

(Weiter-) Entwicklung eines Klimawandel-Testinstruments

Thomas Schubatzky*, Alina Pichler*, Claudia Haagen-Schützenhöfer*

*Karl-Franzens-Universität Graz, Institut für Physik, Physikdidaktik, Universitätsplatz 5, 8010 Graz;
thomas.schubatzky@uni-graz.at, alina.pichler@uni-graz.at, claudia.haagen@uni-graz.at

Kurzfassung

Der Klimawandel als Lerngegenstand des NaWi-Unterrichts erfährt zunehmend an Bedeutung. Neben der Festlegung von „climate action“ als eines der Ziele von Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) findet auch eine verstärkte Integration des Themas Klimawandel in Fachlehrpläne statt. Ein basales Verständnis naturwissenschaftlicher Grundlagen des Klimawandels wird insgesamt als eines der Schlüsselemente identifiziert, um SchülerInnen für eine gesellschaftliche Teilhabe an der Klimawandeldiskussion vorzubereiten. Um den Wissensstand von SchülerInnen der Sekundarstufe II über derartige Grundlagenkonzepte einschätzen zu können, wurde ein Multiple-Choice Testinstrument entwickelt. Dieses setzt sich aus insgesamt 30 Items zusammen, die teilweise aus einem bereits bestehenden Instrument entnommen, übersetzt und modifiziert wurden sowie aus neu entwickelten Items. Als Auswahlkriterien für die im Testinstrument adressierten Klimawandel-Konzepte fungierte eine in Australien durchgeführte Delphi-Studie. In der ersten Entwicklungsphase wurde das Multiple-Choice Testinstrument bei 338 SchülerInnen der 9. bis 12. Jahrgangsstufe in Österreich eingesetzt und erprobt. Die Ergebnisse wurden einer Rasch-Analyse unterzogen, um Hinweise für die Weiterentwicklung des Testinstruments zu erhalten. Die Ergebnisse zeigen, dass für den Klimawandel spezifische Konzepte wie die Wechselwirkung von Treibhausgasen mit Infrarotstrahlung oder der Kohlenstoffkreislauf besonders schwierige Konzepte darstellen.

1. Einleitung

Der durch menschliche Aktivitäten verursachte Ausstoß von Treibhausgasen, insbesondere von CO₂, führt zu einer Klimaveränderung, welche die Menschheit vor noch nie dagewesene ökonomische, ökologische und gesellschaftliche Herausforderungen stellt (IPCC, 2018). Ein adäquater Umgang mit dieser Herausforderung des Klimawandels setzt dabei sowohl einen gesellschaftlichen Konsens als auch die Handlung von jedem und jeder Einzelnen voraus. Für SchülerInnen als zukünftige WählerInnen, EntscheidungsträgerInnen und Mitglieder unserer Gesellschaft nimmt der Klimawandel somit eine zentrale Rolle ein. Dies verdeutlicht u.a. auch die weltweite Formation unterschiedlicher Bewegungen, wie z.B. „Fridays for Future“, aber auch die Aufnahme der Thematik in Fachlehrpläne.

Prinzipiell kann nicht automatisch davon ausgegangen werden, dass ein höheres Wissen über naturwissenschaftliche Grundlagen des Klimawandels zu einem klimafreundlicheren Verhalten führt. Klar ist jedoch, dass ein fundiertes Wissensreservoir eine der notwendigen Voraussetzungen für adäquate Reaktionen auf den Klimawandel darstellt (z. B. Bedford, 2016; Bord, O'connor & Fisher, 2000).

Um zukünftige Bildungsangebote oder Unterrichtskonzepte zu den naturwissenschaftlichen Grundlagen des Klimawandels entwickeln zu können, ist es im Sinne der didaktischen Rekonstruktion

(Kattmann, 2007) notwendig die Lernendenvoraussetzungen bzw. die Perspektive der Lernenden vorab zu kennen.

In den letzten Jahrzehnten wurden sehr viele Studien über Schülervorstellungen zum Thema Klimawandel durchgeführt (z. B. Chang & Pascua, 2016; Hansen, 2010; Niebert, 2010; Shepardson, Niyogi, Choi & Charusombat, 2009; Varela, Sesto & García-Rodeja, 2018), die sich oftmals auf den Klimawandel als Gesamtphänomen bezogen. Die wesentlichen globalen Erkenntnisse daraus zeigen, dass SchülerInnen den Klimawandel oft mit anderen Phänomenen wie der Luftverschmutzung oder dem Ozonloch verwechseln bzw. damit vermischen (Andersson & Wallin, 2000). Außerdem stellen sich SchülerInnen Treibhausgase (oder die Ozonschicht) teilweise als eine Art „Schutzschicht“ in der Atmosphäre vor, die eine „Strahlenfalle“ (Niebert & Gropengiesser, 2013) für Strahlung der Erde bildet. Eine ausführliche Beschreibung dieser vielfältigen Schülervorstellungen ist an dieser Stelle platztechnisch nicht möglich. Einige ForscherInnen zu diesem Thema führen als mögliche Gründe für diese sehr verbreiteten alternativen Vorstellungen an, dass neben der Komplexität des Themas (Hansen, 2010) den SchülerInnen ein basales Verständnis über die naturwissenschaftlichen Grundlagenkonzepte des Klimawandels fehlt (Andersson & Wallin, 2000) bzw. sie dieses Wissen nicht auf das Thema Klimawandel übertragen können (Österlind, 2005).

Um dieses Grundlagenverständnis großflächig untersuchen zu können, benötigt es untersuchungsökonomische Methoden wie etwa einen standardisierten Multiple-Choice-Test zu naturwissenschaftlichen Grundlagen des Klimawandels.

Im Folgenden wird beschrieben, wie im Rahmen dieser Studie ein in Australien entwickeltes Testinstrument zu naturwissenschaftlichen Grundlagen des Klimawandels (Jarrett & Takacs, 2019) für den deutschen Sprachraum adaptiert, weiterentwickelt und erweitert wurde. Anschließend werden Ergebnisse einer ersten Pilotierung mit 338 SchülerInnen und 33 Physik-Lehramtsstudierenden aus Österreich dargestellt.

2. Der Climate Change Concept Inventory (CCCI)

Die Grundlage für das Testinstrument wurde von Jarrett, Ferry und Takacs (2012) in Australien entwickelt. Im Rahmen einer Delphi-Studie wurden insgesamt zehn Konzepte als naturwissenschaftliche

Grundlagen für ein Klimawandelverständnis identifiziert (Jarrett, Takacs & Ferry, 2011). Diese sind in Abb.1 dargestellt. In Bezug auf die Identifizierung der Grundlagenkonzepte für ein Klimawandelverständnis muss angemerkt werden, dass die erste Runde der in Australien durchgeführten Delphi-Studie aus lediglich vier TeilnehmerInnen bestand, die zudem nicht alle KlimawissenschaftlerInnen waren. Aus diesem Grund wurde in unserem Projekt zur weiteren Validierung und potenziellen Erweiterung der Konzepte im April 2019 eine Experteninterviewstudie mit ausgewiesenen KlimawissenschaftlerInnen in Österreich und der Schweiz durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Experteninterviews sowie anderer, ähnlicher Auflistungen essenzieller Konzepte (u. a. Climate Literacy Network, 2009; Lambert, Lindgren & Bleicher, 2012; McCaffrey & Buhr, 2008; Shepardson, Niyogi, Roychoudhury & Hirsch, 2012) werden in zukünftigen Überarbeitungszyklen des Testinstruments berücksichtigt.

Nr.	Konzept	Statements zum Konzept
1	Carbon cycle and fossil fuels	There is a fixed amount of carbon on Earth; it is cycled among the atmosphere, biosphere, soils, ocean and rocks. There are both natural and human-induced sources and sinks of greenhouse gases. Fossil fuels contain carbon that was part of living things millions of years ago. The process of burial took this carbon out of the atmosphere-ocean-biosphere cycle. Burning fossil fuels returns this carbon to the cycle.
2	Electromagnetic spectrum	There is Infra Red (IR) and Ultra Violet (UV) radiation beyond the visible spectrum: these are all related forms of electromagnetic energy. The Sun emits mostly visible radiation and the Earth emits mostly IR.
3	Interactions between greenhouse (GH) gases and electromagnetic radiation	Most of the gases that make up the atmosphere are transparent to visible light. Non-greenhouse gases are transparent to IR but greenhouse gases absorb IR: this is the cause of the greenhouse effect. GH gases allow the Sun's visible light in but absorb IR emitted by Earth. This is re-emitted in all directions -down as well as up.
4	Natural climate variability in the past and relationships to CO ₂ levels	The climate has been different in the past (e.g. carboniferous period, ice ages) due to changes in energy emitted by the Sun, the distance between the Earth and Sun or CO ₂ released from volcanoes during periods of high levels of volcanism. Prehistoric climate changes correlate with changes in CO ₂ levels, providing evidence for the link between CO ₂ levels and global temperatures.
5	Difference between weather and climate	Weather is short-term, day-to-day climactic conditions while climate is the longer term average conditions.
6	Proportions of greenhouse and non-greenhouse gases in the atmosphere	Over 96% of the atmosphere consists of non-greenhouse gases. The atmosphere also contains small amounts of CO ₂ , CH ₄ , O ₃ , N ₂ O and H ₂ O and CFCs- all of which are greenhouse gases. Water vapour is a variable component of the atmosphere and is the most abundant greenhouse gas. GH gases are not in a distinct atmospheric layer.
7	Radiative forcing capacity	Some greenhouse gases have more radiative forcing capacity than others, ie: a given amount of a "stronger" greenhouse gas would result in more radiative forcing than the same amount of a "weaker" greenhouse gas.
8	Feedback	changing one parameter can have an effect on another parameter which causes a changes in the original parameter. Feedbacks can be negative (ie: tends to return the parameter to its original value) or positive (ie: tends to drive the parameter further away from its original value) e.g. increasing CO ₂ raises surface temps causing more water to vaporise, which further raises temperatures.
9	Equilibrium of energy	there is a balance of energy into and out of the Earth / atmosphere system. A net flow of energy into or out of the Earth / atmosphere system leads to temperature change over time.
10	Conservation of energy	Energy can change from one form into another but the total amount of all forms of energy remains constant.

Abb.1: Liste der von Jarrett et al. (2011) identifizierten Grundlagenkonzepte für ein Klimawandelverständnis. Die in der Abbildung grau hinterlegten Konzepte werden im Climate Change Concept Inventory adressiert

Für acht dieser zehn Konzepte (in Abb.1 grau hinterlegt) entwickelte Jarrett (2013) im Rahmen ihrer Dissertation insgesamt 30 einstufige Multiple-Choice-Items, welche die Erstversion des „CCCI“ darstellen. Die Distraktoren des Instruments bauen auf typischen Schülervorstellungen zu den jeweiligen Konzepten auf. Das Instrument erlaubt daher auch Rückschlüsse auf vorliegende Vorstellungen der ProbandInnen.

In einem ersten Schritt wurden alle Items vom Erstautor sowie der Drittutorin ins Deutsche übersetzt. Diese individuellen Übersetzungen wurden abgeglichen und zusammengeführt. In einem nächsten Schritt wurden die Items hinsichtlich inhaltlicher und sprachlicher Aspekte nochmals überarbeitet. Durch die Übersetzung war es teilweise notwendig, substantielle Änderungen am Itemstamm als auch bei den Attraktoren sowie Distraktoren vorzunehmen, um eine sprachliche Verständlichkeit zu gewährleisten. In einer anschließenden Rückübersetzung wurde sichergestellt, dass die Items sich nach wie vor auf dasselbe inhaltliche Konzept beziehen. Die so überarbeiteten und weiterentwickelten Items bilden die in dieser Pi-

lotierungsstudie eingesetzte Erstversion eines erweiterten deutschsprachigen Testinstruments zu naturwissenschaftlichen Grundlagen des Klimawandels. In dieser Erstversion ist das entwickelte Testinstrument für SchülerInnen ab der neunten Jahrgangsstufe eingesetzt worden.

3. Forschungsdesign

Die in diesem Artikel beschriebene Pilotstudie wurde in einer paper&pencil Version in zwei Etappen durchgeführt. In einem ersten Schritt wurde die Erstversion des Testinstruments in einer Klasse mit 14 SchülerInnen eingesetzt, um herauszufinden, ob die Items prinzipiell verständlich formuliert sind und um die Gesamttestzeit besser einschätzen zu können. Die ProbandInnen wurden dabei gebeten unverständliche Passagen zu markieren. Nach Einarbeitung der gefundenen Hinweise wurde in einem zweiten Schritt die Haupterhebung dieser Studie bei insgesamt 338 SchülerInnen im Bundesland Steiermark in Österreich durchgeführt. Bei der Auswahl der Stichprobe wurde auf eine möglichst gute Verteilung auf unterschiedliche Schultypen, Jahrgangsstufen (9. bis 13.)

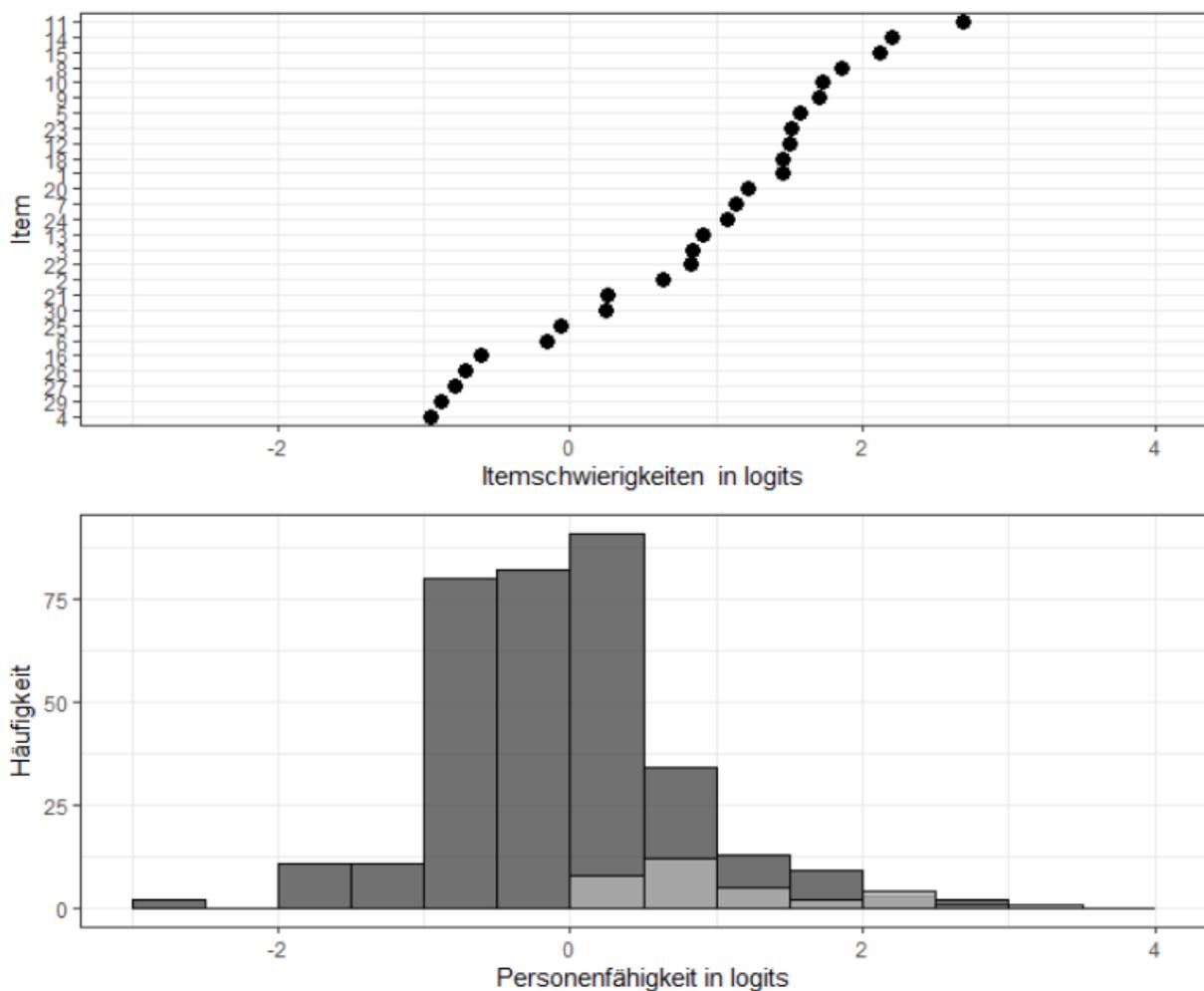


Abb. 2: Item-Person Map des Testinstruments zu den naturwissenschaftlichen Grundlagen des Klimawandels. Im unteren Teil der Abbildung sind in dunkelgrau die Personenfähigkeiten der SchülerInnen, in hellgrau die Personenfähigkeiten der Physik-Lehramtsstudierenden dargestellt

und Schulstandorte (Stadt/Land) geachtet. Um Hinweise für eine Kriteriumsvalidität zu erhalten, wurde das Testinstrument zusätzlich bei 33 Physik-Lehramtsstudierenden im vierten Semester eingesetzt.

Der Fragebogen der Haupterhebung bestand aus demographischen Angaben, dem Testinstrument und aus einer Skala zu persönlichen Einstellungen zum Klimawandel und Besorgtheit über den Klimawandel. Durchschnittlich dauerte die Bearbeitung etwa 25 Minuten.

4. Ergebnisse und Diskussion

Die Daten wurden anschließend digitalisiert und mithilfe des Programms R (R Core Team, 2013) unter Nutzung des Pakets TAM (Robitzsch, Kiefer & Wu, 2019) einer Rasch-Analyse unterzogen, um lineare Werte der Item-Schwierigkeiten zu erhalten.

Für die Analyse mussten drei der insgesamt 30 Items ausgeschlossen werden. Ein Item war missverständlich formuliert, ein Item zeigte einen nicht zufriedenstellenden Outfit-Wert (> 1.2) und ein weiteres Item zeigte eine negative Korrelation mit dem Gesamtscore. Die Personenreliabilität des um drei Items verkürzten Testinstruments wurde mit einer Weighted-Likelihood-Schätzung ermittelt und beträgt einen

Wert von .68 für die Population der SchülerInnen. Unter Verwendung des Pakets sirt (Robitzsch, 2019) wurde außerdem die Eindimensionalität des Testinstruments überprüft und bestätigt (DETECT, ASSI & RATIO < 0 , für weitere Informationen siehe Zhang, 2007).

In Abb. 2 ist die resultierende Person-Item Map der Stichprobe dargestellt. Der untere Teil der Abbildung zeigt die Verteilung der ermittelten Personenfähigkeiten der SchülerInnen in dunkelgrau und der Studierenden in hellgrau, wobei sich fähigere Personen weiter rechts in der Abbildung befinden. Der obere Teil der Abbildung zeigt die Testitems geordnet nach ihrer Schwierigkeit. Einfachere Items befinden sich weiter links und schwierigere rechts.

Aus Abb. 2 ist erkennbar, dass einige Items des Tests zu schwer für die Stichprobe der SchülerInnen sind, für die kleine Population der Physik-Lehramtsstudierenden (in hellgrau dargestellt) scheint das Testinstrument passgenau zu sein.

Die besonders schwierigen Items lassen sich bestimmten Konzepten zuordnen. In einem nächsten Schritt wurden daher die mittleren Itemschwierigkei-

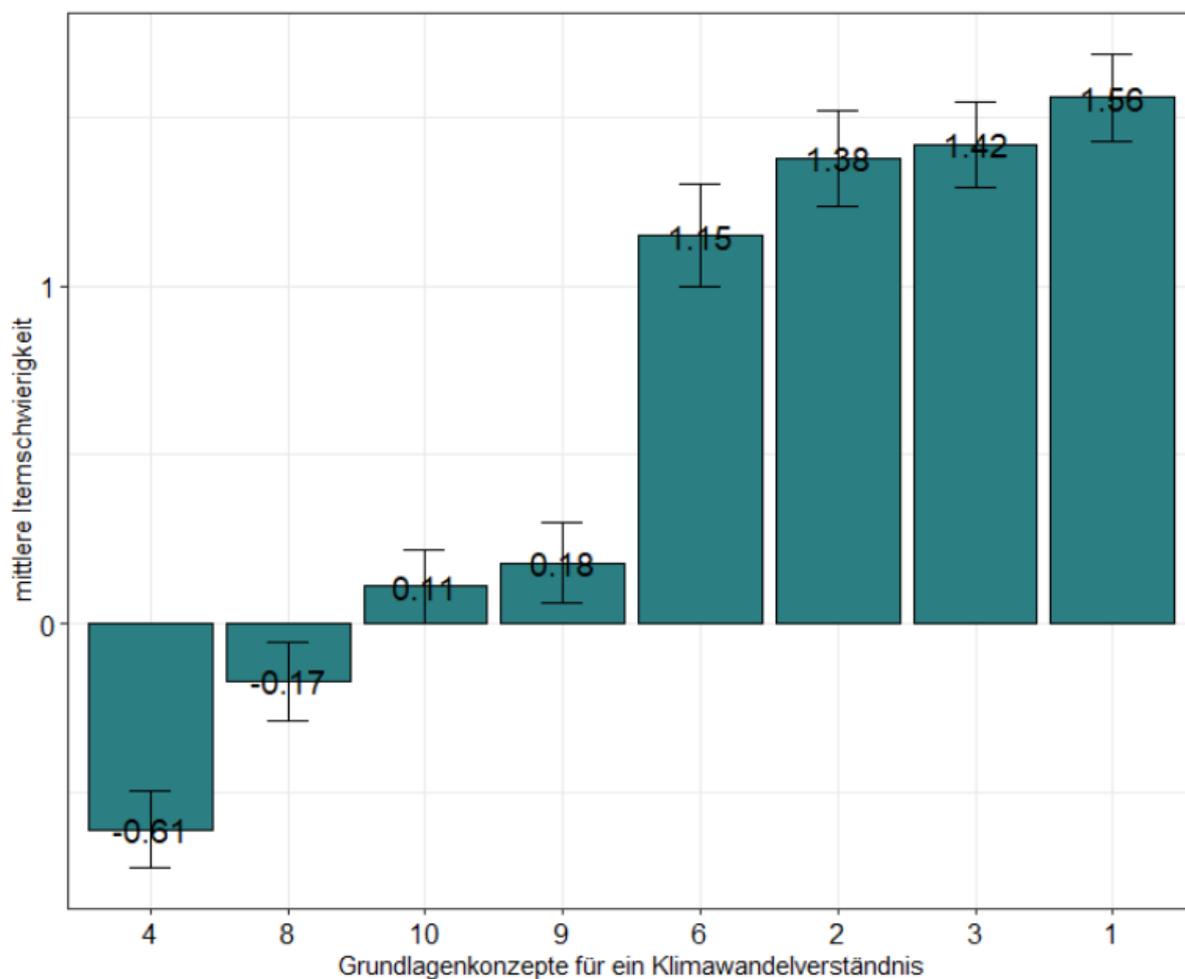


Abb. 3: Mittlere Itemschwierigkeiten der Grundlagenkonzepte. Die Nummerierung der Konzepte entspricht der Nummerierung in Abb.1. Die Fehlerbalken entsprechen einer Kombination aus dem ermittelten Rasch-Fehler und der Standardabweichung der Itemschwierigkeiten zu den jeweiligen Konzepten

ten pro Konzept ermittelt und sind in Abb. 3 dargestellt. Die Fehlerbalken stehen dabei für eine Kombination aus dem Rasch-Fehler sowie der Standardabweichung der Itemschwierigkeiten.

Aus Abb. 3 ist erkennbar, dass insbesondere die Konzepte „Kohlenstoffzyklus und fossile Brennstoffe“, „elektromagnetisches Spektrum“ und „Wechselwirkungen zwischen Treibhausgasen und elektromagnetischer Strahlung“ für SchülerInnen als sehr schwierig einzustufen sind. Dieser Umstand ist vermutlich teilweise darauf zurückzuführen, dass diese Inhalte im österreichischen Lehrplan aktuell einen geringen Platz einnehmen.

Da im Rahmen dieses Artikels die Darstellung der gewählten Antwortoptionen der SchülerInnen bei allen Items nicht möglich ist, werden im nächsten Abschnitt die Ergebnisse zusammenfassend für die drei eben angesprochenen Konzepte berichtet.

4.1. Vorstellungen österreichischer SchülerInnen zum Kohlenstoffkreislauf und fossilen Brennstoffen

In Übereinstimmung mit Ergebnissen bei australischen SchülerInnen (Jarrett & Takacs, 2019) unterschätzen auch österreichische SchülerInnen die Ozeane als Kohlenstoffreservoir. So schätzen nur 20% die Verteilung des Kohlenstoffs auf Hydro-, Bio- und Atmosphäre richtig ein. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass den SchülerInnen die Rolle der Ozeane im Kohlenstoffzyklus unbekannt ist bzw. wie auch Lambert et al. (2012) feststellten, eine grundlegende Vorstellung über den Kohlenstoffzyklus und die Verschiebung von Kohlenstoff zwischen den unterschiedlichen Reservoirs fehlt.

Damit in Verbindung steht auch, dass viele SchülerInnen (69%) der Meinung sind, dass die Gesamtmenge an Kohlenstoff im Klimasystem nicht konstant ist. Außerdem denken viele ProbandInnen (70%), dass die Entstehung von fossilen Brennstoffen den Kohlenstoffgehalt der Atmosphäre erhöht hat. Auch diese Resultate sind in Übereinstimmung mit Ergebnissen der Studie von Jarrett und Takacs (2019). Aufgrund dieser überraschenden Ergebnisse wird in Zukunft mittels Interviews überprüft, ob dieses Item möglicherweise irreführend formuliert ist, um diese Ergebnisse zu bestätigen oder falsifizieren.

4.2. Vorstellungen österreichischer SchülerInnen zu elektromagnetischer Strahlung und Wechselwirkungen mit Treibhausgasen

Die Items zum elektromagnetischen Spektrum weisen unter anderem deshalb eine hohe mittlere Itemschwierigkeit auf, weil SchülerInnen häufig nicht bekannt ist, dass die Erde Strahlung emittiert. Die ProbandInnen zeigen zwar häufig eine angemessene Vorstellung zur Idee des Strahlungsgleichgewichts, können diese jedoch nicht auf das „System Erde-Sonne bzw. All“ übertragen.

SchülerInnen verbinden Treibhausgase außerdem häufig nicht mit der Eigenschaft Infrarotstrahlung absorbieren zu können (15% beantworteten dieses Item korrekt). Ein nicht zu vernachlässigender Anteil der SchülerInnen denkt hingegen, dass alle Treibhausgase UV-Strahlung absorbieren (25%). Als charakteristische Eigenschaft von Treibhausgasen wird vielfach deren Zusammensetzung aus u.a. Kohlenstoff gesehen (59%).

Auch in dieser Studie zeigt sich, dass viele SchülerInnen die Vorstellung haben, dass Treibhausgase die Erde erwärmen, weil sie die Ozonschicht beschädigen (37%). Nur etwa 10% der ProbandInnen können Wasserdampf als das am Häufigsten vorkommende Treibhausgas identifizieren. Vielen SchülerInnen ist jedoch bekannt, dass, obwohl der relative Anteil an Treibhausgasen in der Atmosphäre klein ist, sie dennoch einen signifikanten Einfluss auf das Klimasystem ausüben können.

5. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Artikel wurde ein in Australien entwickeltes Multiple-Choice Testinstrument zu naturwissenschaftlichen Grundlagen des Klimawandels, das Climate Change Concept Inventory (CCCI) vorgestellt. Dieses Testinstrument wurde von den AutorInnen dieses Artikels übersetzt, adaptiert, weiterentwickelt und pilotiert. Die Ergebnisse dieser Pilotierungsstudie mit 338 SchülerInnen der neunten bis zwölften Jahrgangsstufe sowie 33 Physiklehramtsstudierenden zeigen, dass das Testinstrument nach Ausschluss dreier Items zufriedenstellende Testkennwerte und eine Eindimensionalität aufweist. Damit kann also von einem naturwissenschaftlichen Grundlagenwissen für den Klimawandel gesprochen werden. Die Konzepte „Kohlenstoffzyklus und fossile Brennstoffe“, „elektromagnetisches Spektrum“ und „Wechselwirkungen zwischen Treibhausgasen und elektromagnetischer Strahlung“ erweisen sich als besonders schwierige Konzepte mit denen unterschiedliche, weit verbreitete Schülervorstellungen in Verbindung stehen.

Auf Basis dieser Ergebnisse lassen sich einige wichtige Weiterentwicklungsschritte für das Testinstrument ableiten. Die Liste der in Abb.1 dargestellten Konzepte als Grundlage für das Testinstrument sollte auf eine breitere Grundlage gestellt werden. Dies geschieht auf Basis der von den AutorInnen durchgeführten Experteninterviewstudie und in Abgleich mit bestehenden Auflistungen von Konzepten für ein grundlegendes Verständnis des Klimawandels. Die Verteilung der Items auf die acht Konzepte ist aktuell zudem noch ungleich, es werden zukünftig weitere Items entwickelt, um hier eine Ausgewogenheit zu erreichen.

Außerdem zeigt die Analyse der gewählten Distraktoren, dass einige Items weiter hinsichtlich der Verständlichkeit verbessert werden müssen. Einige Distraktoren wurden zum Beispiel nur von sehr wenigen

SchülerInnen gewählt und müssen für den zukünftigen Einsatz weiter überarbeitet werden. Aus diesem Grund werden aktuell Interviewstudien mit SchülerInnen zu ausgewählten Items durchgeführt.

Die Verteilung der Itemschwierigkeiten zeigt, dass das Testinstrument für SchülerInnen der Sekundarstufe II etwas zu schwierig ist. Für den weiteren Einsatz, zum Beispiel zur Evaluierung von Bildungsangeboten, müssen dementsprechend weitere einfache Items entwickelte und hinzugefügt werden. Für die finale Version des Testinstruments soll ein Einsatz ab der achten Jahrgangsstufe möglich sein.

6. Literaturverzeichnis

- Andersson, B. & Wallin, A. (2000). Students' understanding of the greenhouse effect, the societal consequences of reducing CO₂ emissions and the problem of ozone layer depletion. *Journal of Research in Science Teaching*, 37(10), 1096–1111. [https://doi.org/10.1002/1098-2736\(200012\)37:10<1096::AID-TEA4>3.0.CO;2-8](https://doi.org/10.1002/1098-2736(200012)37:10<1096::AID-TEA4>3.0.CO;2-8)
- Bedford, D. (2016). Does climate literacy matter? A case study of US students' level of concern about anthropogenic global warming. *Journal of Geography*, 115(5), 187–197. <https://doi.org/10.1080/00221341.2015.1105851>
- Bord, R. J., O'connor, R. E. & Fisher, A. (2000). In what sense does the public need to understand global climate change? *Public Understanding of Science*, 9(3), 205–218. <https://doi.org/10.1088/0963-6625/9/3/301>
- Chang, C.-H. & Pascua, L. (2016). Singapore students' misconceptions of climate change. *International Research in Geographical and Environmental Education*, 25(1), 84–96. <https://doi.org/10.1080/10382046.2015.1106206>
- Climate Literacy Network. (2009). Climate literacy: The essential principles of climate science. *US Global Change Research Program/Climate Change Science Program*, Washington, DC.
- Hansen, P. J. K. (2010). Knowledge about the Greenhouse Effect and the Effects of the Ozone Layer among Norwegian Pupils Finishing Compulsory Education in 1989, 1993, and 2005—What Now? *International Journal of Science Education*, 32(3), 397–419. <https://doi.org/10.1080/09500690802600787>
- IPCC. (2018). *Global Warming of 1.5°C, an IPCC special report*. Zugriff am 29.04.2020. Verfügbar unter <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- Jarrett, L. (2013). *Investigating secondary school students' understanding of climate change*. Dissertation. Wollongong.
- Jarrett, L., Ferry, B. & Takacs, G. (2012). Development and validation of a concept inventory for introductory-level climate change science. *International Journal of Innovation in Science and Mathematics Education*, 20(2), 25–41.
- Jarrett, L. & Takacs, G. (2019). Secondary students' ideas about scientific concepts underlying climate change. *Environmental Education Research*, 1-21. <https://doi.org/10.1080/13504622.2019.1679092>
- Jarrett, L., Takacs, G. & Ferry, B. (2011). What scientific concepts are required to understand climate change? *Proceedings of The Australian Conference on Science and Mathematics Education (formerly UniServe Science Conference)*, 17. Verfügbar unter https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/06/SR15_Full_Report_High_Res.pdf
- Kattmann, U. (2007). Didaktische Rekonstruktion—eine praktische Theorie. In D. Krüger & H. Vogt (Hrsg.), *Theorien in der biomedizinischen Forschung* (S. 93–104). Springer.
- Lambert, J. L., Lindgren, J. & Bleicher, R. (2012). Assessing Elementary Science Methods Students' Understanding About Global Climate Change. *International Journal of Science Education*, 34(8), 1167–1187. <https://doi.org/10.1080/09500693.2011.633938>
- McCaffrey, M. S. & Buhr, S. M. (2008). Clarifying climate confusion: Addressing systemic holes, cognitive gaps, and misconceptions through climate literacy. *Physical Geography*, 29(6), 512–528. <https://doi.org/10.2747/0272-3646.29.6.512>
- Niebert, K. (2010). *Den Klimawandel verstehen. Eine didaktische Rekonstruktion der globalen Erwärmung* (Beiträge zur didaktischen Rekonstruktion, Bd. 31, 1. Aufl.). Hannover: Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek; Didaktisches Zentrum Carl von Ossietzky Univ. Verfügbar unter <https://edocs.tib.eu/files/e01dh10/639745350.pdf>
- Niebert, K. & Gropengiesser, H. (2013). Understanding and communicating climate change in metaphors. *Environmental Education Research*, 19(3), 282–302. <https://doi.org/10.1080/13504622.2012.690855>
- Österlind, K. (2005). Concept formation in environmental education: 14-year olds' work on the intensified greenhouse effect and the depletion of the ozone layer. *International Journal of Science Education*, 27(8), 891–908. <https://doi.org/10.1080/09500690500038264>
- R Core Team. (2013). R: A language and environment for statistical computing [Computer software]. Wien: R Foundation for Statistical Computing. Verfügbar unter <http://www.R-project.org/>
- Robitzsch, A. (2019). *sirt: Supplementary item response theory models. R package version 3.3-26*. Zugriff am 26.01.2020. Verfügbar unter <https://CRAN.R-project.org/package=sirt>
- Robitzsch, A., Kiefer, T. & Wu, M. (2019). *TAM: Test analysis modules*. Verfügbar unter <https://CRAN.R-project.org/package=TAM>

- Shepardson, D. P., Niyogi, D., Roychoudhury, A. & Hirsch, A. (2012). Conceptualizing climate change in the context of a climate system: implications for climate and environmental education. *Environmental Education Research*, 18(3), 323–352.
<https://doi.org/10.1080/13504622.2011.622839>
- Varela, B., Sesto, V. & García-Rodeja, I. (2018). An Investigation of Secondary Students' Mental Models of Climate Change and the Greenhouse Effect. *Research in Science Education*.
<https://doi.org/10.1007/s11165-018-9703-1>
- Zhang, J. (2007). Conditional Covariance Theory and Detect for Polytomous Items. *Psychometrika*, 72(1), 69–91.
<https://doi.org/10.1007/s11336-004-1257-7>