

Educative Curriculum Materials zum Treibhauseffekt - Lehrendenmaterial für den Physikunterricht -

Ivo Naake*, Thomas Wilhelm*

*Institut für Didaktik der Physik, Goethe-Universität Frankfurt am Main, Max-von-Laue-Str. 1, 60438 Frankfurt
naake@physik.uni-frankfurt.de, wilhelm@physik.uni-frankfurt.de

Kurzfassung

Der Treibhauseffekt bietet eine gute Möglichkeit, auch im Physikunterricht Klimabildung zu betreiben. In ihrem Promotionsprojekt hat Sarah Wildbichler deswegen ein Konzept zum Treibhauseffekt für den Physikunterricht entworfen, das explizit Lernendenvorstellungen berücksichtigt. Bisher wurde dieses Konzept im Lernendenlabor der Universität Innsbruck durchgeführt und evaluiert. Damit dieses Material auch im Regelunterricht eingesetzt und evaluiert werden kann, muss es jedoch angepasst werden. Zusätzlich muss geprüft werden, welche Unterstützung Lehrkräfte für die Integration benötigen. Eine Möglichkeit nicht nur das Material in den Unterricht zu bringen, sondern gleichzeitig auch Lehrkräften Hilfestellungen beim Unterrichten des Treibhauseffekt zu bieten, stellen Educative Curriculum Materials dar. Diese umfassen nicht nur Materialien für Lernende, sondern auch Hintergrundinformationen für Lehrende zu beispielsweise fachlichen oder didaktischen Grundlagen. Der Beitrag beschreibt zunächst das ursprüngliche Material und typische Lernendenvorstellungen über den Treibhauseffekt und stellt anschließend das abgewandelte Material für die Lehrkräfte an einigen Beispielen vor.

1. Educative Curriculum Materials

Lehrkräften kommt bei der Implementation neuer Unterrichtskonzepte eine zentrale Rolle zu. Neue Konzepte werden jedoch vor allem für die Lernenden konzipiert und berücksichtigen nicht, dass auch Lehrkräfte etwas Neues lernen (müssen), wenn sie mit neuentwickelten Materialien interagieren (Ball & Cohen, 1996, 6; Schneider & Krajcik, 2002, 223). Um also neue Konzepte bestmöglich in den Unterricht zu integrieren, benötigen auch Lehrkräfte Unterstützung und Hintergrundinformationen z.B. zu Fachinhalten oder didaktischen Hintergründen (Remillard, 2005, 239). Eine Möglichkeit, um neben der Verbesserung des Lernens der Schüler:innen auch das Lernen von Lehrpersonen zu fördern, stellen sogenannte „Educative Curriculum Materials“ dar (Schneider et al., 2005, 3). Der Begriff wird besonders in der englischsprachigen Literatur verwendet. Breuer et al. (2022) schlagen im Deutschen den Begriff „materialgestützte Unterrichtskonzeption“ als Übersetzung vor. Alternativ wird auch der Begriff „Lehrkräftehandreichung“ vorgeschlagen. Für diesen Artikel wird jedoch der englischsprachige Begriff bzw. die Abkürzung ECM verwendet, weil dieser das Lernen der Lehrkräfte stärker betont. Dieses Lernen drückt sich z.B. dadurch aus, dass das pedagogical content knowledge (PCK) (Vgl. Shulman, 1986) weiterentwickelt wird (Krajcik & Delen, 2017, 1). ECM eignen sich darüber hinaus gut für komplexe Themen wie den Klimawandel (Krajcik & Delen, 2017, 4). Um ihr volles Potential entfalten zu können, sind explizite Unterstützungsangebote und Werkzeuge für Lehrkräfte von Nöten. Diese werden „educative features“

genannt (Hanuscin et al., 2024). Sie können die Form von Tipps, callout boxes oder fachlichen oder didaktischen Hintergrundinformationen haben (Davis et al., 2017). Auch Stundenverläufe, Impulsfragen oder mögliche Lernendenantworten gehören dazu (Hanuscin et al., 2024). Educative features sind somit Bausteine aus denen sich ECM zusammensetzen. Neben diesen educative features, die v.a. auf die Unterstützung der Lehrkräfte abzielen, umfassen ECM allerdings auch weitere Materialien und Ressourcen, die für Lehrer:innen von Bedeutung sein können, wie z.B. Materialien für Schüler:innen.

Bevor die ECM für den Treibhauseffekt vorgestellt werden, werden zunächst gängige Lernendenvorstellungen zum Treibhauseffekt aufgeführt, weil diese für die Unterrichtskonzeption, die den ECM zugrunde liegen, eine wichtige Rolle spielen. Außerdem wird noch das Material von Sarah Wildbichler vorgestellt, auf dessen grundlegenden Ideen die ECM basieren.

2. Lernendenvorstellungen zum Treibhauseffekt

Bezüglich des Treibhauseffekts gibt es viele bekannte Lernendenvorstellungen. In der Literatur haben sich drei große Vorwissenstypen dafür herauskristallisiert, wie sich Schüler:innen den Treibhauseffekt sowie die Ursachen und Hintergründe für die globale Erwärmung vorstellen: (1) Isolierte Wissensstücke: Lernende dieses Vorwissenstyps haben (fast) keine Vorstellungen zum Treibhauseffekt. Fragt man sie nach einer Erklärung für die globale Erwärmung oder den Treibhauseffekt, stellen sie ad hoc Vermutungen auf, die aus einzelnen Wissens-elementen bestehen. Da sie jedoch kaum bis kein Vorwissen zu dieser Thematik

haben, akzeptieren sie die physikalische Erklärung relativ schnell. (2) Reduzierter Wärmeoutput: Die Lernenden dieses Typs denken, dass die Sonnenstrahlung zwar durch die Atmosphäre zur Erde gelangen kann, diese aber nicht mehr verlassen kann. Sie unterscheiden nicht zwangsweise zwischen Strahlungsarten, sondern gehen davon aus, dass Sonnenstrahlen an der Oberfläche der Erde reflektiert werden und dann durch die halbdurchlässige Schicht erneut zurückreflektiert werden. (3) Erhöhter Wärmeinput: Lernende dieses Vorwissentyps gehen davon aus, dass sich die Erde erwärmt, weil mehr Sonnenstrahlen die Erde erreichen. Dafür sehen sie in zwei Gründen die Ursache. Zum einen wird das Ozonloch dafür verantwortlich gemacht, dass mehr Strahlung zur Erde gelangt. Je größer das Ozonloch (z.B. durch Luftverschmutzung), desto mehr Strahlung kann durch die Atmosphäre zur Erde gelangen. Zum anderen denken einige Lernende, dass die Sonne mehr Strahlung in Richtung Erde aussendet und sie sich deswegen erwärmt (Reinfried & Tempelmann, 2014a&b; Schubatzky et al., 2024).

Lernende des zweiten Typs können bei Konfrontation mit neuen Ideen ihre ursprünglichen mentalen Modelle erweitern und rekonstruieren. Somit ist ein *conceptual change* bei Lernenden der ersten beiden Typen relativ einfach anzuregen. Bei Lernenden des letzten Typs fällt dies schwerer. Besonders hinderlich dabei ist die Vorstellung, dass die Erwärmung der Atmosphäre mit einer erhöhten Zufuhr an Wärme begründet wird (Reinfried & Tempelmann, 2014b, 50).

Um mit den Vorstellungen umzugehen und einen Konzeptwechsel zu ermöglichen, werden verschiedene Konzeptwechselstrategien angewandt. Der Fokus dabei liegt auf den Anknüpfungsstrategien, um einen kontinuierlichen Lernweg zu ermöglichen (Vgl. Wilhelm & Schecker, 2018).

Über diese drei Präkonzepttypen hinaus wurde in der Literatur weitere Vorstellungen identifiziert. An dieser Stelle kann auf die Artikel von Schubatzky et al. (2024), Shepardson et al. (2017a&b), Varela et al. (2020) oder Wildbichler et al. (2024) verwiesen werden.

3. Ein Konzept zum Treibhauseffekt

3.1. Das Material

Das von Wildbichler in Innsbruck entwickelte Material wurde für eine achte Klasse konzipiert und behandelt somit den Treibhauseffekt etwas früher, als es viele andere Konzepte intendieren. Die Unterrichtsreihe umfasst minimal drei Stunden, kann aber für ein tiefergehendes konzeptionelles Verständnis auf sechs Stunden erweitert werden. Damit die Lernenden nicht zu stark überfordert werden, ist Vorwissen in den Themengebieten Optik und Wärmelehre vorteilhaft. Selbst mit Vorwissen in diesen Teilgebieten, ist der Treibhauseffekt in der Sekundarstufe I jedoch ein komplexes Thema. Deswegen wurden drei grundlegende Prinzipien für die Reihe formuliert: (1) Bei

(vermutlich) geringem Vorwissen und einer hohen Komplexität eignet sich die Methode der instruktionalen Erklärung (Kulgemeyer, 2018) gut als Methode für die Unterrichtseinheit. (2) Die Inhalte werden in Teilphänomene zergliedert, die den Grundideen des Treibhauseffekts nach Shepardson et al. (2017a&b) entsprechen. (3) Die verbalen Erklärungen werden durch Visualisierungen unterstützt, um den Cognitive Load (Vgl. Mayer & Moreno, 2003) zu reduzieren (Wildbichler et al. 2025, im Druck). Die in (2) erwähnten Teilphänomene und die in (3) angesprochenen Visualisierungen stellen gleichzeitig die Schwerpunkte des Materials von Wildbichler dar.

3.2. Die Zerlegung in Teilphänomene

In der Unterrichtskonzeption wird der Treibhauseffekt in drei Teilphänomene zerlegt. Zunächst wird das Energiegleichgewicht (inkl. Energiequellen und Energietransfer), anschließend die Wechselwirkung zwischen Strahlung und Molekülen (inkl. der Zusammensetzung der Atmosphäre und der besonderen Rolle von Treibhausgasen) und abschließend der natürliche und anthropogene Treibhauseffekt behandelt. Die Zerlegung in Teilphänomene hat das Ziel, dass der intrinsische cognitive load reduziert wird. Dies soll durch zwei Mechanismen geschehen: 1. Durch ein pre-training, dem gezielten Vermitteln von grundlegenden Informationen oder Konzepten vor der Bearbeitung komplexerer Inhalte und 2. durch die Sequenzierung innerhalb der einzelnen Teilphänomene, v.a. bei der Erarbeitung des Energiegleichgewichts und des anthropogenen Treibhauseffekts. Des Weiteren wurden aus Elementarisierungsgründen verschiedene Inhalte weggelassen. Dazu gehören z.B. die Wellenlänge von Strahlung oder die quantenmechanische Erklärung der Wechselwirkung zwischen Strahlung und Molekülen, weil diese zu komplex für eine 8. Jahrgangsstufe sind. Außerdem wird nicht auf den Unterschied zwischen naher und ferner Infrarotstrahlung eingegangen, da diese Unterscheidung nicht relevant ist für ein basales Verständnis des Treibhauseffekts.

3.3. Visualisierungen im Material

Neben der Zerlegung in Teilphänomene spielen auch die gewählten Repräsentationsformen (siehe Abb. 1) eine zentrale Rolle für das Material. Im Gegensatz zu klassischen Schulbuchdarstellungen wurde hier z.B. auf eine Farbgebung der verwendeten Pfeile verzichtet. Die Infrarotstrahlung wird darüber hinaus durch gestrichelte Pfeile dargestellt, um zu betonen, dass diese für den Menschen unsichtbar ist. Außerdem wurden verschiedene Pfeilformen gewählt, je nachdem ob die Strahlung transmittiert, gestreut oder absorbiert wird.

Neben der Strahlung werden auch die Moleküle der in der Atmosphäre vorkommenden Gase visualisiert. Für die Moleküle wurde sich dazu entschieden, die chemische Formel als Visualisierungsform zu verwenden. Diese Repräsentationsformen wurden

ausgewählt, weil sie bei Akzeptanzbefragungen mit Lernenden den größten Zuspruch erhalten haben und am ehesten selbst übernommen wurden (Wildbichler et al., 2025, im Druck). Die einzelnen Darstellungen basieren auf den Vorarbeiten von Zloklikovits & Hopf (2021) (Strahlung) und Budimaier & Hopf (2023) (Moleküle).

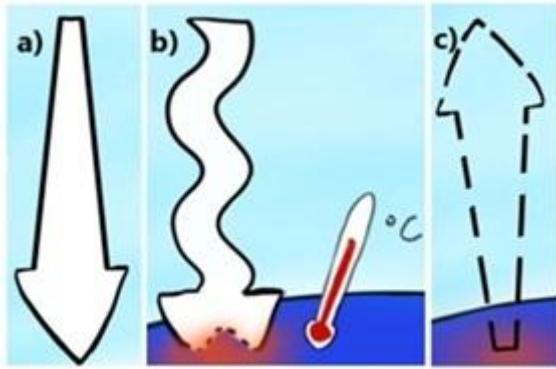


Abb. 1: a) einfallende, transmittierte Strahlung, b) einfallende, absorbierte Strahlung, c) Infrarotstrahlung (mit freundlicher Genehmigung von Sarah Wildbichler und Thomas Schubatzky)

4. Weiterentwicklung des Materials

Die Unterrichtskonzeption von Wildbichler wurde bereits in mehreren Lernendenlaboren durchgeführt und teilweise evaluiert. Die Konzeption soll nun auch in den Regelunterricht integriert werden. Um ein Gelingen dieses Vorhabens zu ermöglichen, muss die ursprüngliche Konzeption jedoch angepasst werden, weil sich die Bedingungen eines Lernendenlabors von denen des Regelunterrichts unterscheiden. Ziel ist es allerdings weiterhin, dass sich das konzeptionelle Verständnis der Schüler:innen durch die Konzeption verbessert und dass man ihnen den Treibhauseffekt näherbringt.

Neben dem eigentlichen Material nehmen auch Lehrpersonen einen großen Einfluss auf den Erfolg des Unterrichts (Li et al., 2021; Mahler et al., 2017). Ein weiteres Ziel des Projekts ist es deswegen, Lehrkräfte mit einer Handreichung zu der Unterrichtskonzeption zum Treibhauseffekt zu unterstützen, die nicht nur Materialien für die Schüler:innen, sondern auch Hintergrundinformationen in Form von essentiellen features (Obczovsky et al., 2023) und educative features (Schneider & Krajcik, 2002) für die Lehrkräfte bereitstellt. Educative features wurden bereits im ersten Abschnitt thematisiert. Essentielle features haben das Ziel, Lehrkräften dabei zu helfen, herauszufinden, welche Merkmale eines Materials zentral sind, um die Schüler:innen auf den vorgesehenen Lernpfad zu führen. Dazu gehören z.B. die zentralen Ideen des Materials und ihre Reihenfolge, verwendete Konzeptwechselstrategien oder Methoden (Obczovsky et al., 2023). Das Material soll also nicht nur dafür sorgen, dass Schüler:innen etwas über den Treibhauseffekt lernen, sondern auch dazu beitragen, dass Lehrkräfte etwas über den Treibhauseffekt lernen (ECM).

Im Fokus stehen dabei besonders die Entwicklung des PCK zur Unterrichtskonzeption von Sarah Wildbichler.

Um Lehrkräfte bei der Implementation der essentiellen features, d.h. der Grundideen, zu unterstützen, muss berücksichtigt werden, dass sich sowohl die Lehrkräfte als auch ihre Lernenden voneinander unterscheiden werden. Die Lehrer:innen werden deswegen unterschiedliche Formen an Unterstützung benötigen bzw. bei der Arbeit mit ECM benutzen (Schneider et al., 2005). Deswegen kommen in dem Material verschiedene educative features vor, um diese unterschiedlichen Bedürfnisse zu berücksichtigen. Sie umfassen fachliche (z.B. zum Strahlungshaushalt oder zur Wechselwirkung zwischen Strahlung und Molekülen) und didaktische (z.B. zu möglichen Lernendenvorstellungen) Hintergrundinformationen, Beispiele für Stundenverlaufspläne inklusive möglicher Lernziele, Tipps und Hinweise oder Anmerkungen zur Lernendenperspektive (z.B. mögliche Antworten, die von den Schüler:innen kommen können).

Key Ideas

An dieser Stelle werden die Kerngedanken des Unterrichtsmaterials übersichtlich zusammengefasst:

Tabelle 3: Key Ideas

Übergordnete Idee	Key Idea
1 Strahlungshaushalt	Die Erde wird von der Sonne in Form von sichtbarem Licht bestrahlt.
2	Davon wird ein Teil absorbiert und ein anderer Teil reflektiert.
3	Die Erde selbst sendet langwelliges, unsichtbares Licht aus.
4 Energiegleichgewicht	Die Summe aus reflektierter Sonnenstrahlung und emittierter Infrarotstrahlung der Erde ist genau so groß wie die einfallende Strahlung von der Sonne.
5 Atmosphäre	Die Atmosphäre setzt sich aus verschiedenen Molekülen zusammen.
6	Die Moleküle sind gleichmäßig in der Atmosphäre verteilt.
7 Treibhausgas und Wechselwirkung mit der Strahlung	Einige der Gasmoleküle lassen die Wärmestrahlung hindurch, andere absorbieren sie. Letztere nennt man Treibhausgas.
8	Die Treibhausgase können Strahlung in alle Richtungen emittieren, auch in Richtung der Erde.
9 Natürlicher Treibhauseffekt	Dadurch erwärmt sich die Erde (und die Atmosphäre) zusätzlich bis sich ein Gleichgewicht einstellt. Durch diese Gleichgewichtstemperatur wird das Leben auf der Erde, so wie wir es kennen, erst möglich.
10 Anthropogener Treibhauseffekt	Menschliche Aktivitäten erhöhen die Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre, wodurch der natürliche Treibhauseffekt verstärkt wird. Dadurch erwärmt sich die Erde zusätzlich. Man spricht von globaler Erwärmung.

Didaktische Begründung der Inhalte und der Reihenfolge

Diese Key Ideas wurden unter Berücksichtigung gängiger Lernvoraussetzungen ausgewählt. Die Behandlung des Strahlungshaushalts und des Energiegleichgewichts soll die verschiedenen Strahlungsarten (IR-Strahlung und das Sonnenlicht) hervorheben, weil viele Lernende nicht zwischen diesen unterscheiden. Durch die Behandlung der Wechselwirkung wird die besondere Rolle der Treibhausgase in der Atmosphäre bewusst gemacht. Es wird außerdem klar, wie die vorher behandelten Strahlungsarten mit unterschiedlichen Gasen wechselwirken können. Erst wenn diese Grundlagen verstanden wurden, können die Lernenden den natürlichen Treibhauseffekt verstehen. Danach ist es nur noch ein kleiner Schritt, um auch den anthropogenen Treibhauseffekt zu verstehen. Durch diese Zerlegung in elementare Sinneinheiten kann außerdem der sogenannte *cognitive load* verringert werden. Das Vermitteln von grundlegenden Teilelementen ermöglicht es, die deutlich komplexeren Zusammenhänge zu vereinfachen. Außerdem folgt der Unterrichtsgang so einem klaren roten Faden und die Grundlagen werden durch das Behandeln des natürlichen und anthropogenen Treibhauseffektes noch einmal wiederholt und vertieft. Um den *cognitive load* zusätzlich zu reduzieren, wurden außerdem einige fachliche Ideen für die Lernenden weggelassen, die eigentlich auch zur Behandlung des Treibhauseffektes beitragen. Dazu gehören: 1) die Wellenlänge von Strahlung, 2) Rolle der UV-Strahlung, 3) Unterschied zwischen ferner und naher Infrarotstrahlung, 4) die Rolle der IR-Strahlung der Sonne 5) die Quellen von Treibhausgasen, 6) CO₂-Senken und der CO₂-Zyklus, 7) quantenmechanische Erklärung der Wechselwirkung zwischen Strahlung und Treibhausgas, 8) Benennung des Albedo-Effekt und 9) die „Schneeball-Erde“.

Hinweis:

Die Key Ideas sollten in der vorgegebenen Reihenfolge behandelt werden, da die jeweiligen vermittelten Inhalte wichtig sind für die folgenden Inhalte.

Weggelassene Ideen:

Quellen von THG, CO₂-Senken & Auswirkungen des anthropogenen THE → sind fachliche Ideen zum Klimawandel und für ein Verständnis des THE nicht relevant;
Wellenlänge von Strahlung & quantenmechanische Erklärung der Wechselwirkung zwischen THG und IR → zu komplex für diese Klassenstufe;
Unterschiede nahes und ferne IR-Strahlung, IR-Strahlung der Sonne & Albedo → nicht notwendig für ein basales Verständnis, stehen dem Konzept aber nicht hinderlich im Weg;
UV-Strahlung → um die Ozonlochvorstellung zu umgehen

Abb. 2: Didaktische Hintergrundinformationen (eigene Darstellung)

Ergebnisse der Implementationsforschung zeigen darüber hinaus, dass Lehrkräfte Materialien immer an ihre verschiedenen Klassen anpassen (Ball & Cohen, 1996) und bei der Arbeit mit neuen didaktischen Innovationen Freiheiten bezüglich der Umsetzung haben wollen (Breuer et al., 2022). Deswegen werden in den Materialien für die Lehrkräfte auch Vorschläge dafür gemacht, wie die einzelnen Stunden differenziert und abgewandelt werden können. Darüber hinaus wird auch zusätzliches Material erstellt bzw. auf andere Quellen verwiesen. In Abbildung 2 und 3 ist

das weiterentwickelte Material beispielhaft dargestellt.

Aufgabe 2

Vervollständigt nun den Lösungstext, indem ihr die richtigen Begriffe einsetzt.

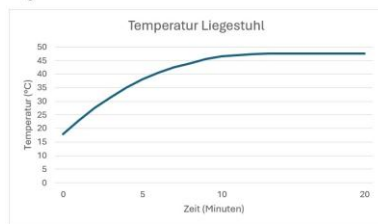
Durch die Atmosphäre gelangt **Energie von der Sonne** vor allem in Form von _____ (sichtbarem Licht/ Infrarotstrahlung/UV-Strahlung) zu den Liegestühlen. Ein Teil des Lichts wird **gestreut**, der andere Teil des Lichts wird **aufgenommen**. Dadurch erhöht sich die **thermische Energie** der Liegestühle. Am hellen Stuhl wird _____ (mehr/weniger) Licht gestreut und _____ (mehr/weniger) Licht aufgenommen. Am dunklen Stuhl wird _____ (mehr/weniger) Licht aufgenommen und _____ (mehr/weniger) Licht gestreut. Daher erwärmt sich der dunkle Stuhl _____ (stärker/schwächer). Beide Stühle **geben dann wieder Energie ab**, und zwar in Form von _____ (sichtbarem Licht/ Infrarotstrahlung /UV-Strahlung). Der _____ (helle/dunkle) Stuhl gibt mehr _____ (sichtbares Licht/ Infrarotstrahlung /UV-Strahlung) ab, da er sich stärker erwärmt hat.

Differenzierungsvorschlag:

Statt die Begriffe hinter den Lücken vorzugeben, können diese entweder komplett weggelassen werden oder es werden nur die richtigen Lösungen gesammelt vor/nach dem Lückentext aufgeführt.

Aufgabe 3

Ihr messt die Temperatur des dunklen Liegestuhls mithilfe eines Temperatursensors. Du beginnst deine Messung, als der Stuhl in die Sonne gestellt wird. Deine Ergebnisse sind in dem Diagramm unten dargestellt.



Adaptionsvorschläge:

Aufgabe 3 könnte man auf verschiedene Weisen abändern:

- Zum einen könnten die Lernenden selbstständig *experimentieren*. (zeitaufwendig) Dafür sollte die Lampe vorher eingeschaltet werden, um sich bereits aufzuheizen.
- Man könnte ein *Video* des Experiments zeigen, um aufzuzeigen wo die Daten herkommen
- Man kann zwei Kurven in das Diagramm übernehmen (je eine pro Stuhl)
- Sollte man auf eine Wärmebildkamera Zugriff haben, kann man bei diesem AB auch noch die IR-Strahlung visualisieren.

Abb. 3: Differenzierungs- und Adaptionsvorschläge (eigene Darstellung)

Neben der bereits erwähnten educative features und dem Material für die Schüler:innen wird den Lehrkräften auch zusätzliches Material zur Verfügung gestellt, mit dem sie weitere Variationen in den Unterricht bringen können. Obwohl den Lehrkräften bei der Umsetzung viele Freiheiten gelassen und Alternativen vorgeschlagen werden, ist es ein weiteres Ziel des Promotionsprojekts, dass bezüglich der Kerngedanken des Materials und der gewählten Visualisierungsformen eine hohe Umsetzungstreue erzielt wird.

5. Ausblick

Aktuell werden die ECM mit Lehrkräften pilotiert. Dabei wird untersucht wie Lehrkräfte das Material beurteilen und welche Schwächen und Stärken identifiziert werden können. Außerdem wird analysiert, ob die ECM edukativ für Lehrkräfte sind, indem das wahrgenommene PCK der Lehrkräfte untersucht wird.

Neben der Pilotierung mit Lehrkräften wird außerdem untersucht, ob die getroffenen Abwandlungen des Materials von Wildbichler auch im Regelunterricht dazu beitragen, das konzeptionelle Verständnis von Schüler:innen zu verbessern. Dafür wird die Unterrichtsreihe zunächst in einer Pilotierung in einer 8. Klasse durchgeführt und das konzeptionelle Verständnis bezüglich des Treibhauseffekts mit Hilfe des CCCI-422 von Schubatzky et al. (2023) in einem Prä-Post-Test-Design untersucht.

Im Anschluss an diese Pilotierungsphase werden die daraus generierten Einblicke genutzt, um das Material noch einmal weiterzuentwickeln. Ziel ist es, im Schuljahr 25/26 mit der Hauptuntersuchung zu beginnen.

6. Literatur

- Ball, D. & Cohen, D. K. (1996). Reform by the Book: What Is - or Might be - the Role of Curriculum Materials in Teacher Learning and Instructional Reform? *Educational Researcher*, 25(9), 6-8,14.
- Breuer, J., Vogelsang, C. & Reinhold, P. (2022). Nutzungsverhalten von Lehrkräften bei der Implementierung einer physikdidaktisch innovativen Unterrichtskonzeption. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 28(1).
- Budimaier, F. & Hopf, M. (2023). Alternative Darstellungsformen des Teilchenmodells. In C. Fridrich, B. Herzog-Punzenberger, H. Knecht, N. Kraker, P. Riegler & G. Wagner (Hrsg.), *Forschungsperspektiven 15*. 97–115. LIT Verlag. https://doi.org/10.52038/978364351139_8
- Davis, E. A., Palincsar, A. S., Smith, P. S., Arias, A. M. & Kademian, S. M. (2017). Educative Curriculum Materials: Uptake, Impact, and Implications for Research and Design. *Educational Researcher*, 46(6), 293–304.
- Hanuscin, D., Borda, E., Melton, J. & Mikeska, J. N. (2024). Designing Educative Curriculum Materials for Teacher Educators: Supporting Pre-service Elementary Teachers' Content Knowledge for Teaching About Matter and Its Interactions. *International Journal of Science and Mathematics Education*.
- Krajcik, J. & Delen, I. (2017). The Benefits and Limitations of Educative Curriculum Materials. *Journal of Science Teacher Education*, 28(1), 1–10.
- Kulgemeyer, C. (2018). Towards a framework for effective instructional explanations in science teaching. *Studies in Science Education*, 54(2), 109–139.
- Li, C. J., Monroe, M. C., Oxarart, A. & Ritchie, T. (2021). Building teachers' self-efficacy in teaching about climate change through educative curriculum and professional development. *Applied Environmental Education & Communication*, 20(1), 34–48.
- Mahler, D., Großschedl, J. & Harms, U. (2017). Using doubly latent multilevel analysis to elucidate relationships between science teachers' professional knowledge and students' performance. *International Journal of Science Education*, 39(2), 213–237.
- Mayer, R. E., & Moreno, R. (2003). Nine ways to reduce cognitive load in multimedia learning. *Educational Psychologist*, 38(1), 43–52.
- Obczovsky, M., Schubatzky, T. & Haagen-Schützenhöfer, C. (2023). Supporting

- Preservice Teachers in Analyzing Curriculum Materials. *Education Sciences*, 13(5), 518.
- Reinfried, S. & Tempelmann, S. (2014a). The Impact of Secondary School Students' Preconceptions on the Evolution of their Mental Models of the Greenhouse effect and Global Warming. *International Journal of Science Education*, 36(2), 304–333.
- Reinfried, S., & Tempelmann, S. (2014b). Wie Vorwissen das Lernen beeinflusst – Eine Lernprozessstudie zur Wissenskonstruktion des Treibhauseffekt-Konzepts. *Zeitschrift für Geographiedidaktik | Journal of Geography Education*, 42(1), S. 31–56. <https://doi.org/10.18452/23977>
- Remillard, J. T. (2005). Examining Key Concepts in Research on Teachers' Use of Mathematics Curricula. *Review of Educational Research*, 75(2), 211–246.
- Schneider, R. M. & Krajcik, J. (2002). Supporting Science Teacher Learning: The Role of Educative Curriculum Materials. *Journal of Science Teacher Education*, 13(3), 221–245.
- Schneider, R. M., Krajcik, J. & Blumenfeld, P. (2005). Enacting Reform-Based Science Materials: The Range of Teacher Enactments in Reform Classrooms. *Journal of Research in Science Teaching* 42(3). 283–312.
- Schubatzky, T., Haagen-Schützenhöfer, C., Wackermann, R., Wöhlke, C. & Wildbichler, S. (2024). Navigating the complexities of student understanding: Exploring the coherency of students' conceptions about the greenhouse effect. *Science Education*, 108(4), 1134–1161.
- Schubatzky, T., Wackermann, R., Wöhlke, C., Haagen-Schützenhöfer, C., Jedamski, M., Lindemann, H. & Cardinal, K. (2023). Entwicklung des Concept-Inventory CCCI-422 zu den naturwissenschaftlichen Grundlagen des Klimawandels. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 29(1).
- Shepardson, D. P., Roychoudhury, A., & Hirsch, A.S. (2017a). Using conceptual and physical models to develop students' mental models of the greenhouse effect. In D.P. Shepardson, A. Roychoudhury, & A.S. Hirsch (Eds.). *Teaching and learning about climate change. A framework for educators*. New York: Routledge. 85–105.
- Shepardson, D. P., Roychoudhury, A., Hirsch, A.S. & Top, S. M. (2017b). Students' Conception of a Climate System: Implications for Teaching and Learning. In D.P. Shepardson, A. Roychoudhury, & A.S. Hirsch (Eds.). *Teaching and learning about climate change. A framework for educators*. New York: Routledge. 69–84.
- Shulman, L. S. (1986). Those Who Understand: Knowledge Growth in Teaching. *Educational Researcher*, 15(2), 4–14.
- Varela, B., Sesto, V. & García-Rodeja, I. (2020). An Investigation of Secondary Students' Mental Models of Climate Change and the Greenhouse Effect. *Research in Science Education*, 50(2), 599–624.
- Wildbichler, S., Haagen-Schützenhöfer, C., Obczovsky, M. & Schubatzky, T. (2025/im Druck). Mit visuellen Repräsentationen über den Treibhauseffekt lernen.
- Wildbichler, S., Haagen-Schützenhöfer, C. & Schubatzky, T. (2024). Students' ideas about the scientific underpinnings of climate change: a systematic review of the literature. *Studies in Science Education*, 1–53.
- Wilhelm, T. & Schecker, H. (2018). Strategien für den Umgang mit Schülervorstellungen. In: Schecker, H., Wilhelm, T., Hopf, M. & Duit, R. (Hrsg.) (2018). *Schülervorstellungen und Physikunterricht. Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis*. Springer Spektrum. Berlin.
- Zloklikovits, S. & Hopf, M. (2021). Evaluating key ideas for teaching electromagnetic radiation. *Journal of Physics: Conference Series*, 1929(1), 12063. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1929/1/012063>