

Pilotierungsergebnisse eines Klimawandel-Konzepttests

Thomas Schubatzky*, Rainer Wackermann[†], Carina Wöhlke[‡], Claudia Haagen-Schützenhöfer[°],
Hannes Kasimir Lindemann[†], Kai Cardinal[†], Marko Jedamski[†]

*Institut für Fachdidaktik und Institut für Experimentalphysik, Universität Innsbruck,
Technikerstraße 25, 6020 Innsbruck

[†]Didaktik der Physik, Ruhr-Universität Bochum, Universitätsstraße 150, 44801 Bochum

[°]Physikdidaktik, Universität Graz, Universitätsplatz 5, 8010 Graz

thomas.schubatzky@uibk.ac.at

Kurzfassung

Der aktuelle Klimawandel stellt unsere Gesellschaft vor große Herausforderungen. Der Klimawandel ist besonders für junge Menschen, deren Leben künftig von Klimawandelauswirkungen geprägt ist, zentral. Ein grundlegendes Verständnis des Klimawandels kann Personen insbesondere dabei helfen, falsche oder widersprüchliche Darstellungen besser einzuschätzen, um so am gesellschaftlichen Diskurs zum Thema Klimawandel teilhaben zu können. Um Aussagen über das Verständnis von zentralen fachlichen Inhalten zum Klimawandel zuverlässig treffen zu können, braucht es geeignete Testinstrumente. Denn die Erfassung von typischen Schülervorstellungen ist zentral für die Entwicklung von Lernangeboten, etwa im Sinne der didaktischen Rekonstruktion. Für die Entwicklung eines derartigen Klimawandel-Konzepttests (den wir CCCI-422 nennen) wurden zentrale fachliche Inhalte identifiziert, offene Fragen entwickelt und schließlich Distraktoren und Attraktoren aus Interviews abgeleitet. Anschließend wurde der Konzepttest in mehreren Pilotierungs- und Validierungsstudien eingesetzt. In diesem Beitrag wird der entwickelte Test in seinen Grundzügen vorgestellt, Pilotierungsergebnisse diskutiert und ein Ausblick auf die laufende Haupterhebung gegeben.

1. Einleitung

Schülerinnen und Schüler wachsen heutzutage in unsicheren Zeiten auf. Zumal die sozialen, ökologischen, wirtschaftlichen, kulturellen und umweltbezogenen Auswirkungen des globalen Klimawandels beginnen, ihren Alltag und ihr Umfeld immer mehr zu beeinflussen (Kagawa & Selby, 2010; Rousell & Cutter-Mackenzie-Knowles, 2020). Trotz dieser bereits spürbaren Auswirkungen gibt es immer noch eine oberflächliche Kontroverse um den Klimawandel, die zu Verwirrung über die naturwissenschaftlichen Grundlagen des Klimawandels führen kann, da der Klimawandel in den Medien manchmal falsch dargestellt wird (Coan et al., 2021; McCright & Dunlap, 2011). Einige Studien berichten sogar, dass Schülerinnen und Schüler mehr über den Klimawandel durch Medien erfahren als durch formalen Unterricht, was zur Entwicklung von nicht wünschenswerten Schülervorstellungen über den Klimawandel beitragen kann (Nation & Feldman, 2021). Solche weit verbreiteten und nicht mit der naturwissenschaftlichen Sicht vereinbaren Vorstellungen werden als große Hindernisse angesehen, die im naturwissenschaftlichen Unterricht im Allgemeinen und dadurch auch im Unterricht über den Klimawandel überwunden werden müssen (Vosniadou, 2009). Um Lernende zu unterstützen, Schülervorstellungen im naturwissenschaftlichen Unterricht zu überwinden, ist eine gründliche Kenntnis des gegenwärtigen Verständnisses der Schülerinnen und Schüler unerlässlich.

2. Concept Inventories in naturwissenschaftsdi-daktischer Forschung

Concept Inventories oder Konzepttests gelten als hervorragendes Instrument zur zuverlässigen Messung des Verständnisses von Lernenden, um Schülervorstellungen zu ermitteln und sie von fehlendem Wissen zu unterscheiden (Sands et al., 2018). Concept Inventories haben daher auch eine große Tradition in der naturwissenschaftsdi-daktischen Forschung (Ivanjek et al., 2021; Nelson et al., 2007; Schecker & Gerdes, 1999). Obwohl in der Vergangenheit bereits mehrere Testinstrumente zum Thema Klimawandel entwickelt wurden (z.B. Arslan, Cigdemoglu & Moseley, 2012; Jarrett & Takacs, 2020; Keller, 2006), fehlt bis heute ein aktuelles, psychometrisch und inhaltlich valides Konzeptinventar zu naturwissenschaftlichen Grundlagen des Klimawandels, das auch in deutscher Sprache verfügbar ist. Das Ziel dieses Projekts ist es daher, einen aktuellen und validen Klimawandel-Konzepttests (in einem ersten Schritt in deutscher Sprache) zu entwickeln, der aus früheren Studien und bestehender Literatur zum Verständnis der naturwissenschaftlichen Grundlagen des Klimawandels bei Schülerinnen und Schülern abgeleitet ist.

3. Entwicklung des CCCI-422

Ausgangspunkt für die Entwicklung des in diesem Artikel vorgestellten Konzepttests (CCCI-422) war ein existierendes Climate Change Concept Inventory (CCCI), das ursprünglich in Australien entwickelt wurde (Jarrett & Takacs, 2020). Dieser CCCI wurde übersetzt und an

N = 338 Schülerinnen und Schülern der Sekundarstufe II in der Steiermark (Ö) pilotiert (Schubatzky, Pichler & Haagen-Schützenhöfer, 2020). Das Ergebnis dieser Pilotierung war, dass einige Item-Formulierungen verbesserungswürdig waren, zwei Items offensichtlich missverstanden wurden, und das australische CCCI keine

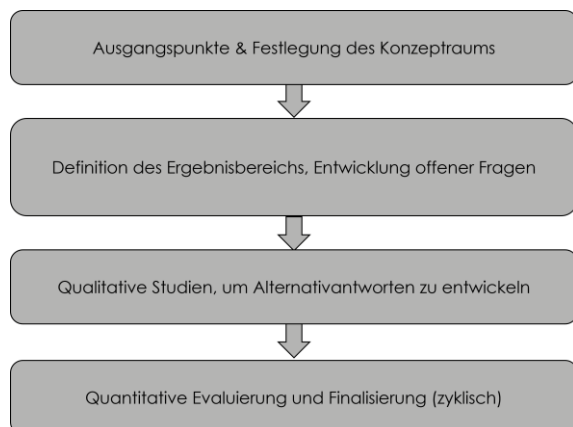


Abb. 1: Vorgehensweise und Ablauf der Testentwicklung

ausgewogene Item-Konzept-Verteilung aufweist. Nach dieser Pilotstudie wurde deshalb entschieden, einen aktualisierten und optimierten Klimawandel-Konzepttest grundlegend neu zu entwickeln. Das Vorgehen orientierte sich dabei an üblichen Entwicklungspfaden von Konzepttests (Nelson et al., 2007) und ist überblicksartig in Abbildung 1 dargestellt.

Im ersten Schritt wurden durch Sichtung bestehender Literatur sowie Experteninterviews (N = 8 Klimawissenschaftlerinnen und Klimawissenschaftler aus Österreich und der Schweiz) fünf zentrale Inhaltsbereiche identifiziert, die im Folgenden kurz umrissen werden.

4. Definition des zu messenden Konstrukts

Der Klimawandel stellt ein interdisziplinäres Thema dar, welches von unterschiedlichen Seiten beleuchtet werden kann. Deshalb ist klar, dass es nie eine einzige „Liste“ an zentralen naturwissenschaftlichen Inhalten oder Ideen geben kann, die für alle Betrachtungsweisen des Klimawandels immer die gleiche Relevanz besitzen. Wenn es um ein basales Grundverständnis unseres Klimasystems und des aktuellen Klimawandels aus naturwissenschaftlicher Sicht geht, kristallisieren sich jedoch einige Konzepte und Inhalte heraus, die als wesentliche Voraussetzungen gesehen werden können. Basierend auf Fachliteratur, bestehenden Rahmenkonzepten und den Experteninterviews sind wir zu dem Schluss gekommen, dass die folgenden Inhaltsbereiche als zentral für ein Verständnis des Klimawandels aus physikalischer bzw. naturwissenschaftlicher Sicht gesehen werden können (Schubatzky et al., 2021). Diese inhaltlichen Beschreibungen haben nicht die Absicht, alle Details aus physikalischer Sicht zu beschreiben, sondern sollen

das zu messende Konstrukt beschreiben, um eine anschließende Operationalisierung zu ermöglichen.

4.1 Die Atmosphäre der Erde

Ein rudimentäres Verständnis von Aufbau, Zusammensetzung und Ausmaß der Atmosphäre der Erde stellt eine zentrale Basis für ein Verständnis des Klimawandels dar. Dazu gehört die Einsicht, dass unsere Atmosphäre eine dünne Gasschicht ist, deren Dichte nach oben hin schnell abnimmt und die gedanklich in unterschiedliche Schichten wie Tropo- oder Stratosphäre unterteilt werden kann. Für ein Verständnis des Klimawandels ist es wichtig, zu verstehen, dass hauptsächlich die Atmosphärenschichten, die der Erdoberfläche sehr nah sind, relevant für das Wetter- und Klimageschehen sind. Diese beinhalten den größten Teil der Luftmenge und die Erwärmung der Atmosphäre geht von Richtung des Erdbodens aus.

Für ein Verständnis des Klimawandels ist es auch zentral, den Anteil an Treibhausgasen in der Atmosphäre einschätzen zu können und deren (relative) Änderungen in der Atmosphärenzusammensetzung durch den Klimawandel benennen zu können.

Items im CCCI-422 beziehen sich daher primär auf den Aufbau und die Zusammensetzung der Atmosphäre mit einem besonderen Augenmerk auf die Rolle von Treibhausgasen in dieser.

4.2 Der Unterschied zwischen Wetter und Klima

Für ein Verständnis des Klimawandels braucht man eine Idee davon, wie der Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort zu einer bestimmten Zeitpunkt beschrieben werden kann. Durch Messung bestimmter Parameter wie der Temperatur lässt sich das Wetter unmittelbar bestimmen, das Klima jedoch nicht. Es braucht also ein Verständnis davon, dass Klima etwas Längerfristiges umfasst, das sich durch statistische Werte wie etwa mittlere Temperatur oder Schwankungen (Streuung, Extremwerte,...) beschreiben lässt. Der Unterschied zwischen Wetter und Klima manifestiert sich neben der zeitlichen Skala aber auch auf der räumlichen Skala. Ein globales Wetter ist keine sinnvolle Zuschreibung, es kann aber von einem globalen Klima gesprochen werden. Dementsprechend ist eine zentrale Einsicht, dass sich das Wetter an einem Ort kaum mehr als sieben Tage voraussagen lässt, während es anhand von Klimamodellen sehr wohl möglich ist, Klimaentwicklungen für Jahrzehnte zuverlässig zu projizieren.

Items im CCCI-422 beziehen sich daher auf den Unterschied der beiden Konzepte Wetter und Klima – sowohl hinsichtlich der zeitlichen als auch der räumlichen Dimension.

4.3 Das Klima als System

Um den Klimawandel aus naturwissenschaftlicher Sicht zu verstehen reicht es nicht, sich auf Betrachtungen der Atmosphäre zu beschränken. Das Klima unserer Erde kann auch als System beschrieben werden, in dem unterschiedliche Bestandteile miteinander wechselwirken. Dabei wird Energie, aber auch

Materie (wie etwa Kohlenstoff) ausgetauscht. Das Klimasystem ändert sich dabei unter dem Einfluss seiner eigenen Dynamik (Feedbackeffekte), durch natürliche externe Einflüsse wie langfristigen Änderungen in der Sonneneinstrahlung (Milanković-Zyklen) oder durch anthropogene Einflüsse wie die Verbrennung fossiler Brennstoffe. Die unterschiedlichen Teile des Klimasystem reagieren außerdem unterschiedlich schnell auf diese Antriebsfaktoren. Das Klimasystem ist insgesamt hochkomplex mit unüberschaubar vielen Systemelementen und hat stochastische Züge.

Items im CCCI-422 beziehen sich auf eine sehr einfache Operationalisierung des „Klima als System“-Gedanken. Die Fragen beziehen sich auf ein basales Verständnis von Rückkopplungseffekten im Klimasystem.

4.4 Der Treibhauseffekt

Der Treibhauseffekt, insbesondere der anthropogene Anteil an diesem, stellt einen zentralen Baustein für ein Verständnis des Klimawandels aus naturwissenschaftlicher Sicht dar. Um den Treibhauseffekt zu verstehen, müssen jedoch unterschiedliche Wissens-elemente verknüpft und angewendet werden. Dazu zählt vor allem Wissen darüber, welche Strahlungsarten in welcher Intensität von der Sonne auf unsere Erde gelangen und wie unterschiedliche Arten von Oberflächen auf der Erde mit dieser Strahlung wechselwirken. Außerdem braucht es Wissen darüber, wie Treibhausgase mit den unterschiedlichen Strahlungsarten wechselwirken und wie es durch die Wechselwirkung von Treibhausgasen mit Infrarotstrahlung zu einer Erhöhung der mittleren Temperatur der Erde kommt. Aus unserer Sicht erscheint es dabei auch zentral, eine Idee davon zu haben, welchen Anteil an der Temperaturerhöhung der von Menschen verursachte Ausstoß von Treibhausgasen in die Atmosphäre hat.

Items im CCCI-422 zum Treibhauseffekt beziehen sich also auf Fragen zur Funktionsweise des Treibhauseffekts. Dazu gehören Fragen zur Wechselwirkung von unterschiedlichen Strahlungsarten mit Oberflächen auf der Erde und Gasen in der Atmosphäre. Außerdem gehören dazu Fragen über die Temperaturerhöhung durch den Treibhauseffekt und den Anteil menschlicher Aktivitäten daran.

4.5 Der Kohlenstoffkreislauf

Um den Klimawandel aus naturwissenschaftlicher Sicht verstehen zu können, braucht es eine Idee davon, wie es zu einer Anreicherung an Treibhausgasen in der Atmosphäre kommen kann. Darauf liefert der Kohlenstoffkreislauf eine Antwort. Es braucht also Wissen darüber, dass Kohlenstoff in unterschiedlichen Teilen des Klimasystems vorkommt und, dass sich dieser zwischen der Atmosphäre, Biosphäre und Hydrosphäre in einem dynamischen Austausch-Gleichgewicht befindet. Zudem braucht es Wissen darüber, dass es eine große Menge an Kohlenstoff gibt, der auf natürliche Weise nicht an diesem

Austausch beteiligt ist, wie etwa in Form fossiler Brennstoffe.

Items im CCCI-422 zum Kohlenstoffkreislauf beziehen sich demnach auf basale Fragen zum Vorkommen von Kohlenstoff auf unserer Erde bzw. in unterschiedlichen Teilen des Klimasystems. Weitere Fragen thematisieren das dynamische Gleichgewicht zwischen Teilen des Klimasystems und Mechanismen des Kohlenstoffaustausches.

5. Entwicklung und Pilotierung der Items

Nach dieser Beschreibung des Konzeptraums bzw. der Definition des zu messenden Konstrukts wird im nächsten Abschnitt die Entwicklung der Items dargestellt.

5.1 Entwicklung offener Items

Der nächste Schritt bestand aus der Entwicklung offener Fragen zu den jeweiligen Inhaltsbereichen. Die Formulierungen der Itemstämme, Attraktoren und Distraktoren wurden anhand von insgesamt 48 Interviews entwickelt. Die ProbandInnen verteilten sich dabei auf Schülerinnen und Schüler der achten bis elften Jahrgangsstufe und Studierende. Die Anzahl der Distraktoren wurde an dieser Stelle noch nicht eingeschränkt, weil a priori nicht davon ausgegangen werden konnte, welche der genannten Distraktoren sich in zukünftigen quantitativen Evaluierungen des Konzepttests als relevant herausstellen werden. Der Zweck der Interviews lag also insbesondere auf der Sicherstellung der kognitiven Validität der Items. Schließlich wurde eine Erstversion des Konzepttests entwickelt, der aus insgesamt 40 Items mit jeweils einem Attraktor und jeweils zwischen drei und sieben Distraktoren bestand.

5.2 Erste quantitative Pilotierungen

Für die Finalisierung des CCCI-422 wurden insgesamt drei quantitative Pilotierungen durchgeführt. Die erste quantitative Pilotierung wurde mit insgesamt $N = 10$ Studierenden des Lehramts Physik sowie $N = 23$ Studierenden eines technischen Studiengangs durchgeführt. Das Ziel dieser ersten Pilotierung des CCCI-422 im geschlossenen Antwortformat war es, die eingesetzten Items sowie den Gesamttest prinzipiell hinsichtlich der Eignung zu prüfen. Dazu wurden einerseits Reliabilitätswerte berechnet (unter Nutzung klassischer Testtheorie durch Cronbach's Alpha sowie mithilfe einer Rasch-Modellierung unter Berechnung der WLE-Personenreliabilität), Punkt-Moment Korrelationen mit dem Gesamtscore sowie Infit- und Outfit-Werte für die einzelnen Items bestimmt, um Hinweise auf potenziell irreführend formulierte Items zu finden. Auf Basis dieser Analyse wurden insgesamt drei Items ausgeschlossen, da sie nach erneuter inhaltlicher Prüfung als missverständlich formuliert betrachtet werden können. Nach Ausschluss dieser drei Items zeigte der Test eine Reliabilität von Cronbachs' $\alpha = .87$ bzw. eine WLE-Personenreliabilität von $.88$.

Die zweite quantitative Pilotierung wurde mit insgesamt $N = 153$ Personen durchgeführt. Unter diesen 151 Personen waren 92 Schülerinnen und Schüler der 8. bis 12. Jahrgangsstufe sowie 61 Erstsemesterstudierende eines technischen Studiengangs. Ziel dieser zweiten Pilotierungsstudie war es, die überarbeitete und gekürzte Version des CCCI-422 hinsichtlich Itemfit sowie Reliabilität zu überprüfen, um zu einer potenziell finalen Version des Testinstruments zu gelangen. Es wurde daher auch eine möglichst breit gestreute Stichprobe angestrebt. Die berechneten Infit- sowie Outfitwerte waren in einem zufriedenstellenden Bereich ($0.75 < \text{Infit/Outfit} < 1.25$). In dieser Pilotierung ergab sich eine WLE-Personenreliabilität von .71.

Die dritte quantitative Pilotierung war als eine Validierungsstudie mit insgesamt 58 Schülerinnen und Schüler aus Deutschland und Österreich sowie 7 aktiven Scientists for Future angelegt. Die Schülerinnen und Schüler teilten sich dabei in zwei Gruppen auf: 18 Schülerinnen und Schüler waren noch nicht zum Thema Klimawandel unterrichtet worden, die restlichen 40 Schülerinnen und Schüler hatten erst kürzlich das Thema Klimawandel im Physikunterricht behandelt. Das Ziel dieser dritten Pilotierung bestand also insbesondere darin, die Kriteriumsvalidität des Testinstruments anhand der Methode der bekannten Gruppen zu untersuchen. Die Hypothese war demnach, dass die Scientists for Future im Mittel einen signifikant höheren Score erreichen als Schülerinnen und Schüler, die bereits zum Thema unterrichtet wurden, welche im Mittel wiederum einen höheren Score erreichen als die Schülerinnen und Schüler, die bisher noch keinen Physikunterricht zum Thema Klimawandel hatten. Diese Hypothese wurde anhand einer ANOVA sowie TukeyHSD-Tests überprüft (ein Levene's Test zeigte Varianzhomogenität, $p = .481$), in

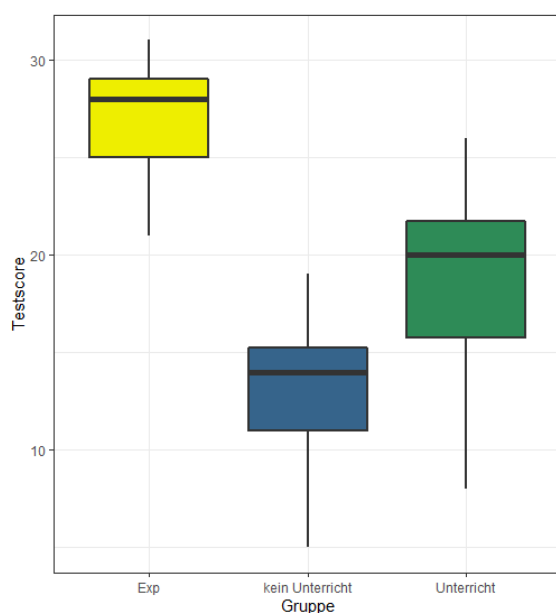


Abb. 2: Boxplot der Score-Verteilung für die drei untersuchten Gruppen.

Abbildung 2 ist ein Boxplot der Scores der jeweiligen Gruppen dargestellt. Die Analyse zeigt, dass sich alle Gruppen signifikant unterscheiden ($F(62,2) = 40.4, p < .001$), was wir als Anzeichen für Kriteriumsvalidität für den CCCI-422 betrachten. Als Limitation muss angeführt werden, dass sich die Stichproben der unterschiedlichen Gruppen hinsichtlich ihrer Gruppengröße unterscheiden.

6. Aufbau des finalen Testinstruments und Beispielitems

Der finale Konzepttest besteht aus insgesamt 36 Items mit jeweils einer korrekten Antwort und drei bis fünf Distraktoren. In Abbildung 3 und Abbildung 4 sind beispielhaft zwei Items dargestellt, eines davon zum Inhaltsbereich Der Kohlenstoffkreislauf, das andere Item zum Inhaltsbereich Der Treibhauseffekt.

Welche Aussage beschreibt den Treibhauseffekt auf der Erde am besten?	
A	Sonnenstrahlung gelangt durch die Atmosphäre und erwärmt den Erdboden. Von der Erde abgegebene Wärmestrahlung wird von den Treibhausgasen in unserer Atmosphäre aufgenommen. Danach wird diese Wärmestrahlung unter anderem wieder in Richtung Erde abgestrahlt. Dadurch erwärmt sich die Erde stärker.
B	Sonnenstrahlung gelangt durch die Atmosphäre und erwärmt den Erdboden. Der Erdboden reflektiert diese Sonnenstrahlung. Diese Strahlung wird von den Treibhausgasen in unserer Atmosphäre wieder zur Erde reflektiert. Dadurch erwärmt sich die Erde stärker.
C	Treibhausgase beschädigen die Ozonschicht in unserer Atmosphäre. Dadurch erzeugen und vergrößern sie das Ozonloch. Durch das Ozonloch kann mehr Sonnenstrahlung den Erdboden erreichen. Dadurch erwärmt sich die Erde stärker.
D	Treibhausgase in unserer Atmosphäre bündeln die eintreffenden Sonnenstrahlen. Durch die gebündelten Sonnenstrahlen erwärmt sich die Erde stärker.
E	Treibhausgase isolieren durch ihre hohe Dichte gut. Treibhausgase steigen zum Rand der Atmosphäre auf und verhindern so einen Wärmeaustausch der Erde mit dem Weltall. Dadurch erwärmt sich die Erde stärker.

Abb. 3: Beispielhaftes Item zum Inhaltsbereich "Der Treibhauseffekt". Die fachlich angemessene Antwort ist fett markiert.

Beim Verbrennen fossiler Brennstoffe gelangt der Kohlenstoff (C) dieser Brennstoffe als Kohlenstoffdioxid (CO ₂) in unsere Atmosphäre. Kann dieser Kohlenstoff (C) aus dem Kohlenstoffdioxid (CO ₂) irgendwann von einer Pflanze aufgenommen werden?	
A	Ja, die Pflanzen können den Kohlenstoff (C) aus Kohlenstoffdioxid (CO₂) durch Photosynthese aufnehmen.
B	Ja, wenn es regnet, gelangt der Kohlenstoff (C) in Form von Kohlenstoffdioxid (CO ₂) in den Boden und wird dort von Pflanzen aufgenommen.
C	Nein, Kohlenstoffdioxid (CO ₂) und die Pflanzen kommen nicht in Kontakt, weil das gasförmige Kohlenstoffdioxid (CO ₂) nach oben steigt.
D	Nein, der Kohlenstoff (C) aus der Verbrennung von fossilen Brennstoffen ist künstlich erzeugt und kann von Pflanzen nicht aufgenommen werden.

Abb. 4: Beispielhaftes Item zum Inhaltsbereich "Der Kohlenstoffkreislauf". Die fachlich angemessene Antwort ist fett markiert.

Die Items wurden von den AutorInnen für die jeweiligen Inhaltsbereiche entwickelt und teilen sich folgendermaßen auf diese auf:

- Die Atmosphäre unserer Erde: sieben Items
- Das Klima als System: acht Items
- Der Kohlenstoffkreislauf: sechs Items
- Klima und Wetter: sieben Items
- Der Treibhauseffekt: acht Items

Eine empirische Überprüfung der Dimensionalität steht an dieser Stelle jedoch noch aus und wird in einer aktuellen Studie überprüft.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Itementwicklung für den CCCI-422 aktuell abgeschlossen ist und sich in bisherigen Pilotierungsstudien einige Validitäts- als auch Reliabilitätsargumente für den CCCI-422 sammeln ließen. Der hier vorgestellte Klimawandel-Konzepttest kann also in zukünftigen Studien, in denen ein konzeptuelles Verständnis naturwissenschaftlicher Grundlagen des Klimawandels eine Rolle spielt, eingesetzt werden.

Aktuell läuft zudem die Hauptstudie dieses Projekts, in dem typische Vorstellungen Jugendlicher, die in Deutschland oder Österreich leben, über naturwissenschaftliche Grundlagen des Klimawandels erhoben werden.

7. Anmerkung

Die aktuelle Version des CCCI-422 kann bei den AutorInnen für den Einsatz in Forschungsprojekten bezogen werden.

8. Literatur

- Arslan, H. O., Cigdemoglu, C. & Moseley, C. (2012). A three-tier diagnostic test to assess pre-service teachers' misconceptions about global warming, greenhouse effect, ozone layer depletion, and acid rain. *International Journal of Science Education*, 34(11), 1667–1686.
- Coan, T. G., Boussalis, C., Cook, J. & Nanko, M. O. (2021). Computer-assisted classification of contrarian claims about climate change. *Scientific Reports*, 11(1), 22320. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01714-4>
- Ivanjek, L., Morris, L., Schubatzky, T., Hopf, M., Burde, J.-P., Haagen-Schützenhöfer, C. et al. (2021). Development of a two-tier instrument on simple electric circuits. *Physical Review Physics Education Research*, 17(2), 2–15. <https://doi.org/10.1103/physrevphyseducres.17.020123>
- Jarrett, L. & Takacs, G. (2020). Secondary students' ideas about scientific concepts underlying climate change. *Environmental Education Research*, 26(3), 400–420.
- Kagawa, F. & Selby, D. (2010). *Education and climate change. Living and learning in interesting times* (Routledge research in education, vol. 30). New York: Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203866399>
- Keller, J. M. (2006). Development of a concept inventory addressing students' beliefs and reasoning difficulties regarding the greenhouse effect. *University of Arizona, AAT*, 3237466.
- McCright, A. M. & Dunlap, R. E. (2011). Cool dudes: The denial of climate change among conservative white males in the United States. *Global Environmental Change*, 21(4), 1163–1172. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.06.003>
- Nation, M. T. & Feldman, A. (2021). Environmental Education in the Secondary Science Classroom: How Teachers' Beliefs Influence Their Instruction of Climate Change. *Journal of Science Teacher Education*, 32(5), 481–499. <https://doi.org/10.1080/1046560X.2020.1854968>
- Nelson, M. A., Geist, M. R., Miller, R.L., Streveler, R.A. & Olds, B. M. (2007). How to create a concept inventory: The thermal and transport concept inventory. *Annual Conference of the American Educational Research Association*.
- Rousell, D. & Cutter-Mackenzie-Knowles, A. (2020). A systematic review of climate change education: giving children and young people a 'voice' and a 'hand' in redressing climate change. *Children's Geographies*, 18(2), 191–208. <https://doi.org/10.1080/14733285.2019.1614532>
- Sands, D., Parker, M., Hedgeland, H., Jordan, S. & Galloway, R. (2018). Using concept inventories to measure understanding. *Higher Education Pedagogies*, 3(1), 173–182. <https://doi.org/10.1080/23752696.2018.1433546>
- Schecker, H. & Gerdes, J. (1999). Messung von Konzeptualisierungsfähigkeit in der Mechanik. Zur Aussagekraft des Force Concept Inventory. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 5(1), 75–89.
- Schubatzky, T., Pichler, A. & Haagen-Schützenhöfer, C. (2020). Weiter-Entwicklung eines Klimawandel-Testinstruments. *PhyDid B-Didaktik der Physik-Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*, 211–217.
- Schubatzky, T., Wackermann, R., Wöhlke, C. & Haagen-Schützenhöfer, C. (2021). Das Thema Klimawandel im Physikunterricht. *Plus Lucis*, 2021(3), 4–8.
- Vosniadou, S. (Hrsg.). (2009). *International Handbook of Research on Conceptual Change* (0. Aufl.): Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203874813>