen Lehrveranstaltungen auf die PI ist die Entwicklung geeigneter Fragen. Und während man in Grundvorlesungen auf eine große Sammlung von Fragen [1] zurückgreifen kann, gibt es im deutschsprachigen Raum kaum Fragen oder Beispiele, die Vorlesungen in der Theoretischen Physik im Sinne der PI unterstützen. Aus dem englischsprachigen Raum gibt es aber einige Ansätze [4–6].

Ziel dieser Veröffentlichung ist es, von ersten Erfahrungen der PI in Theorie Vorlesungen in klassischer Mechanik, Quantenmechanik, Elektrodynamik und

Thermodynamik zu berichten und Kategorien zu bilden, welche Art von Peer-Fragen in der Theoretischen Physik besonders gewinnbringend sind.

Darüber hinaus wird Mazurs Methode der PI um das Konzept des Formelverständnisses erweitert, um mit Peer-Fragen ganz gezielt den Umgang mit dem mathematischen Formalismus in der Theoretischen Physik zu trainieren.

2. Peer Instruction nach Mazur

Grundprinzip [1] der PI ist es, Lernenden eine Frage zu stellen und Multiple-Choice-Antworten zur Verfügung zu stellen. Aufgabe der Lernenden ist es, die Aufgabe zu verstehen und sich auf eine Antwortmöglichkeit festzulegen, bzw. für diese abzustimmen. Anschließend sollen die Lernenden in Kleingruppen sich gegenseitig von den eigenen Antworten überzeugen oder allgemein über das Thema diskutieren. Nach dieser Peerdiskussion erfolgt eine zweite Abstimmung. War die Frage verständlich formuliert und das Anforderungsniveau angemessen, geht die Tendenz in der zweiten Abstimmung zur richtigen Antwort. Im Anschluss sollten die fachlichen Prinzipien und die richtige Antwort von der Lehrperson für alle nochmals eingeordnet werden.

Mazur gibt gewisse Kriterien für solche Fragen vor. Die Fragen sollten

- auf ein einziges Konzept fokussieren,
- nicht durch Anwendung von Formeln zu lösen sein,
- attraktive Multiple-Choice Distraktoren anbieten,
- eindeutig formuliert sein,
- nicht zu leicht oder zu schwer sein.

Mazur selbst hat seine Fragen nach diesen Kriterien entwickelt, überarbeitet, angepasst und aussortiert

[1]. Daneben ist die statistische Auswertung des Antwortverhaltens eine wichtige Überprüfungsmethode der Kriterien. Bei der ersten Abstimmung sollte die Quote der richtigen Antworten bei 40 % - 80 % liegen. Liegt die Quote darunter, kommt oft keine Diskussion unter den Lernenden auf einem ausreichenden Niveau zustande. Liegt die Quote darüber hat eine deutliche Mehrheit das Konzept bereits verstanden und eine Diskussionsphase hätte wenig Mehrwert.

2.1. Entwicklung neuer Fragen und angepasste Gütekriterien

Im Rahmen dieser Untersuchung lag die Teilnehmeranzahl nie in einem Bereich, der für eine adäquate statistische Auswertung von Nöten gewesen wäre, weshalb die Gütekriterien hier angepasst sind.

Über einen Zeitraum vom Wintersemester 19/20 bis zum Sommersemester 22 wurden die verschiedenen Fragen an der Universität Stuttgart begleitend zu den Vorlesungen „Grundlagen der Theoretischen Physik für Lehramt I & II“ mit den Schwerpunkten klassische Mechanik, Quantenmechanik, Elektrodynamik und Thermodynamik entwickelt und getestet. Teile davon wurden ebenfalls an der Friedrich-Schiller-Universität Jena in den Vorlesungen „Theoretische Mechanik für Lehramt“ und „Elektrodynamik für Lehramt“ getestet.

Statt der statistischen Auswertung wurden die Fragen nach folgenden Kriterien weiter entwickelt, verbessert oder verworfen.

- Eine Tendenz zur richtigen Antwort ist in der zweiten Abstimmung erkennbar.
- Die Frage regt zur Diskussion unter den Studierenden an.
- Fehler oder missverständliche Aufgabenstellungen werden ausgetauscht oder überarbeitet.

Die PI, wie sie klassisch nach Mazur gedacht ist, stieß bei nahezu allen Studierenden auf reges Interesse mit Feedback. Dies wurde genutzt, um bei der Entwicklung neuer Fragen immer wieder auf die aktuellen Probleme und Anregungen der Studierenden Bezug zu nehmen. So wurde gewährleistet, dass die neuen Fragen auch die Probleme und Interessen der Studierenden adressieren.

3. Konzeptfragen

Zunächst werden die Fragen, die im Rahmen der klassischen PI entwickelt wurden, vorgestellt. Dies sind Fragen der folgenden Kategorien:

1. Fachbegriffe zu klären/definieren/konkretisieren
2. Physikalische Konzepte
3. Darstellungen/Graphen verstehen/interpretieren
4. Schülervorstellungen beurteilen

Diese Arten von Fragen wurden von Studierenden regelmäßig gewünscht, bzw. vom Dozierenden mit regen Diskussionen und Lernfortschritt verbunden. Im Folgenden werden diese Kategorien kurz beschrieben und mit einem Beispiel veranschaulicht.

3.1. Fachbegriffe zu klären/definieren/konkretisieren

Die Studierenden waren häufig sehr schnell in der Lage, die Fachbegriffe aus den Vorlesungen zu übernehmen und in den eigenen Sprachgebrauch zu übernehmen. Bei Nachfragen oder Detaildiskussionen wurde aber oft der Eindruck erweckt, dass die Bedeutung der Begriffe nicht immer vollständig durchdrungen wurde. Mit gezielten Peer-Fragen können Fachbegriffe aber greifbarer gemacht werden. Beispiel Inertialsystem:

„Bei welchem/welchen Beispiel/en handelt es sich um ein Inertialsystem?“

1. Ein Kettenkarussell
2. Ein optischer Tisch in einem Physiklabor
3. Ein Fallschirmspringer im freien Fall
4. Ein Schulklassenzimmer
5. Die Erde
6. Die internationale Raumstation ISS
7. Keines der genannten Beispiele ist ein echtes Inertialsystem

Der Begriff des Inertialsystems wird von vielen Studierenden als wichtig eingeschätzt. Werden sie jedoch gefragt, ein konkretes Beispiel zu nennen oder zu beurteilen, ob es überhaupt ein gutes Beispiel gibt, sind viele überfordert. Das zeigt auch die Peer-Frage zum Inertialsystem, wenn hier viele Studierende nicht erkennen, dass kein Beispiel ein gutes Inertialsystem darstellt. Im Anschluss an diese Frage bietet es sich aber an, die Frage zu wiederholen und nach dem näherungsweise besten Inertialsystem zu fragen und so eine Diskussion über Näherungen und Abschätzungen anzuregen.

3.2. Physikalische Konzepte

Verständnisfragen nach physikalischen Konzepten sind die typischsten Fragen für die PI. Im Rahmen der Theoretischen Physik bietet es sich an, Konzepte, die in Vorlesung und Übungen an sehr elementaren Beispielen berechnet werden auf reale Anwendungen oder Phänomene zu übertragen. Beispiel Potentialstufe in der Quantenmechanik nach [7] :

„Ein Strahl von Elektronen, bei dem alle dieselbe Energie E besitzen, bewegt sich durch einen Leiter. An der Stelle $x = 0$ wechselt das Material des Leiters, sodass die potentielle Energie der Elektronen von U_0 auf null fällt. Sei nun $E > U_0$, welche Aussage beschreibt die Transmission und Reflektion der Elektronen am akkuratesten?“

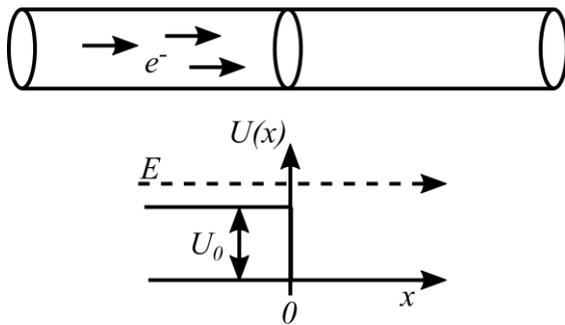


Abb.1: Abbildung zur Peer-Frage Potentialstufe (nach einer Idee aus [7]).

1. Alle Elektronen werden transmittiert, da alle eine Energie von $E > U_0$ haben.
2. Ein Teil der Elektronen wird transmittiert und ein Teil reflektiert, da die Elektronen tatsächlich Energien einer Spanne besitzen.
3. Ein Teil der Elektronen wird transmittiert und ein Teil reflektiert, da sie sich wie Wellen verhalten.
4. Alle Elektronen werden transmittiert. Weil das Potential abnimmt, gibt es keinen Grund für die Elektronen reflektiert zu werden.

Das abstrakte Beispiel der Potentialstufe wird hier auf ein Themengebiet der klassischen Physik, nämlich der Elektronik angewandt. Viele Studierende erkennen die Verknüpfung der Kontexte nicht und wenden das gelernte neue Wissen aus der Quantenmechanik nicht auf die Elektronik an. Dabei gilt auch hier, dass ein Teil der Elektronen reflektiert wird und bei sensiblen Stromkreisen auf die Impedanz geachtet werden muss, um Reflexionsphänomene zu unterbinden. Die Peer-Diskussion kann bei Erkenntnissen zur Vernetzung sehr hilfreich sein.

Selbstverständlich lassen sich auch neue Phänomene und Konzepte mit der PI konkretisieren oder verfestigen wie beim Kollaps der Wellenfunktion in Messprozessen, z.B. beim Stern-Gerlach-Experiment.

3.3. Darstellungen/Graphen verstehen/interpretieren.

Das Interpretieren von Graphen ist schon bei Mazur selbst eine beliebte Methode, um Studierende zum Nachdenken anzuregen. Dies kann selbstverständlich auch in der Theoretischen Physik genutzt werden. Selbst wenn bestimmte Konzepte oder Fragen in vorausgegangen Experimentalphysikvorlesungen bereits behandelt wurden, kann eine Wiederholung sinnvoll oder auch nötig sein, wie zum Beispiel beim Vergleich von Zustandsänderungen in der Thermodynamik.

„Im pV -Diagramm ist eine isotherme Zustandsänderung (schwarz) dargestellt von p_1, V_1 zu p_2, V_2 .

Würde man das System vom Zustand p_1, V_1 adiabatisch expandieren lassen, wie sähe dann die Zustandsänderung im Graph aus?“

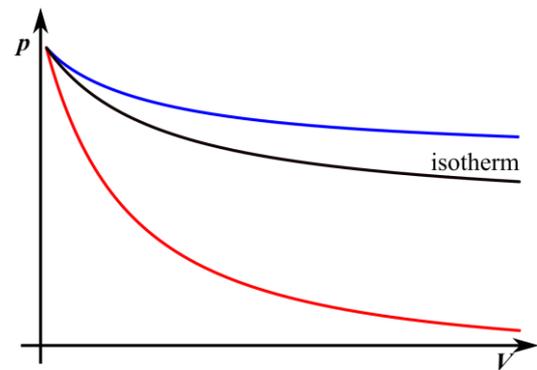


Abb.2: Abbildung zur Peer-Frage isotherme vs. Adiabatische Zustandsänderung.

1. Der Graph der adiabatischen Zustandsänderung muss über der isothermen liegen (blau).
2. Der Graph der adiabatischen Zustandsänderung muss unter der isothermen liegen (rot).
3. Isotherme und adiabatische Zustandsänderungen lassen sich im pV -Diagramm nicht unterscheiden.
4. Eine adiabatische Zustandsänderung lässt sich im pV -Diagramm nicht darstellen, nur im pT -Diagramm.

Die Frage nach der Interpretation von Graphen kann genutzt werden, um Lernende dazu anzuregen, über die Entwicklung von physikalischen Größen unter verschiedenen Bedingungen nachzudenken und zu diskutieren. Im Beispiel hier muss der Druck bei der adiabatischen Zustandsänderung schneller fallen als bei der isothermen, da von außen nur bei der isothermen Energie zugeführt wird.

3.4. Beurteilung von Schülervorstellungen

Da im Untersuchungszeitraum bevorzugt Lehramtsstudierende begleitet wurden, hat sich diese vierte Kategorie etabliert, um fachliche Inhalte mit fachdidaktischen zu verknüpfen. Aufgabe der Studierenden ist es, typische Schülervorstellungen zu erkennen und in einem fachlichen Rahmen einzuordnen.

Bewerten Sie folgende Schüleraussage: „Die Jahreszeiten entstehen aufgrund der Ellipsenbahn der Erde. Im Sommer befinden wir uns näher an der Sonne als im Winter.“

1. Die Aussage stimmt.
2. Die Aussage ist falsch. Jahreszeiten entstehen aufgrund der gekippten Erdachse.
3. Die Aussage ist falsch. Jahreszeiten entstehen, da die Corioliskraft im Sommer heiße Luft gen Norden und im Winter gen Süden treibt.
4. Die Aussage ist falsch. Die Ellipsenbahn erklärt nur, warum es auf der Südhalbkugel im Jahresschnitt wärmer ist als im Norden.

Die richtige Antwort hier ist 2. Für Lehramtsstudierende kann es gewinnbringend sein, fachliche Inhalte in einem fachdidaktischen Kontext zu behandeln [8]. Ein zentraler Punkt der fachdidaktischen Ausbildung

in der Physik sind die Schülervorstellungen. Bei anonymen Abstimmungen in der PI können angehende Lehrkräfte eigene Vorstellungen reflektieren, ohne dass ihnen ein Nachteil entsteht, bzw. sie üben Erklärungsmuster, um Schülervorstellungen bei Lernenden ausräumen zu können.

4. Peer Instruction für Formelverständnis

Eric Mazur will explizit konzeptionelles Verständnis fördern und verzichtet deshalb aktiv auf die Anwendung von Formeln in der PI. Im Kontext der Theoretischen Physik ist dieser Ansatz in Teilen ebenfalls gerechtfertigt, weil ein konzeptionelles Verständnis einfachem Formelanwenden vorzuziehen ist. Andererseits dringt die Theoretische Physik in Gebiete vor, in denen mit konzeptionellem Verständnis oder Vorstellungen nicht mehr gearbeitet werden kann, weil die Themen zu komplex werden oder, wie im Falle der Quantenmechanik, kein intuitiver Zugang gefunden werden kann.

Wir halten es an dieser Stelle für gewinnbringend, den Punkt in Mazurs Grundregeln (Die Fragen sollten nicht durch die Anwendung von Formeln zu lösen sein.) aufzubrechen und dafür ein konzeptioneller und qualitativer Umgang mit Formeln gezielt trainiert werden. Dabei soll es nicht darum gehen, schlicht Zahlen in Formeln einzusetzen, sondern das Wechselspiel zwischen Mathematik und Physik zu veranschaulichen oder zu trainieren.

In diesem Sinne schlagen wir vor, die Grundregeln von Mazur für die Theoretische Physik anzupassen. Die Fragen sollten

- ~~nicht durch Anwendung von Formeln zu lösen sein,~~
- das Wechselspiel zwischen Mathematik und Physik veranschaulichen/trainieren,

Die Nutzung solcher Peer-Fragen über die Jahre hat gezeigt, dass vor allem Fragen in den Kategorien

1. Übersetzung Physik-Mathematik
2. Übersetzung Mathematik-Physik
3. Interpretation von Formeln
4. Abschätzungen aus Formeln

bei Studierenden gut ankommen, bzw. hier viel Diskussions- und Klärungsbedarf auf studentischer Seite besteht. Im Folgenden werden diese Kategorien wieder näher beschrieben und mit Beispielen veranschaulicht.

4.1. Übersetzung Physik-Mathematik & Mathematik-Physik

Diese Kategorie trainiert die absolute Grundlage, die nötig ist, um Informationen aus Formeln zu gewinnen oder physikalische Probleme mathematisch darzustellen, um überhaupt damit weiter arbeiten zu können. Dieses Können ist in der Theoretischen Physik essentiell, um an Problemen, bei denen man allein mit konzeptionellen Vorstellungen nicht zum Ziel kommt, arbeiten zu können. Unserer Erfahrung nach

haben leider viele Studierende genau hier Probleme, dabei geht es auch um die Abschätzung, unter welchen Umständen bestimmte Formeln und Formalismen gelten, bzw. angewendet werden können. Das eigentliche Rechnen im Anschluss ist häufig nicht das Problem.

Erste Übungen können im Rahmen der PI gemacht werden, wenn schlicht physikalische Rahmenbedingungen mathematisch ausformuliert werden müssen wie z.B. bei der Bestimmung von Zwangsbedingungen in der Lagrange-Mechanik.

„Ein Rad, das nicht umfallen und nicht rutschen kann, rollt auf einer Ebene. Wie sieht die passende Zwangsbedingung / sehen die passenden Zwangsbedingungen aus?“

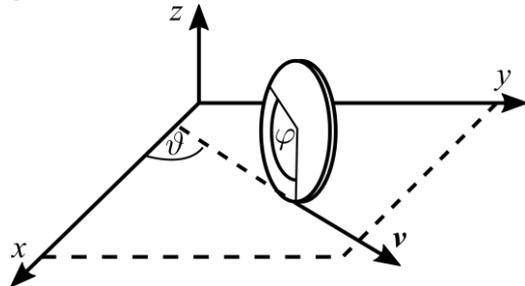


Abb.3: Abbildung zur Peer-Frage Zwangsbedingungen.

1. $\omega \cdot t = \varphi;$
 $z = a$
2. $x - y \cdot \tan^{-1} \vartheta = 0;$
 $z = a$
3. $z = a$
4. 1. und 2. sind richtig.

Häufig ist dies auch eine Stelle, bei der Studierende Probleme beim Bearbeiten von Übungsaufgaben haben. Im Rahmen der PI können Studierende bereits in der Vorlesung dieses Vorgehen begleitet trainieren. Richtig ist hier Antwort 2.

Die Übersetzung Physik-Mathematik lässt sich logischerweise auch umkehren. In der Lagrange-Mechanik könnten Studierende z.B. aufgefordert werden, aus gegebenen generalisierten Koordinaten auf die Bewegung Rückschlüsse zu ziehen.

4.2. Interpretation von Formeln

Geht man einen Schritt weiter und lässt Studierende Lösungen der Euler-Lagrange-Gleichung dem ursprünglichen physikalischen Problem zuordnen, ist man in der Kategorie der Interpretation aus Formeln. Wenn es also darum geht, physikalische Informationen aus einem System zu lesen, die über die reine Ortsinformation hinaus geht. Die Auswirkungen des Satzes von Steiner auf den Trägheitstensor eines Körpers sind ein Beispiel dafür.

„Die Drehachsen vom dünnen Stab mit dem Trägheitstensor

$$\frac{m}{12} l^2 \begin{pmatrix} 0 & & \\ & 1 & \\ & & 1 \end{pmatrix}$$

werden vom Zentrum auf ein Ende verschoben.

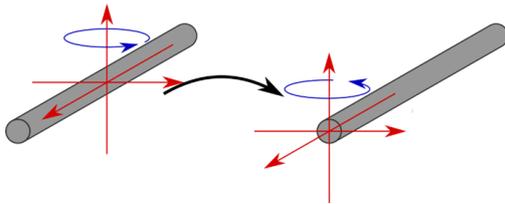


Abb.4: Abbildung zur Peer-Frage Satz von Steiner.

Der Satz von Steiner beschreibt die Änderung eines Trägheitsmoments $\Theta = \Theta_S + Ml_S^2$. Wie sieht der neue Trägheitstensor aus?*

$$1. \begin{pmatrix} 0 & & \\ & \frac{m}{3} l^2 & \\ & & \frac{m}{3} l^2 \end{pmatrix} \quad 2. \begin{pmatrix} m \left(\frac{l}{2}\right)^2 & & \\ & \frac{m}{12} l^2 & \\ & & \frac{m}{12} l^2 \end{pmatrix}$$

$$3. \begin{pmatrix} -m \left(\frac{l}{2}\right)^2 & & \\ & \frac{m}{12} l^2 - m \left(\frac{l}{2}\right)^2 & \\ & & \frac{m}{12} l^2 - m \left(\frac{l}{2}\right)^2 \end{pmatrix}$$

Relevant zur Beantwortung dieser Frage ist lediglich die Erkenntnis, dass bei der Drehung um die dünne Achse das Trägheitsmoment im Trägheitstensor verschwindet. Diese Eigenschaft ändert sich beim Verschieben des Drehpunktes nicht. Der einzige Tensor, der diese Information behält, ist die Nummer 1.

4.3. Abschätzungen aus Formeln

Diese Informationen müssen auch nicht immer analytisch exakt oder vollständig sein. Oft ist es hilfreich, wenn man grobe Vorhersagen aus Formeln macht, um abzuschätzen, welche Auswirkungen bei realen Problemen ein bestimmtes Phänomen oder eine bestimmte Eigenschaft hat. Als Beispiel nennen wir den komplexen Brechungsindex:

„Für den komplexen Brechungsindex gilt

$$\hat{n} = n(1 + ik) = n - ik.$$

Eingesetzt in die Formel für eine ebene Welle ergibt das

$$\hat{\vec{E}} = \hat{\vec{E}}_0 \cdot e^{-k\frac{\omega}{c}x} \cdot e^{i(n\frac{\omega}{c}x - \omega t)}.$$

In der Abbildung ist der Brechungsindex für Wasser dargestellt. Bei welchen Wellenlängen kann Licht am weitesten in Wasser eindringen?*

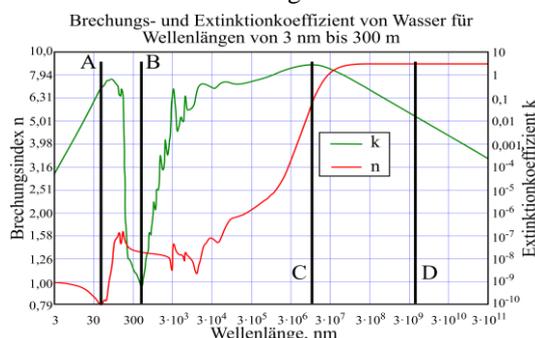


Abb.5: Abbildung zur Peer-Frage Brechungsindex, Д.Ильин: (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Brechungsindex_Wasser_1-de.svg), bearbeitet, <https://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0/legalcode> [9].

1. A ca. 40nm
2. B ca. 400nm
3. C ca. 6mm
4. D ca. 4m

Ziel ist es hier die Absorption von Licht mit einer Dämpfung also dem ersten, rein reellen exponentiellen Term der ebenen Welle zu verknüpfen. Die Abschätzung ist dann, je kleiner die Dämpfung, umso weiter die Eindringtiefe. Dies erreicht man mit einem möglichst kleinen Extinktionskoeffizienten k . Also ist B korrekt.

Die Fähigkeit zur Abschätzung kann im Studium oder allgemein sehr hilfreich sein bei der Überprüfung von Rechen- oder Simulationsergebnissen. Sie sollte deshalb auch in Vorlesungen mit solchen Peer-Fragen gezielt gefördert werden.

5. Lehrerfahrung

Die hier beschriebenen Peer Fragen wurden für Begleitseminare zur Theoretischen Physik an der Universität Stuttgart und der Friedrich-Schiller-Universität Jena entwickelt und getestet. Mehrere Fragen, die nicht den Gütekriterien aus Abschnitt 2.1 entsprachen, wurden überarbeitet oder aussortiert.

Eine empirische Untersuchung über den Lernzuwachs durch die PI war aufgrund der kleinen Stichprobe und der Form des Seminars leider nicht möglich. Da es sich hier zumeist um Begleitveranstaltungen handelt, wäre zusätzlich mindestens eine Kontrollgruppe nötig, um den Lernzuwachs der regulären Veranstaltung vom Lernzuwachs der PI zu trennen, was die Teilnehmerzahlen aber nicht erlauben.

Die Erfahrung zeigt aber, dass Studierende großes Interesse an der Einbettung der PI in Lehrveranstaltungen der Theoretischen Physik haben. Bei Lehrevaluationen durch die Fachschaften wurde diese Methode ausschließlich positiv bewertet und für die Zukunft häufiger gefordert. Auch konnte in Phasen der PI die aktivste Beteiligung aller Studierenden beobachtet werden, in Präsenz sowie digital. Die PI war in der Lage ohne Verpflichtungen durch Scheinkriterien o.ä. in Zeiten der Onlinevorlesungen alle Studierende zur aktiven Mitarbeit zu bewegen.

Pro Peer-Frage, mit zweifacher Abstimmung und Diskussion dazwischen, sollten ca. 10 Minuten in der Vorlesung eingeplant werden. Dies verhält sich etwas anders bei den Fragen zum Formelverständnis. Hier benötigten die Studierenden wesentlich mehr Zeit zum Nachdenken und zur Diskussion (insgesamt ca. 15 Minuten pro Frage). Ob dies generell der Fall ist oder ein solcher Umgang mit Formeln schlicht ungewohnt war und die Studierenden deshalb mehr Zeit benötigten, kann diese Untersuchung nicht klären.

Die PI benötigt also wesentlich mehr Zeit pro Thema im Vergleich zu klassischen Lehrveranstaltungen. Dafür werden aber alle Studierenden zum Nachdenken angeregt und nicht nur die üblich aktiven Einzelnen.

6. Zusammenfassung

Die Peer Instruction (PI) lässt sich gut in komplexeren Themengebieten der Theoretischen Physik einsetzen. Da es noch wenig konkrete Beispiele für Peer-Fragen in der Theoretischen Physik gibt, wurden in diesem Artikel Kategorien von Fragen mit Beispielen vorgestellt, die sich in unseren Lehrveranstaltungen als gewinnbringend erwiesen haben. Nach der klassischen PI sind dies Konzeptfragen in den Kategorien:

1. Fachbegriffe zu klären/definieren/konkretisieren
2. Physikalische Konzepte
3. Darstellungen/Graphen verstehen/interpretieren
4. Schülervorstellungen beurteilen

In der Theoretischen Physik ist das Konzept des Formelverständnisses essentiell und sollte ebenfalls geübt werden. Dabei geht es nicht darum, Werte in Formeln einzusetzen, sondern qualitative Informationen aus Formeln zu gewinnen, bzw. in den mathematischen Formalismus hineinzupinterpretieren. Folgende Kategorien von Fragen haben sich in unseren Lehrveranstaltungen bewährt:

1. Übersetzung Physik-Mathematik
2. Übersetzung Mathematik-Physik
3. Interpretation von Formeln
4. Abschätzungen aus Formeln

Beispiele sind auch für diese Arten von Fragen im Artikel aufgeführt.

Die PI kam in unseren Lehrveranstaltungen bei allen Studierenden gut an und wurde nach der ersten Anwendung immer häufiger von Studierenden eingefordert. Allerdings muss in der PI mit mehr Zeit pro Thema eingeplant werden als in klassischen Vorlesungen. Dieser zeitliche Mehraufwand sollte aber durch ein tieferes und besseres Verständnis der behandelten Themen gerechtfertigt sein.

7. Literatur

- [1] MAZUR, Eric: *Peer Instruction* : Springer Berlin Heidelberg, 2017
- [2] RIEGLER, Peter ; KAUTZ, Christian: *Physik der Hochschullehre : Die Hochschullehre ist zu einem gesellschaftlich wichtigen Forschungsgegenstand der Physik geworden*. In: *Physik Journal* 20 (2021), Nr. 5, S. 43–47
- [3] HEINER, Cynthia E. ; KURZ, Günther: *Wenn sprechen mehr bringt als zuhören : Das Lehrkonzept "Peer Instruction" hilft, das Physikverständnis zu erhöhen*. In: *Physik Journal* 21 (2022), Nr. 6, S. 35–38
- [4] POLLOCK, Steven J. ; CHASTEEN, Stephanie V. ; DUBSON, Michael ; PERKINS, Katherine K. ; SINGH, Chandralekha ; SABELLA, Mel ; REBELLO, Sanjay: The use of concept tests and peer instruction in upper-division physics. In: AIP, 2010 (AIP Conference Proceedings), S. 261–264
- [5] GOLDBABER, Steve ; POLLOCK, Steven ; DUBSON, Mike ; BEALE, Paul ; PERKINS, Katherine ; SABELLA, Mel ; HENDERSON, Charles ; SINGH, Chandralekha: Transforming Upper-Division Quantum Mechanics: Learning Goals and Assessment. In: AIP, 2009 (AIP Conference Proceedings), S. 145–148
- [6] CHASTEEN, Stephanie V. ; POLLOCK, Steven J. ; SABELLA, Mel ; HENDERSON, Charles ; SINGH, Chandralekha: A Research-Based Approach to Assessing Student Learning Issues in Upper-Division Electricity & Magnetism. In: AIP, 2009 (AIP Conference Proceedings), S. 7–10
- [7] MCKAGAN, S. B. ; PERKINS, K. K. ; WIEMAN, C. E.: *Design and validation of the Quantum Mechanics Conceptual Survey*. In: *Physical Review Special Topics - Physics Education Research* 6 (2010), Nr. 2
- [8] KULGEMEYER, Christoph ; RIESE, Josef: *From professional knowledge to professional performance: The impact of CK and PCK on teaching quality in explaining situations*. In: *Journal of Research in Science Teaching* 55 (2018), Nr. 10, S. 1393–1418
- [9] WIKIMEDIA COMMONS: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Brec_hungsindex_Wasser_1-de.svg (Stand: 07/2022)