

Den Klimawandel spielerisch entdecken und erkunden



Planspiel und mathematische Spieltheorie – Teil I

HANS-OTTO CARMESIN – VERENA LYDIA RUMPEL

Der anthropogene Klimawandel erfordert weltweite Einsicht und Kooperation. Dazu ist Bildung wichtig. Hierzu präsentieren wir ein Klimaspiele. Die Spieler entdecken den Klimawandel und entwickeln sowie erproben Lösungen. Das geht ohne besondere Lernvoraussetzungen in verschiedenen Klassen, Fächern und Jugendgruppen. Binnendifferenzierend wird das im Spiel Erlebte modelliert und berechnet: Entdeckt werden fürs Klima ein Fließgleichgewicht und für die Kooperation ein Nash-Gleichgewicht.

Dieser Aufsatz ist JOHN NASH gewidmet, mit dessen Konzepten auch Schülerinnen und Schüler wichtige Einsichten gewinnen können.

1 Einleitung

Wir ändern unser Klima durch die Energiegewinnung mit fossilen Brennstoffen (RAJENDRA et al., 2014; HAWKINS & SUTTON, 2009). Dazu brauchen wir eine globale Lösung. Hierzu muss das Bewusstsein der Bürger entwickelt werden. Daher ist das Bildungssystem ein Teil der Lösung. Hierfür präsentieren wir ein Planspiel, das physikalische Gesetze nachbildet. Dabei entdecken die Lernenden ein Dilemma: Ein Spieler handelt entweder wettbewerbskonform und nicht klimakonform oder umgekehrt nicht wettbewerbskonform, aber klimakonform. Zudem entwickeln und erproben die Lernenden das Aushandeln von Mittelwegen als mögliche Lösung des Dilemmas. So wurden im Unterricht und in Jugendgruppen in nur zwei Stunden wichtige Erkenntnisse und Lösungskompetenzen gewonnen und begründet. Vertiefend können die Lernenden anhand der Spielregel in weiteren zwei Stunden ein Fließgleichgewicht des Klimas berechnen (BOYSEN, HEISE, LICHTENBERGER, SCHEPERS & SCHLICHTING, 2000; CARMESIN, 2001).

Darauf aufbauend können sie in zusätzlichen zwei Stunden individuell optimale Mittelwege im Rahmen der mathematischen Spieltheorie und des Nash-Gleichgewichts berechnen (NASH, 1950, 1951; HUPE, 1994; CARMESIN, 2004). Diese doppelte Vertiefung umfasst beide Aspekte des Dilemmas.

Die ausgehandelten oder berechneten Mittelwege können die Lage deeskalieren, jedoch nicht nachhaltig positiv verändern. Letzteres erkunden die Lernenden in einer Erweiterung des Spiels: Hierbei wird die technische Weiterentwicklung ökologischer Kraftwerke (KOST et al., 2013; CARMESIN, MARTENS & RÖSLER, 2012) spielerisch erkundet und optional mit Nash-Gleichgewichten analysiert. Das wird in Teil II des Aufsatzes ausgeführt.

Zu diesem Aufsatz gehört auch ein Online-Dokument. In diesem gibt es Ausführungen zum fachlichen Hintergrund, zur didak-

tischen Reduktion sowie zum resultierenden Systemverhalten, zum Spiel als Methode, sowie zu Tabellenkalkulationen zur Systemanalyse. Mit diesem Spiel sollen die Lernenden folgende Kompetenzen erreichen:

- 1) Erklären und Begründen des Treibhauseffekts
- 2) Erklären und Begründen des globalen ökologisch-ökonomischen Dilemmas zum Treibhauseffekt
- 3) Begründete Auswahl von selbst überprüften Kooperationsmöglichkeiten
- 4) Erklären und Begründen eines Fließgleichgewichts zum Treibhauseffekt
- 5) Erklären und Begründen eines Nash-Gleichgewichts zum Treibhauseffekt
- 6) Erklären und Begründen von Lösungsmöglichkeiten im Rahmen von Nash-Gleichgewichten sowie Überprüfen berechneter Spielstrategien im Spiel

Während die Lernenden diese sechs Kompetenzen direkt beim Spiel und den Analysen erzielen, werden abhängig von der Lerngruppe, den Lernvoraussetzungen und Lernzielen zudem indirekt folgende Kompetenzen entwickelt: Analyse von Strahlungsgleichgewichten im Physikunterricht, Bestimmen von Ableitungen und Lösen von Extremwertaufgaben im Mathematikunterricht.

Die Spielregeln sind in Kasten 1 dargestellt. Das Spielmaterial besteht aus dem Spielplan (Abb. 1), 25 schwarzen Spielsteinen als Kohlekraftwerke, 50 weißen Spielsteinen als Ökokraftwerke, 25 roten Spielsteinen als Energiesteine, 50 500-Euro-Scheinen und vielen Würfeln, mit denen simultan gewürfelt wird um Zeit zu sparen.

2 Ablauf

In den ersten 45 min wird die Spielregel eingeführt und das Spiel in Tischgruppen gespielt. In jeder Tischgruppe kommt es beim Spiel zu drei Phasen:

- Zunächst baut jeder Kohlekraftwerke.

Klimaspiel für zwei bis acht Spieler

Start

Die Erde ist leer und jeder Spieler hat 1000 €.

Abkürzungen

E: Anzahl der Energiesteine am Erdboden

A: Anzahl der Energiesteine in der Atmosphäre

K: Anzahl aller Kohlekraftwerke

Ablauf einer Runde

- Sonnenstrahlung: 5 Energiesteine kommen auf den Erdboden.
- Wärmestrahlung vom Erdboden: $E^4/2000$ (bitte abrunden, wenn es nicht aufgeht) Energiesteine werden vom Erdboden in die Atmosphäre gestrahlt, solange der Vorrat reicht.
- Treibhauseffekt: Kohlekraftwerke erzeugen Treibhausgase, die jeden Energiestein aus der Atmosphäre zum Erdboden zurückstrahlen können. Würfele *K* mal *A* mal und setze bei jeder 6 einen Energiestein aus der Atmosphäre zum Erdboden.
- Wärmestrahlung ins All: Die übrigen Energiesteine in der Atmosphäre gehen ins Weltall.
- Auszahlung: Jedes Kraftwerk liefert 500 €.
- Bau: Jeder kann für folgende Preise Kraftwerke bauen:
- Ein Kohlekraftwerk kostet 1000 €, ein Ökokraftwerk 2000 €.
- Abschaltung: Jeder Spieler kann freiwillig eigene Kohlekraftwerke ein- oder abschalten.

Spielende

- Überhitzung: Sobald 15 Energiesteine am Ende einer Runde auf der Erde sind, endet das Spiel sofort wegen Überhitzung, alle haben dann verloren.
- Sieg: Sonst endet das Spiel nach 20 Runden und es gewinnt der Spieler mit dem meisten Bargeld.

Kasten 1. Spielregel. Kohlekraftwerke stehen exemplarisch für fossile Energie.

- Anschließend bemerken alle die zunehmende sowie gefährliche Ansammlung von Energie auf der Erde. Die Spieler erkennen, dass nur gemeinsames Handeln helfen kann, und verhandeln.
- Die Spieler kooperieren. Falls das früh und effizient genug geschieht, dann wird die Erde gerettet. Anderenfalls überhitzt die Erde und alle verlieren.

In weiteren 45 min sammeln die Spieler ihre Erkenntnisse an Pinnwänden. Eine Diskussion im Plenum und eine Sicherung



Abb. 1. Klimaspiel: Spielplan

runden den Lernprozess der spielerischen Entdeckungen ab. Am Spiel als Lernmaterial entdecken die Lernenden das Systemverhalten und das Dilemma.

3 Modellierung

Mit einigen Lerngruppen wurde das Spiel modelliert. Dabei wurde die Anzahl zurückgestrahlter Energiesteine mit *r* abgekürzt, die Runde mit *m* und die Zahl der Energiesteine, die in Runde *m* auf der Erde sind, mit E_m . Diese Anzahl ergibt sich im Spielverlauf. Zudem werden Mittelwerte für E_m berechnet:

3.1 Analyse des Fließgleichgewichts

Die Anzahl E_{m+1} der Energiesteine auf der Erde beträgt im Mittel:

$$E_{m+1} = E_m + 5 - A + r$$

Im Fließgleichgewicht ist $E_{m+1} = E_m$ und:

$$5 = A - r$$

Die mittlere Rückstrahlung *r* wird wie folgt bestimmt: Die *K* Kraftwerke setzen *K* Treibhausgase frei. Die *A* Energiesteine treffen auf dem Weg Richtung All auf *K* Treibhausgase, wobei sie jeweils mit der Wahrscheinlichkeit 1/6 zurückgeworfen

werden. Daher beträgt im Mittel die Anzahl zurückgeworfener Energiesteine:

$$r = K \cdot A/6 \text{ oder } A = 6 \cdot r/K \quad | \text{ Einsetzen und Auflösen}$$

$$r = 5K/(6 - K) \tag{1}$$

Die mittlere Rückstrahlung r divergiert im Fließgleichgewicht, wenn die Gesamtzahl der Kohlekraftwerke gegen 6 geht (s. Tab. 1). Aber so weit darf es nicht kommen, denn schon bei einer Rückstrahlung von 15 haben alle wegen Überhitzung verloren. Die Tabelle 1 zeigt, dass im Mittel maximal vier Kohlekraftwerke sicher betrieben werden können. Derartige Fließgleichgewichte werden im Physikunterricht in Unterrichtseinheiten zur Strahlungsphysik bestimmt (BOYSEN, HEISE, LICHTENBERGER, SCHEPERS & SCHLICHTING 2000; CARMESIN, 2001).

3.2 Analyse mithilfe der Spieltheorie

Die Spieler versuchen ihre Profite zu maximieren. Die dazu optimalen Strategien kann man als Nash-Gleichgewichte ermitteln. Das wurde bei einem anderen Kontext im Mathematikunterricht bei Unterrichtseinheiten zur Ableitung und zu Extremwertaufgaben sowie in Projekttagen erfolgreich erprobt (CARMESIN, 2004; CARMESIN, 2012). Um einfaches Zahlenmaterial zu erhalten, legen wir als Geldeinheit 1000 € fest.

Zunächst ermitteln wir einen Term für den Profit p_i des i -ten Spielers. Er hat einen Geldbetrag g_i . Diesen investiert er vollständig, um seinen Profit zu maximieren. Einen Anteil k_i investiert er in Kohlekraftwerke und erhält k_i Stück. Denn ein Stück kostet 1000 € oder 1. Den Rest $g_i - k_i$ investiert er in Ökokraftwerke und erhält $e_i = \text{Ganzzahl}[\frac{1}{2} \cdot (g_i - k_i)]$ Stück. Denn ein Stück kostet 2000 € oder 2 (Ganzzahl[x] bezeichnet hier die Funktion, die x auf die nächstkleinere ganze Zahl abrundet). Die Einnahmen betragen $\frac{1}{2}$ je Kraftwerk. Wenn alle Kraftwerke laufen, dann hat der i -te Spieler in einer Runde folgende Einnahmen:

$$p_i = \frac{1}{2} \cdot k_i + \frac{1}{2} \cdot e_i$$

$$\text{mit: } e_i = \text{Ganzzahl}[\frac{1}{2} \cdot (g_i - k_i)] \tag{2}$$

Jeder Spieler hat in der Bauphase seines Zuges nur eine Entscheidung zu treffen, er muss die Anzahl seiner Kohlekraftwerke k_i festlegen. Diese Anzahl ist seine Strategie. Bei n Spielern gibt es also n Strategien k_1, k_2, \dots, k_n . Für diese n Strategien gibt es nun einen besonders stabilen und relativ optimalen Zustand: Wenn diese n Strategien so festgelegt sind, dass kein Spieler durch Änderung seiner eigenen Strategie seinen Profit steigern kann, dann spricht man von einem Nash-Gleichgewicht.

K	0	1	2	3	4	5	6
r	0	1	2,5	5	10	25	∞

Tab. 1. Die mittlere Rückstrahlung r (s. Gl. 1) ist abhängig von der Gesamtzahl K der Kohlekraftwerke dargestellt. Auffällig ist, dass die mittlere Rückstrahlung r für $K = 5$ und 6 den zulässigen Wert von 15 deutlich übersteigt.

Jeder Spieler möchte seinen Profit optimieren. Dazu möchte er die Zahl der Kohlekraftwerke maximieren (s. Gl. (2)). Das geht aber nur begrenzt, weil im Mittel insgesamt nur maximal vier Kohlekraftwerke sicher mit einer Rückstrahlung unter 15 betrieben werden können (Tab. 1). Daher muss jeder Spieler seine Entscheidung über seine Zahl an gebauten Kohlekraftwerken von den Entscheidungen der anderen Spieler abhängig machen. Wenn die Gesamtzahl K der Kohlekraftwerke vier übersteigt, dann kann ein Kohlekraftwerk nicht jede Runde laufen. Bei $K = 5$ sollte ein Kohlekraftwerk im Mittel in $4/5$ der Runden laufen und bringt daher im Mittel je Runde einen Ertrag von $0,5 \cdot 4/5 = 0,4$. Entsprechend bringt bei $K = 6$ ein Kohlekraftwerk im Mittel je Runde einen Ertrag von $0,5 \cdot 4/6 = \frac{1}{3}$. Diese mittleren Profite werden wie folgt mit Formeln dargestellt:

$$p_i = \frac{1}{2} \cdot \text{Ganzzahl}[\frac{1}{2} \cdot (g_i - k_i)] + k_i \cdot 2/\max(K, 4) = \frac{1}{2} \cdot e_i +$$

$$\begin{cases} \frac{1}{2} \cdot k_i & \text{für } K \leq 4 \\ 0,4 \cdot k_i & \text{für } K = 5 \\ \frac{1}{3} \cdot k_i & \text{für } K = 6 \end{cases} \tag{3}$$

(Bei $K = 4,5$ ist $r = 15$. Daher könnte man im Mittel Kohlekraftwerke etwas seltener abschalten und für den mittleren Profit $p_i = \frac{1}{2} \text{Ganzzahl}[\frac{1}{2} \cdot (g_i - k_i)] + k_i \cdot 2/\max(K, 4,5)$ ansetzen. Jedoch gehen die Lernenden im Spiel nicht ganz an diese Grenze, weil dann Pech beim Würfeln schnell die Erde überhitzen würde. Daher stellt Gl. (3) eine passende Vereinfachung dar. Auf jeden Fall müssen die Spieler neben der langfristig wirkenden Bauentscheidung gelegentlich Entscheidungen, ein Kohlekraftwerk für eine Runde abzuschalten).

3.3 Fallbeispiel

Wir betrachten zwei Spieler, Anna und Bert. Jeder hat gerade einen Geldbetrag von $g = 5$. Die Entscheidung wird im Rahmen des Nash-Gleichgewichts gefunden. Dazu werden die Strategien k_1 von Anna sowie k_2 von Bert und deren Gewinne p_1 sowie p_2 (s. Gl. 3) in einer Tabelle (Tab. 2) dargestellt.

Anhand dieser Tabelle können die Lernenden einiges entdecken: Es gibt nur drei Felder, bei denen keiner seinen Gewinn steigern kann, indem er seine Strategie ändert. Diese Felder stellen Nash-Gleichgewichte dar. Obwohl bei $(k_1|k_2) = (1|1)$ jeder Spieler ebenso wie beim Nash-Gleichgewicht $(k_1|k_2) = (3|3)$ einen Gewinn von 1,5 erzielt, ist der erstgenannte Zustand kein Nash-Gleichgewicht. Denn beispielsweise kann der erste Spieler seinen Gewinn von 1,5 auf 2 steigern, indem er zwei Kohlekraftwerke baut. Die Nash-Gleichgewichte $(k_1|k_2) = (1|3)$ und $(k_1|k_2) = (3|1)$ führen zu unterschiedlichen Gewinnen und erschweren daher die nötige Kooperation. Die Spieler können sich daher auf das symmetrische Nash-Gleichgewicht $(k_1|k_2) = (3|3)$ und dann auch auf den ebenso profitablen und zugleich schonenderen Zustand $(k_1|k_2) = (1|1)$ einigen oder auf eine Maximierung der Gewinnsumme bei $(k_1|k_2) = (3|1)$ oder bei

k_1	k_2	0	1	2	3	4	5
0	1	1	1,5	1,5	2	2	2
1	1,5	1	1,5	1,5	2	1,6	1,67
2	1,5	1	1,5	1,5	1,7	1,33	1,43
3	2	1	1,5	1,3	1,5	1,14	1,25
4	2	1	1,4	1,17	1,36	1	1,11
5	2	1	1,33	1,07	1,25	0,89	1

Tab. 2. Die mittleren relativen Profite p_1 und p_2 nach Gl. (3) sind abhängig von den Strategien k_1 und k_2 dargestellt: Innerhalb einer Zeile ist die Strategie k_1 fest, innerhalb einer Spalte ist k_2 fest. In einem Feld ist p_1 links unten und p_2 rechts oben dargestellt. Die drei grau markierten Felder stellen Nash-Gleichgewichte dar. Die Tabelle wird praktisch mit einer Tabellenkalkulation gemäß Gl. (3) erstellt (siehe Online-Beilage).

(1|3). Spieler können so Nash-Gleichgewichte zur bewussten Deeskalation nutzen. Solche Nash-Gleichgewichte funktionieren im Mittel und unter der Bedingung, dass jedes Kraftwerk im Mittel oft genug und gleich oft abgeschaltet wird.

4 Erfahrungen mit dem Klimaspiele

Das Klimaspiele wurde innerhalb des Physikunterrichts in den Jahrgängen 7, 8 und 10, im Erdkundeunterricht der 10. Klasse, in einer Astronomie-AG, in einer Jugend forscht-AG, im Seminarfach, während einer Jugendfreizeit der BUNDjugend und im Konfirmandenunterricht eingesetzt.

Bei allen Lerngruppen wurden die Ziele 1 bis 3 in maximal 90 min erreicht. Etwa 50 % der Spielgruppen gelang es die Erde zu retten. Hierbei ist besonders hervorzuheben, dass die Lernenden der beiden letztgenannten Gruppen keine wesentlichen Vorkenntnisse in Physik hatten und dass unter den Konfirmanden auch Lernende mit Förderbedarf im Bereich Lernen waren.

Im Physikunterricht in Klasse 8 nahm die Lerngruppe an einer Umfrage teil (RUMPEL; 2016). Dabei wurden das Spiel, das Lernmaterial und die Fachinhalte gut bewertet. Die Lernenden erkannten zudem, dass es gerade für Länder der Dritten Welt schwierig ist, ohne Hilfe der Industrieländer auf nachhaltige Energiequellen umzustellen.

Im Physikunterricht am Ende der Unterrichtseinheit »Thermodynamik« in Klassenstufe 10 wurde das Spiel ebenfalls eingesetzt. Es lieferte ähnliche Ergebnisse wie in der 8. Klasse, jedoch waren die Beiträge der Lernenden qualitativ hochwertiger. So konnten die Lernenden in der Rechenformel im Spiel das Stefan-Boltzmann-Gesetz erkennen.

Im Erdkundeunterricht des Jahrgangs 10 sind die globalen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts ein Kernthema. In dieser

Unterrichtseinheit werden neben den Formen des Ressourcenmanagements, den globalen Verflechtungen im Spannungsfeld von Ökonomie und Ökologie sowie den Ursachen und Auswirkungen von Mobilität und Migration auch das Thema »Natürlicher und anthropogener Klimawandel« behandelt. Den Lernenden sind also neben der Problematik Klimawandel auch die verheerenden Folgen für die Welt bewusst. Angeregt durch das Klimaspiele haben die Lernenden mithilfe ihres Vorwissens aus diesem Kernthema die Problematik beim globalen Handeln ausführlich diskutiert.

Im Laufe der Unterrichtseinheit Mechanik in Klasse 7 lernen die Schülerinnen und Schüler neben Bewegungen auch die Begriffe Arbeit, Leistung und mechanische Energie kennen. Obwohl kaum Vorwissen zum Thema Klima und Energie vorliegt, ist den meisten Lernenden der Begriff Klimawandel aus dem Alltag bekannt. Bei der Durchführung des Spiels traten zunächst kleinere Verständnisprobleme auf, die aber mit Hilfekarten, die den Ablauf der ersten beiden Runden erläutern, geklärt werden konnten. Den Lernenden machte das Klimaspiele sehr viel Spaß und nebenbei lernten sie nach ihren eigenen Einschätzungen auch noch etwas. Die Gruppen nannten, dass sie nun die Klimaproblematik verstehen und vor allem die genauen Zusammenhänge, durch die das Dilemma verursacht wird. Den Lernenden wurde bewusst, dass diese Problematik ein Problem aller Menschen ist und es eine globale Aufgabe ist das Problem gemeinsam zu lösen.

Der Einsatz in einer Astronomie-AG der Klassenstufen 5 bis 12 zeigte, dass das Spiel auch für altersmäßig sehr heterogene Lerngruppen gut geeignet ist. Die Lernenden konnten das Dilemma erkennen sowie zielführende Mittelwege aushandeln und erproben. Der Unterrichtsversuch dauerte insgesamt 45 min und war somit sehr zeiteffizient.

Zudem wurde in der Astronomie-AG das Spiel an eineinhalb Nachmittagen ausgiebig erprobt und analysiert. Dabei wur-

den binnendifferenzierend weitere Spielrunden durchgeführt und Nash-Gleichgewichte wie in Abschnitt 3 errechnet. Einige Lernende erfreuten sich daran, dass sie nun Gewinnstrategien berechnen können. Die Lernenden erkannten dabei auch, dass die Berechnung des Nash-Gleichgewichts das Dilemma nicht völlig löst, weil es immer Spieler gibt, die nicht fair kooperieren. In einer erweiterten Variante wurde das Dilemma gelöst. Dazu wurde im Spiel eine technische Weiterentwicklung der Ökokraftwerke ermöglicht. Hierbei wurde die Lösung sowohl spielerisch entdeckt als auch mit dem Nash-Gleichgewicht analysiert. Die berechneten Strategien wurden im Spiel erprobt und als passend bestätigt. Das wird in Teil II des Aufsatzes ausführlich dargestellt. So wurden auch die Ziele 4 bis 6 erreicht.

Bei der BUNDjugend-Freizeit (Altersklassen 11–14 Jahre) war das Interesse an unserer Umwelt enorm ausgeprägt. Jugendliche nahmen freiwillig teil. Dies konnte bei der Durchführung des Klimaspiels beobachtet werden. Das Interesse und die Motivation lagen noch einmal deutlich über dem der Klassen und auch die Ausdauer, sich mit dem Klimaschutz zu beschäftigen war größer. Natürlich lag hier auch keine zeitliche Begrenzung durch die Dauer einer Schuldoppelstunde vor. Besonders fiel auf, dass den Jugendlichen sehr daran lag die Problematik nicht nur zu begreifen, sondern sich mit ihr auch intensiv zu beschäftigen. Es war ihnen ein großes Anliegen, Lösungsmöglichkeiten zu entwickeln und auch über die Schwierigkeiten beim Lösen der Problematik zu diskutieren. Die Jugendlichen kooperierten und haben die Notwendigkeit für Kooperation auch viel schneller begriffen als ihre gleichaltrigen Jugendlichen der 7. Schulklasse. Obwohl die Jugendlichen zum Teil jünger waren als die der Schulklassen, in denen das Klimaschutzspiel durchgeführt wurde, konnte die Problematik verstanden und globales Denken entwickelt werden. Das Klimaschutzspiel kann also bei Lernenden ohne fachliche Hintergründe eingesetzt werden.

Im Konfirmandenunterricht wurde das Klimaschutzspiel seit einigen Jahren durchgespielt. Es wurden Tischgruppen gebildet, die Spielregel wurde erklärt und die Gruppen wurden durch bereits konfirmierte Jugendliche, die Konfirmandengruppen betreuen beim Spiel unterstützt. Bei etwa der Hälfte der Tischgruppen konnten die Spieler die Welt retten. Ökologisch erfolgreiche Tischgruppen waren teils auch ökonomisch erfolgreich, da sie viele Runden lang mit den Ökokraftwerken Einnahmen erzielten, wogegen andere Tischgruppen bereits früh untergegangen waren. Im Plenum wurden die Erfahrungen ergiebig diskutiert, naturwissenschaftliche Zusammenhänge erklärt, das Dilemma und die Lösungsmöglichkeiten erkannt sowie Konsequenzen für das zukünftige Handeln entwickelt.

5 Zusammenfassung

Da es nur eine Atmosphäre gibt, sollten zum Thema anthropogener Klimawandel fundierte Kompetenzen entwickelt werden. Hierzu kann das Klimaschutzspiel wirksam eingesetzt werden. Mit diesem Planspiel können Jugendliche auch ohne besondere physikalische Kompetenzen beim Spiel den Treibhauseffekt entdecken, ein Dilemma zwischen wettbewerbs- und klima-

konformem Handeln erkennen sowie Mittelwege entwickeln und überprüfen. Das gelingt in 90 min. Vertiefend können die Lernenden das Spiel analysieren und dabei ein Fließgleichgewicht zum Klima herleiten sowie die Mittelwege im Rahmen von Nash-Gleichgewichten der mathematischen Spieltheorie bestimmen. Das gelingt in 180 min.

Während die ausgehandelten oder berechneten Mittelwege die Lage deeskalieren, ermöglichen Weiterentwicklungen ökologischer Kraftwerke nachhaltige Lösungen des Dilemmas. Das erkunden die Lernenden spielerisch in weiteren drei Stunden und rechnerisch in zusätzlichen vier Stunden. Diese wichtige Erweiterung wird in Teil II des Aufsatzes ausgeführt.

Unser präsentiertes Lernmaterial und unsere vorgeschlagenen Unterrichtseinheiten sind direkt sowohl im Unterricht als auch in Jugendgruppen einsetzbar. Insgesamt hat der Einsatz des Klimaspiels gezeigt, dass dieses Spiel nicht nur Motivation und Begeisterung bei den jungen Menschen auslöst, sondern auch Lernen durch aktives Entdecken und Erproben fördert. Im Klimaschutzspiel können die jungen Menschen agieren und Einfluss auf die dargestellte Situation nehmen. Dabei werden sie direkt mit den Konsequenzen ihres Handelns konfrontiert. Weitere Spielvarianten wurden mit Lernenden spielerisch und rechnerisch behandelt. Dabei waren verschiedene Spieler vom Klimawandel unterschiedlich betroffen oder es wurden Abgaben beim Betrieb von Kohlekraftwerken erhoben. Berichte dazu senden wir auf Anfrage gerne zu.

Literatur

BOYSEN, G., HEISE, H., LICHTENBERGER, J., SCHEPERS, H. & SCHLICHTING, H.-J. (2000). *Physik – Oberstufe, Ausgabe A, Band 1*. Berlin: Cornelsen, S. 152 und S. 166.

CARMESIN, H.-O. (2001). Einführung des Treibhauseffekts durch einen anschaulichen Prozess. In V. NORDMEIER (Hrsg.), *Beiträge zur Frühjahrstagung der DPG Bremen 2001: CD der Frühjahrstagung des Fachverbandes Didaktik der Physik in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft* (S. 1–3). Berlin: Lehmanns Verlag.

CARMESIN, H.-O. (2004). Das Nash-Gleichgewicht – Extremwertprobleme und Funktionenscharen im 11. Jahrgang. *MNU*, 57(7), 410–413.

CARMESIN, H.-O. (2012). Anni und Max erleben Nash-Gleichgewichte – Arbeitsblatt Spieltheorie (ab Klasse 7). *MINT Zirkel*. Juni/Juli 2012, Klett Verlag, S. 10.

CARMESIN, H.-O., MARTENS, K. & RÖSLER, K. (2012). Fotovoltaik im Unterricht: Dreifacher Wirkungsgrad – eine Revolution in der Energietechnik? *MNU*, 65(6), 340–348.

HAWKINS, E. & SUTTON, R. (2009). The Potential to narrow uncertainty in regional climate predictions. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 90, 1095–1107.

HUPE, R. (1994). Bluffen und drohen. *Spiegel*, 42, 134–136.

KOST, C., MAYER, J., THOMSEN, J., HARTMANN, N., SENKPIEL, C., PHILIPPS, S., ... SCHLEGL, T. (2013). *Stromgestehungskosten erneuerbarer Energien*. Freiburg: Fraunhofer Institut für solare Energiesysteme, www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/veroeffentlichungen-pdf-dateien/studien-und-konzeptpapiere/studie-stromgestehungskosten-erneuerbare-energien.pdf [2.6.2018].

NASH, J. (1950). Equilibrium Points in N-Person Games. *Proceedings in the National Academy of Sciences of the United States of America*, 36, 48.

NASH, J. (1951). Non-Cooperative Games. *Annals of Mathematics*, 54, 286–295.

RAJENDRA, K. P., MYLES, R. A., VICENTE, R. B., BROOME, J., CRAMER, W., CHRIST, R., ... VAN YPERSELE, J.-P. (2014). *Climate Change 2014 – Synthesis Report, IPCC*. URL: https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full.pdf [2.6.2018].

RUMPEL, V. L. (2016). *Entwicklung von globalem Denken mit Hilfe eines Planspiels zu Klima und Energiegewinnung im bilingualen Sachfachmodul Physik – Unterrichtsversuch in einer achten Klasse am Gymnasium*. Hausarbeit, Studienseminar Stade.



Dr. HANS-OTTO CARMESIN (Hans-Otto.Carmesin@t-online.de) unterrichtet am Gymnasium Athenaeum in Stade Physik und Mathematik. Auch ist er Fachleiter für Physik am Studienseminar in Stade und Privatdozent an der Universität Bremen. HANS-OTTO CARMESIN interessiert sich für Lernprozesse, gerne mit relevanten Kontexten, welche die Sinne, das Denken und manchmal forschendes Lernen anregen.

VERENA LYDIA RUMPEL hat das Klimaspiele im Rahmen ihres Referendariates am Studienseminar Stade mit entwickelt und erprobt. ■□