



---

## **Wie lassen sich klimageographische Inhalte im Geographieunterricht schülerorientiert vermitteln? – Ergebnisse einer didaktischen Rekonstruktion der Passatzirkulation**

**Teaching Climate Geography with a Learner-Centered Approach—Results of  
a Didactic Reconstruction of the Trade Wind System**

**Thomas Basten** 

### **Zitieren dieses Artikels:**

Basten, T. (2013). Wie lassen sich klimageographische Inhalte im Geographieunterricht schülerorientiert vermitteln? – Ergebnisse einer didaktischen Rekonstruktion der Passatzirkulation. *Geographie und ihre Didaktik | Journal of Geography Education*, 41(4), S. 153-172. doi 10.18452/24620

### **Quote this article:**

Basten, T. (2013). Wie lassen sich klimageographische Inhalte im Geographieunterricht schülerorientiert vermitteln? – Ergebnisse einer didaktischen Rekonstruktion der Passatzirkulation. *Geographie und ihre Didaktik | Journal of Geography Education*, 41(4), pp. 153-172. doi 10.18452/24620

# Wie lassen sich klimageographische Inhalte im Geographieunterricht schülerorientiert vermitteln? – Ergebnisse einer didaktischen Rekonstruktion der Passatzirkulation

Thomas Basten

## *Teaching climate geography with a learner-centered approach – Results of a didactic reconstruction of the trade wind system*

*The trade wind system is an important subject of geography education. It offers an excellent opportunity for developing exemplary and transferable ideas with respect to causes of wind, adiabatic processes, coriolis deflection, etc. It can also be used to explain the climatic conditions of the tropic's landscapes. This article contains the results of a didactic reconstruction. The scientific perspective has been analyzed by using the qualitative content analysis taking the metaphor analysis and the theory of experience-based understanding into account. The learners' ideas of the trade wind system or related topics in previous empirical studies has been reinterpreted with the aid of theory of experience-based understanding. Moreover the learners' conceptions of trade wind system, which were compiled in the framework of qualitative interviews with tenth-grade pupils of various German secondary schools (n=30, 18f, 12m) has been analyzed. As a result of comparing students' and scientists' ideas cognitive- and metacognitive-oriented guidelines were developed.*

**Keywords:** everyday experiences, atmospheric phenomena and processes, theory of experience-based understanding, metaphor analysis

### **1 Die Passatzirkulation verstehen – ein lohnendes Forschungsthema**

Klimageographische Inhalte im Geographieunterricht (z.B. lokale oder regionale Windsysteme, dynamisches Wettergeschehen in den mittleren Breiten, allgemeine Zirkulation der Atmosphäre) gehören zum festen Kern schulischer Curricula. Sie gelten unter Lernenden als auch unter Lehrenden als Herausforderung, denn sie bergen spezifische Verständnisschwierigkeiten. Drei Gründe lassen sich hierfür anführen: (1) Zentrale Bestandteile (Luft, Wasserdampf) sind unsichtbar. (2) Zahlreiche Prozesse lassen sich mit lebensweltlichen Analogien nur unzureichend erklären. So gibt es beispielsweise kein Alltagsphänomen, mit dem sich der Prozess der adiabatischen Dilatation oder Kompression (bei vertikalen Luftbe-

wegungen) angemessen vergleichen lassen könnte. (3) Die Komplexität atmosphärischer Systeme bereitet Schwierigkeiten, da Multikausalität und Rückkopplungen im Alltag selten erfahren werden. Dennoch prägen atmosphärische Phänomene und Prozesse in Form von Wetterereignissen den Alltag und Lernende entwickeln eigenständig Erklärungen hierzu, die aus wissenschaftlicher Sicht jedoch häufig unangemessen erscheinen. Diese Alltagsvorstellungen bilden wichtige Ausgangs- oder Anknüpfungspunkte für das schulische Lernen.

Im Rahmen eines Promotionsprojektes (BASTEN 2013) konnten Alltagsvorstellungen zu atmosphärischen Phänomenen und Prozessen – hier bestand ein Forschungsdesiderat – am Beispiel der Passatzirkulation erfasst, analysiert und mit Hilfe der

didaktischen Rekonstruktion (KATTMANN ET AL. 1997) als Forschungsrahmen zur Entwicklung didaktischer Empfehlungen herangezogen werden. Die Passatzirkulation erschien aus zwei Gründen ein lohnendes Thema für ein solches Forschungsprojekt: (1) Sie wird als physisch-geographisches System mit hohem Transferpotenzial betrachtet, da sie Systemelemente, -funktionen und -prozesse umfasst, die für das Verständnis von Windsystemen in anderen räumlichen Kontexten grundlegend sind. An ihr lassen sich also exemplarisch übertragbare, modellhafte Vorstellungen (Ursachen und Folgen vertikaler und horizontaler Luftbewegungen, Verdunstung, Kondensation und Niederschlagsbildung, Wechselwirkungen etc.) untersuchen. (2) Das Modell der Passatzirkulation ermöglicht es, die komplexen Ursachen der extremen klimatischen Bedingungen der tropischen Hitzewüsten, der wechselfeuchten Tropen sowie der immerfeuchten Tropen zu verstehen, die das Leben der Menschen vor Ort prägen und diese zum Teil vor erhebliche Herausforderungen stellt (z.B. im Bereich der Sahel mit hoher Niederschlagsvariabilität).

## 2 Theoretischer Rahmen und Forschungsfragen

Die Forschungsarbeit steht im Paradigma eines gemäßigt-moderaten Konstruktivismus (RIEMEIER 2007, S. 69 ff.). Ziel ist die Entwicklung von Lernumgebungen, die es Schülerinnen und Schülern ermöglicht, sich ihrer eigenen Vorstellungen bewusst zu werden und diese mit Hilfe von Interventionen zu überprüfen und in Hinblick auf ein wissenschaftlich angemesseneres Verständnis weiterentwickeln zu können. Vorstellungen von Lernern und Wissenschaftlern werden im kognitionslinguistischen Sinne als gedankliche Referenzen zu sprachlichen Äußerungen oder Zeichnungen betrachtet, die diesen vorausgehen (WILDGEN 2008, S. 8 ff.). Nach der Theorie des erfahrungsbasierten

Verstehens (GROPENGIESSER 2007) führen grundlegende sensomotorische Erfahrungen in der frühen Kindheit zur Ausbildung bestimmter Begriffe oder Logiken, die direkt verstanden werden können. Beispielsweise führt die Wahrnehmung des eigenen Körpers als Behälter zur Ausbildung der basalen Logik 'Inneres-Grenze-Äußeres'. Wenn Wissenschaftler Phänomene wie Luftdruck oder -dichte erklären, greifen sie auf das Behälter-Schema zurück und übertragen dieses metaphorisch auf den neuen, abstrakteren Zielbereich (im Beispiel Luft). Dies wird im Rahmen der Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens als imaginatives Verstehen bezeichnet.

Vorstellungsentwicklungen werden vor dem Hintergrund verschiedener Modelle der didaktischen Vorstellungsforschung betrachtet. POSNER ET AL. 1982 gehen in ihrem *Conceptual change*-Ansatz vom Gedanken eines Konzeptwechsels im Sinne einer Akkommodation aufgrund eines kognitiven Konfliktes aus. Der Rahmentheorie- und der Kategorisierung-Ansatz postulieren eine Einbettung von Vorstellungen in grundlegende ontologische und epistemologische Überzeugungen (VOSNIADOU 2008) bzw. ontologische Kategorisierungen (CHI 2008). Das Kontextmodell (CARRAVITA, HALLDÉN 1994) fokussiert die Situiertheit von Vorstellungen und hebt die unterschiedlichen Perspektiven von Lernern und Wissenschaftlern hervor.

Wissenschaftler und Lerner verstehen Phänomene und Prozesse im Rahmen der Passatzirkulation aufgrund von Erfahrungen und mit Hilfe von metaphorischen Konzepten. Häufig ähneln sich Vorstellungen von Lernern und Wissenschaftlern in der Vergangenheit, da beiden Mikro- und Makrokosmos sowie Zeiträume im Bereich von Milli-, Mikro- oder Nanosekunden, von Jahrhunderten, Jahrtausenden oder Jahrmillionen kaum zugänglich waren bzw. sind. Dies ist Wissenschaftlern erst in

jüngerer Zeit durch technische Hilfsmittel (Mikrokopien, Luft- und Satellitenbilder, Animationen mit Zeitraffer und Zeitlupe, Datierungsmethoden etc.) möglich. Daher soll auch die historische Entwicklung wissenschaftlicher Vorstellungen zur Passatzirkulation untersucht werden. Folgende Forschungsfragen sollen geklärt werden:

- Welches sind die aus wissenschaftlicher Sicht zentralen Vorstellungen, die für ein angemessenes Verstehen der Passatzirkulation notwendig erscheinen?
- Welches sind die zentralen Schwierigkeiten der Lerner beim Verstehen der wissenschaftlichen Vorstellungen?
- Welche didaktischen Empfehlungen lassen sich aus einem Vergleich von Lerner- und Wissenschaftlervorstellungen vor dem Hintergrund der Modelle der didaktischen Vorstellungsforschung ableiten?

### 3 Forschungsdesign und -methodik

Als Forschungsrahmen diente das Modell der didaktischen Rekonstruktion (KATTMANN ET AL. 1997). Entsprechend ergeben sich drei Untersuchungsaufgaben: (1) die fachliche Klärung, bei der wissenschaftliche Vorstellungen zur Passatzirkulation erhoben und untersucht werden, (2) das Erfassen und Analysieren der Vorstellungen der Lerner und (3) die didaktische Strukturierung, die sich aus dem wechselseitigen Vergleich von Lerner- und Wissenschaftlervorstellungen ergibt.

Als Analyseinstrument der fachlichen Klärung wurde die qualitative Inhaltsanalyse (MAYRING 2008; GROPENGIESSER 2008) unter Berücksichtigung der systematischen Metaphernanalyse (SCHMITT 2005) und der Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens (GROPENGIESSER 2007) genutzt. Zum einen wurden historische Texte (Tab. 1) unter-

**Tab.1: Quellentexte der fachlichen Klärung**

Art des Quellentextes	Autor (Jahr)	Inhalt
historisch	Francis Bacon (1622)	Tropische Ostwinde aufgrund sich drehender Himmelsphären bzw. als Übertragung eines Bewegungsimpulses sich ausdehnender Luft
	Galileo Galilei (1632)	Tropische Ostwinde als Zurückbleiben einer trägen Atmosphäre gegenüber der rotationsbedingten Bewegung der Erdoberfläche
	Edmond Halley (1686)	Tropische Nordost- bzw. Südostwinde als Resultat des Tagesganges der Sonne
	George Hadley (1735)	Tropische Nordost- bzw. Südostwinde als Resultat unterschiedlicher Rotationsgeschwindigkeiten der verschiedenen geographischen Breiten
aktuell	Hans Häckel (2012)	Passatzirkulation aus Perspektive der Meteorologie (Fokussierung auf physikalische Eigenschaften der Atmosphäre in Hinblick auf konkrete Wettererscheinungen)
	Alan Strahler & Arthur Strahler (2009)	Passatzirkulation aus Perspektive der Klimageographie (Fokussierung auf Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Erdoberfläche)
	Wolfgang Weischet & Wilfried Endlicher (2008)	Passatzirkulation aus Perspektive der Klimatologie (Fokussierung auf physikalische Eigenschaften der Atmosphäre in Hinblick auf das Klima)

sucht, die mit ihrem jeweiligen Erscheinen gängige Lehrmeinungen widerlegten und für eine bestimmte Zeit als wissenschaftlich anerkannt galten. Zum anderen wurden im Sinne einer internen Validierung gängige, aktuelle Lehrwerke der Klimageographie, der Meteorologie, der Klimatologie (Tab.1) herangezogen, da die Passatzirkulation als Forschungsgegenstand von allen drei Disziplinen aus unterschiedlichen Perspektiven betrachtet wird.

Im Rahmen des Erfassens der Lernerperspektiven wurden bisherige empirische Forschungsarbeiten zu Alltagsvorstellungen zu atmosphärischen Phänomenen und Prozessen erfasst und vor dem theoretischen Hintergrund (Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens) reinterpretiert. Forschungsdesiderata konnten v.a. in zwei Bereichen herausgearbeitet werden: (1) Vorstellungen von Lernern zu Ursachen und Folgen von horizontalen und vertikalen Luftbewegungen sowie (2) das systemische Verstehen atmosphärischer Vorgänge, insbesondere im Kontext Passatzirkulation.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungsaufgabe wurden zur Vorbereitung der Empirie bei der Konzeption eines Interviewleitfadens berücksichtigt. Als Erhebungsinstrument wurde das qualitative Leitfadeninterview gewählt, da bisher unbekanntes in ihrer Tiefe und Individualität erfasst werden, Problemzentrierung, aber auch Offenheit und Interaktivität möglich sein sollten (BOHNSACK 2010, S.14f.; HOPF 2012). Aufgrund curricularer Vorgaben (MBWJK 2011, S. 41 und S. 133) erschien es sinnvoll, Probanden am Ende der Jahrgangsstufe 10 auszuwählen, um zu erheben, welche Voraussetzungen diese bei einer vertieften Thematisierung der Passatzirkulation zu Beginn der gymnasialen Oberstufe in Rheinland-Pfalz – dem Bundesland, in dem die Empirie durchgeführt wurde – mitbringen. Als vorteilhaft haben sich in einer Pilotierungsphase (Januar-Februar 2011) Gruppeninter-

views mit je drei Schülerinnen und Schülern erwiesen, da hierdurch Diskussionen unter den Lernern hinsichtlich ihrer Alltagsvorstellungen und ihrer Begründungen gefördert werden konnten. Die Erhebung erfolgte im Zeitraum Mai-Juni 2011 in Form von Gruppeninterviews mit je drei Schülerinnen und drei Schülern im Sinne einer möglichst breiten Streuung an vier verschiedenen Gymnasien in Landau in der Pfalz. Bei der Auswahl der Probanden durch den Interviewer in Rücksprache mit dem Klassenlehrer wurde auf ein mittleres Leistungsniveau in naturwissenschaftlichen Fächern geachtet. Zudem wurde das Thema im Vorfeld nicht bekannt gegeben, um zu verhindern, dass sich überwiegend interessierte Schülerinnen und Schüler melden, deren Vorstellungen u.U. wissenschaftsorientierter als durchschnittliche sind. Eine Sättigung wurde nach 10 Gruppeninterviews mit insgesamt 30 Probanden (18w, 12m) erreicht. Die Interviews wurden videographisch dokumentiert und transkribiert. Als Analyseinstrument wurde ebenfalls auf die qualitative Inhaltsanalyse unter Berücksichtigung der systematischen Metaphernanalyse (SCHMITT 2005) und der Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens (GROPENGIESSER 2007) zurückgegriffen. Die Interviews wurden hierbei zunächst einzeln und unter bestimmten Leitfragen untersucht mit dem Ziel, geordnete Lernaussagen herauszuarbeiten. Diese wurden anschließend miteinander verglichen. Hierbei konnten induktiv Typen gebildet werden, d.h. Lernaussagen, die gemeinsame Merkmale besitzen, wurden zu einer Gruppe zusammengefasst (s. Tab. 2).

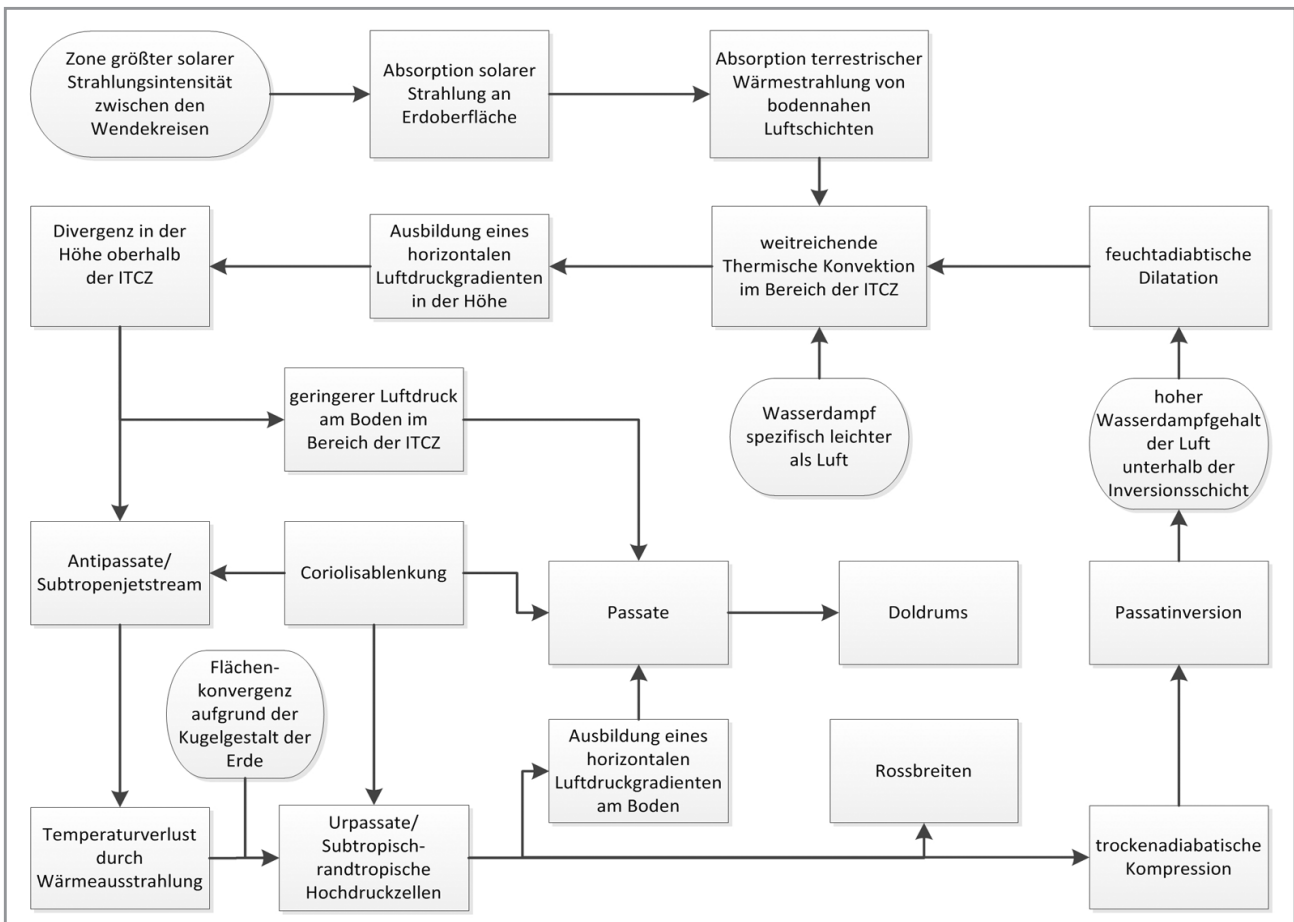
Die didaktische Strukturierung erfolgte unter Berücksichtigung bisheriger Ergebnisse und Empfehlungen der didaktischen Vorstellungsforschung. Diese sind kognitiv ausgerichtet. Vier Bedingungen sollten erfüllt sein (vgl. im Folgenden POSNER ET AL. 1982 und DUIT, TREAGUST 1998): (1) Interventionen sollten so gestaltet sein, dass sie Unzu-

friedenheit bei den Lernern mit den eigenen Alltagsvorstellungen auslösen. Grundsätzlich sind vier Möglichkeiten denkbar, wie ein kognitiver Konflikt erzeugt werden könnte: (a) Die Vorstellung eines Lerners könnte in sich widersprüchlich sein. (b) Zwischen verschiedenen Vorstellungen von Lernern gibt es Diskrepanzen. (c) Lerner- und Wissenschaftlervorstellung stehen im Widerspruch zueinander. (d) Lernervorhersage und eintreffendes Ereignis stimmen nicht überein. (2) Lernende müssen wissenschaftliche Vorstellungen auf der Grundlage ihres Vorwissens verstehen können. (3) Diese sollten die Widersprüche auflösen können, also Aspekte erklären können, die die ursprüngliche Alltagsvorstellung nicht erklären konnte. (4) Sie sollte sich auch in anderen Kontexten als

fruchtbar erweisen, also transferfähiges Wissen repräsentieren. Dieser kognitive Ansatz wird kombiniert mit metakognitiven Leitlinien und Empfehlungen zu affektiven und sozialen Aspekten der Vorstellungsentwicklung unter Berücksichtigung verschiedener Modelle und Theorien zur Vorstellungsentwicklung (u.a. CHI 2008; VOSNIADOU 2008; HALLDÉN ET AL. 2008; NIEBERT, K. ET AL. 2012).

**4 Zentrale wissenschaftliche Konzepte für ein angemessenes Verständnis der Passatzirkulation**

Wissenschaftler verstehen unter der Passatzirkulation ein schematisch-vereinfachtes Modell vorherrschender Windrichtungen in den Tropen. In allen drei Disziplinen (Meteorologie, Klimageographie, Klima-

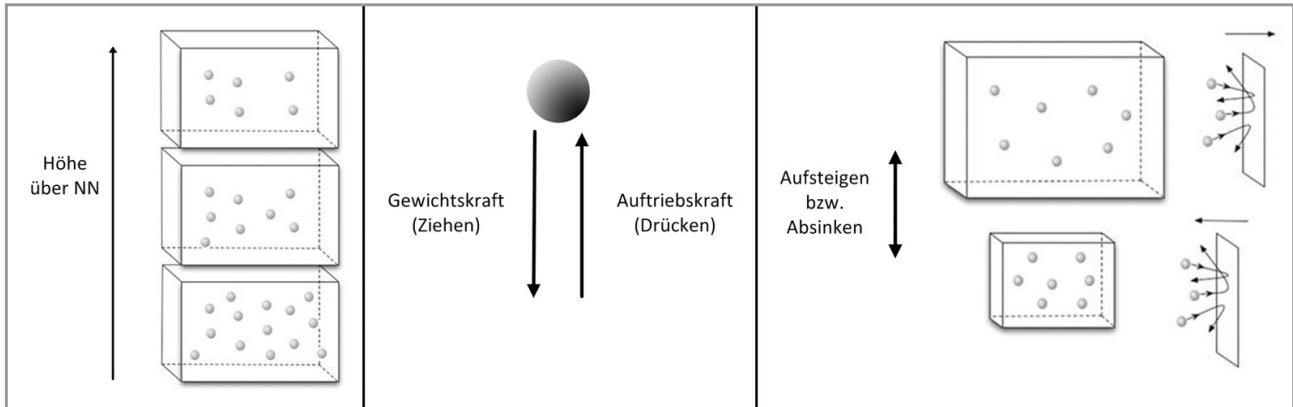


**Abb.1: Die Passatzirkulation als Wirkungsgefüge** (eigene Darstellung auf der Basis von HÄCKEL 2012; STRAHLER, STRAHLER 2009 und WEISCHET, ENDLICHER 2008. Anmerkung: Vierecke mit runden Seiten: Eigenschaften; Vierecke: Prozesse, also beispielsweise die Ausbildung von Luftdruckverhältnissen, die zu wechselhaften Winden (Doldrums) oder Windstille (Rossbreiten) führen oder Luftbewegungen wie die Passate, Antipassate etc.; Pfeile: Folge von)

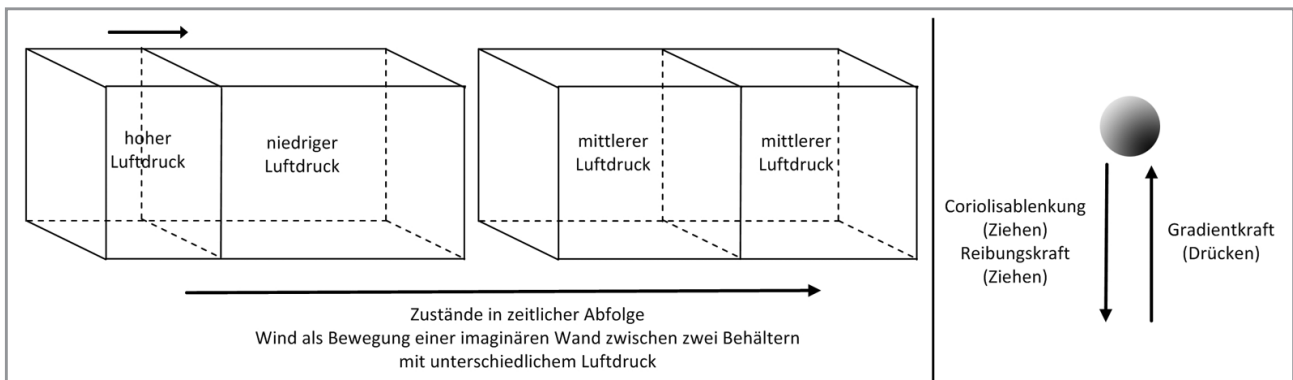
tologie) wird hierbei ein komplexes System mit zahlreichen Rückkopplungen und Wechselwirkungen beschrieben (s. Abb. 1).

Auf der Grundlage der Analyse von historischen und aktuellen wissenschaftlichen Arbeiten zur Passatzirkulation konnten neun zentrale Konzepte für ein aus wissenschaftlicher Sicht angemessenes Verständnis der Passatzirkulation herausgearbeitet werden:

1. Die Ursachen vertikaler Luftbewegungen werden durch eine relative Betrachtung erfasst, was über die basale Logiken (LAKOFF 1987, S. 272f.) 'Inneres-Grenze-Äußeres' und 'Teil-Ganzes' verstanden wird: Luft steigt oder sinkt, weil ihre Dichte, also die Anzahl der Luftteilchen pro Volumen, größer oder geringer als die der umgebenden Luft ist. Auftriebs- und Gewichtskräfte (s. Abb.2) können über Ziehen- und Drücken-Schemata (KOVACS 1986, S. 90; JOHNSON 1987, S. 42-90) begriffen werden.
2. Die Lufttemperatur wird als Bewegung von Teilchen aufgefasst, was ebenfalls über basale Logiken verstanden werden kann: Erhöht sich die Lufttemperatur, bewegen sich die Teilchen schneller, der Luftdruck steigt, die Luftdichte wird geringer.
3. Luftdruck, -temperatur und -dichte der sich vertikal bewegenden Luft verändern sich aufgrund der abnehmenden Dichte der umgebenden Luft mit zunehmender Höhe. Diese hat eine Ausdehnung und damit Abkühlung aufsteigender Luft (adiabatische Dilatation) bzw. eine Komprimierung und damit Erwärmung absinkender Luft (adiabatische Kompression) zur Folge. Auch hier spielt also die Logik des Behälters ('Inneres-Grenze-Äußeres') eine wichtige Rolle (s. Abb.2). Horizontale Luftbewegungen können als Ausgleichsbewegung von Luftteilchen aufgrund unterschiedlicher Druckverhältnisse verstanden werden (s. Abb. 3).
4. Wasser in der Atmosphäre und Wolken werden mit Hilfe der basalen Logik 'Aufnahme-Zustandsänderung-Ausscheidung' (LAKOFF, JOHNSON 2008, S. 44 f.) verstanden: Luft nimmt Wasserdampf auf (Verdunstung) und scheidet diesen aus (Kondensation in der Atmosphäre und Wolkenbildung).
5. Wasser in der Atmosphäre, Wolken und Regentstehung werden jedoch auch über Ziehen- und Drücken-Schemata verstanden: Auf die die Wolke konstituierenden winzigen Tröpfchen flüssigen Wassers wirken Gewichts- und Auftriebskräfte. Diese gleichen sich gegenseitig aus. Überwiegt jedoch die Gewichtskraft durch ein allmähliches Zusammenfließen der Tröpfchen, fallen diese als Regen zu Boden.
6. Die stärkere Erwärmung tropischer Luft wird auf himmelsmechanische Ursachen zurückgeführt: Die Schiefe der Ekliptik bewirkt, dass solare Strahlung in einem steilen Winkel in den niederen Breiten auftrifft und damit mehr Energie pro Fläche in terrestrische Wärmestrahlung umgewandelt wird.
7. Die Kugelgestalt der Erde und ihre Rotation haben zur Folge, dass Luftmassen auf der Nordhalbkugel in Bewegungsrichtung nach rechts und auf der Südhalbkugel in Bewegungsrichtung nach links abgelenkt werden (Coriolisablenkung).
8. Die Passatzirkulation wird als komplexes System mit Wechselwirkungen erfasst (s. Abb. 1).
9. Die Entstehung von Regenzeiten in den wechselfeuchten Tropen bzw. die Ursachen von Trockenheit in den Randtropen (tropische Hitzewüsten) werden mit der jahreszeitlichen Verschiebung des tropischen Windsystems nach Norden bzw. Süden aufgrund des sich verändernden Einstrahlungswinkels der Sonne bzw. der Passatinversion erklärt.



**Abb. 2: Vorstellungen zum Aufbau der Atmosphäre** (links), zu auf Luft wirkende Kräfte (Mitte) und zu adiabatischen Prozessen (rechts) (eigene schematische Darstellung auf der Grundlage von HÄCKEL 2012, S. 37-43 sowie 252-278; STRAHLER, STRAHLER 2009, S. 141-143; WEISCHET, ENDLICHER 2008, S. 39-45 sowie S. 182-191)



**Abb. 3: Vorstellungen zur Ursache horizontaler Luftbewegungen** (links) und zu beteiligten Kräften (rechts) (eigene schematische Darstellung auf der Grundlage von HÄCKEL 2012, S. 252-308; STRAHLER, STRAHLER 2009, S.170-187; WEISCHET, ENDLICHER 2008, S. 134-159 sowie S. 235-285)

**5 Zentrale Schwierigkeiten der Lerner beim Verstehen wissenschaftlicher Vorstellungen zur Passatzirkulation**

Im Rahmen der Auswertung der Lerner Aussagen aus den Interviews konnten insgesamt 38 Typen von Alltagsvorstellungen zu unterschiedlichsten Aspekten der Passatzirkulation rekonstruiert werden (s. Tab 2a und 2b). (Auf eine präzisere Interpretation der Typen (z.B. nach dem Grad der Wissenschaftsorientierung) kann hier aus Platzgründen leider nicht eingegangen werden (vgl. Basten 2013, S. 95 ff.).

Zentrale Schwierigkeiten der Lerner beim Verstehen wissenschaftlicher Vor-

stellungen zur Passatzirkulation konnten durch den wechselseitigen Vergleich der 38 rekonstruierten Vorstellungstypen mit den Wissenschaftlervorstellungen herausgearbeitet werden. Sie beziehen sich wie folgt auf fünf Bereiche:

**1) Ursachen und Folgen vertikaler und horizontaler Luftbewegungen im Allgemeinen:**

- a) Lerner betrachten aufsteigende Luft als etwas Absolutes: Luft steigt auf, weil sie warm und/oder leicht ist, und sie sinkt, weil sie kalt und/oder schwer ist. Eine relative Betrachtung von sich vertikal



bewegender und umgebender Luft mit Hilfe der basalen Logik 'Inneres-Grenze-Äußeres' wird nicht vorgenommen. Entsprechend sind präzise Aussagen über die Dauer des Aufstiegs ebenso wie ein Verständnis der Passatinversion nicht möglich (s. Vorstellungstypen 1, 7, 8, 9, 17, 22, 28 in Tab. 2).

b) Sich bewegende Luft wird als eine Art Festkörper mit entsprechenden Eigenschaften betrachtet: Ein Luftkörper versetzt einem anderen einen Bewegungsimpuls, sodass dieser aufsteigt oder die Richtung ändert. Umgekehrt kann ein Luftkörper andere Luft auch aufhalten, wenn sie gegen ihn stößt (s. Vorstellungstypen 3, 9, 14, 16, 20,

**Tabelle 2a: Themenblöcke, Leitfragen und rekonstruierte Vorstellungstypen**

Thema	Leitfrage der Auswertung	Ergebnisse	Typ-Nr.
Aufwinde	Wie stellen sich die Lerner die Bedingungen vor, unter denen Luft aufsteigt?	Luft steigt unter der Bedingung auf, dass sie warm ist.	1
		Luft steigt unter der Bedingung auf, dass sie wärmer oder leichter als etwas ist.	2
		Luft steigt unter der Bedingung auf, dass etwas anderes sie dazu bringt.	3
	Inwiefern stellen sich die Lerner vor, dass sich die Luft beim Aufsteigen verändert?	Aufsteigende Luft kühlt ab – Ursachen.	4
		Aufsteigende Luft wird schwerer – Ursachen.	5
		Aufsteigende Luft wird leichter – Ursachen.	6
	Welche Vorstellungen haben die Lerner darüber, wie weit Luft aufsteigt?	Luft steigt auf, solange bestimmte Bedingungen gegeben sind.	7
		Luft steigt bis zu den Wolken oder bis es regnet auf.	8
		Luft steigt bis zu sonstigen Grenzen auf oder bis sie Hindernisse überquert hat.	9
Aufwinde in den Tropen	Inwiefern stellen sich die Lerner vor, dass sich Aufwinde in den Tropen von denen in Deutschland unterscheiden?	Die Luft in den Tropen ist wärmer – Ursachen.	10
		Die Luft in den Tropen ist wärmer – Folgen.	11
		Die Luft in den Tropen enthält mehr Wasserdampf – Ursachen.	12
		Die Luft in den Tropen enthält mehr Wasserdampf – Folgen.	13
Windentstehung und Antipassate	Welche Vorstellungen haben die Lerner zur Ursache horizontaler Luftbewegungen?	Wind entsteht durch ein Aufeinandertreffen.	14
		Wind entsteht als Folge eines Ausgleichs.	15
		Wind entsteht aufgrund eines Drückens oder aufgrund von Stößen.	16
	Welche Vorstellungen haben die Lerner darüber, was mit der aufgestiegenen Luft in der Höhe in den Tropen geschieht?	Die aufgestiegene Luft sinkt vor Ort wieder ab.	17
		Die aufgestiegene Luft sinkt allmählich nach polwärtiger Bewegung wieder ab.	18
		Die aufgestiegene Luft weht als Wind auf gleichbleibender Höhe.	19
		Die sich in der Höhe bewegende Luft ändert ihre Richtung, weil sie auf etwas stößt oder von etwas angezogen wird.	20
		Die sich in der Höhe bewegende Luft ändert ihre Richtung aufgrund der Erdrotation.	21

24, 29, 34 in Tab. 2). Die Vorstellungen ähneln historischen Vorstellungen Francis Bacons (s. Tab. 1). In fachwissenschaftlichen Texten und Schulbüchern verwendete Metaphern wie Luftsäule, Luftpaket (HÄCKEL 2012, S. 38 und S.46) oder Walze (WEISCHET, ENDLICHER 2008, S. 151) könnten solche Vorstellungen evozieren oder verstärken.

c) Lerner gehen davon aus, dass Luft Wärme an umgebene Luft leitet und dass

Luft durch Wärme- oder Energieaufnahme schwerer wird (s. Vorstellungstypen 4, 10, 11, 25, 26 in Tab. 2). Das Phänomen der Wärmeleitung kann im Alltag häufig wahrgenommen werden (etwa wenn sich ein Löffel in heißer Suppe langsam erhitzt). Luft besitzt nach wissenschaftlicher Auffassung jedoch eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit (WEISCHET, ENDLICHER 2008, S. 182 f.). Die wissenschaftliche Vorstellung von adiabatischer Ab-

**Tab. 2b: Themenblöcke, Leitfragen und rekonstruierte Vorstellungstypen**

Thema	Leitfrage der Auswertung	Ergebnisse	Typ-Nr.
Abwinde und Urpasate	Wie stellen sich die Lerner die Bedingungen vor, unter denen Luft in der Höhe absinkt?	Luft sinkt ab unter der Bedingung, dass sie kalt oder schwer ist.	22
		Luft sinkt ab unter der Bedingung, dass sie schwerer oder kälter als etwas ist.	23
		Luft sinkt aus sonstigen Gründen ab.	24
	Inwiefern stellen sich die Lerner vor, dass sich die Luft beim Absinken verändert?	Die absinkende Luft erwärmt sich – Ursachen.	25
		Die absinkende Luft erwärmt sich – Folgen.	26
		Die absinkende Luft erwärmt sich nicht – Ursachen.	27
	Welche Vorstellungen haben die Lerner darüber, wie weit Luft absinkt?	Die Luft sinkt bis zum Boden ab.	28
		Luft sinkt nur bis zu einer bestimmten Höhe ab.	29
Passatzirkulation	Welche Vorstellungen haben die Lerner zur Passatzirkulation?	Ursachen und Folgen ohne Wechselwirkungen.	30
		Die Passatzirkulation als lineares System.	31
		Die Passatzirkulation als komplexes System mit Wechselwirkungen.	32
		Der Passatwind ändert seine Richtung aufgrund der Erdrotation.	33
		Der Passatwind ändert seine Richtung aufgrund von Zusammenstößen.	34
Regen- und Trockenzeiten	Welche Vorstellungen haben die Lerner zur Entstehung der Regenzeiten in den wechselfeuchten Tropen?	Regenzeiten entstehen durch einen Wechsel der Windrichtung.	35
		Regenzeiten entstehen aufgrund eines sich ändernden Abstands zwischen Erde und Sonne.	36
		Regenzeiten entstehen aufgrund eines sich ändernden Einstrahlungswinkels der Sonne.	37
		Regenzeiten entstehen, weil sich etwas füllt oder anstaut.	38

kühlung bzw. Erwärmung entzieht sich der Erfahrungsmöglichkeit der Lerner.

## **2) Verdunstung, Kondensation, Wolkenbildung und Niederschlag im Allgemeinen:**

- a) Lerner nehmen an, dass Luft durch Aufnahme von Wasserdampf schwerer wird. Dies erscheint aufgrund von Alltagserfahrungen plausibel (beispielsweise wird die Kleidung schwerer, wenn sie nass ist) und wird zudem durch metaphorische Wendungen (Luft nimmt Wasserdampf auf oder scheidet diesen aus) verstärkt (s. Vorstellungstypen 5, 8, 12, 13, 38 in Tab. 2). Aus wissenschaftlicher Sicht ist das Gegenteil der Fall (WEISCHET, ENDLICHER 2008, S. 160 f.).
- b) Das Verstehen des Verhaltens von Wasser in der Atmosphäre bereitet Schwierigkeiten: Lerner gehen davon aus, dass Luft mit dem Regen absinkt oder sie stellen sich Wolken als Behälter vor, die sich mit Wasserdampf [sic!] füllen. Regen setzt ein, wenn die Behälter voll sind (s. Vorstellungstypen 5, 8, 12, 13, 38 in Tab. 2).

## **3) Entstehung der Jahreszeiten und Ursache hoher Lufttemperaturen in den Tropen:**

Die wissenschaftliche Erklärung der Strahlungsintensität in Abhängigkeit vom Einstrahlungswinkel unter Berücksichtigung der Schiefe der Ekliptik erscheint sehr abstrakt und im Alltag kaum nachvollziehbar. Hingegen führen Alltagserfahrungen mit Wärmequellen (Ofen, Grill etc.) zur Vorstellung, dass der Abstand von Erde zu Sonne relevant sei. Drei Varianten konnten identifiziert werden, mit denen sich jedoch die jahreszeitliche Verlagerung des tropischen Windsystems nach Norden bzw. Süden und die damit verbundenen Regenzeiten in den wechselfeuchten Tropen nicht nachvollziehen lassen (s. Vorstellungstyp 10 in Tab. 2).

- a) Im jahreszeitlichen Verlauf reduziert sich der Abstand von Erde zu Sonne aufgrund der elliptischen Erdbahn.
- b) Durch die Neigung der Erdachse zur bzw. entgegen der Sonne verändert sich der Abstand der jeweiligen Halbkugel zur Sonne.
- c) Aufgrund der Kugelgestalt der Erde befinden sich die Tropen näher an der Sonne.

## **4) Passatzirkulation und Passatwinde:**

- a) Die Passatwinde werden als Resultat einer Relativbewegung der Erdoberfläche gegenüber der ruhenden Atmosphäre betrachtet (s. Vorstellungstypen 21, 33 in Tab. 2). Die Erde rotiert von Westen nach Osten, die Passate als Ostwinde machen lediglich eine Scheinbewegung. Diese Vorstellung artikuliert auch Galileo Galilei (s. Tab. 1). Sie erscheint insofern plausibel, weil sich im Alltag häufig beobachten lässt, wie vermeintlich leichte Dinge wie Nebel oder Rauch nach oben steigen. Auch Wolken scheinen nicht der Erdanziehungskraft zu unterliegen.
- b) Die Passatzirkulation wird als lineares System betrachtet, bei dem Prozesse zeitlich nacheinander stattfinden: Im Bereich der ITCZ steigt Luft 'wieder auf', 'es wiederholt sich'. Die Winde werden dabei als Entitäten betrachtet, die sich durch einen vermeintlich luftleeren Raum bewegen. Sie können wie Festkörper zusammenstoßen, dadurch ihre Richtung ändern und sich gegenseitig beeinflussen (s. Vorstellungstypen 14, 16, 20, 30, 31, 34 in Tab. 2). Ruhende Luft kann im Gegensatz zu sich bewegender Luft nicht sinnlich wahrgenommen werden, sodass die Vorstellung eines luftleeren Raums, durch den sich Windentitäten bewegen, sich unbewusst bei den Lernern entwickelt haben könnte. Auch Abbildungen in Schulbüchern, bei denen vermeintliche Windentitäten durch Pfeile angedeutet

werden, können diese Vorstellungen evolvieren oder verstärken. Die Komplexität des System Passatzirkulation mit seinen zahlreichen Rückkopplungen und Wechselwirkungen (s. Abb. 1) lässt sich so jedoch aus wissenschaftlicher Sicht nicht angemessen nachvollziehen.

### 5) *Entstehung von Regen- und Trockenzeiten in den wechselfeuchten Tropen:*

Die wissenschaftliche Vorstellung einer Passatinversion basiert auf Annahmen über die Wechselwirkung zwischen feuchtadiabatischer Abkühlung aufsteigender Luftmassen im Bereich der ITCZ und trockenadiabatischer Erwärmung absinkender Urpassate. Die bisher dargestellten Vorstellungen der Lerner lassen ein solches Verständnis jedoch nicht zu. Entsprechend formulieren sie andere Erklärungen für das Phänomen der Regenzeiten in den wechselfeuchten Tropen.

- a) Lerner erklären die Regen- und Trockenzeiten als Folge einer Änderung der Windrichtung: Regenzeiten entstehen, wenn der Wind aus Richtung Ozean oder Meer weht – Trockenzeiten, wenn er vom Land weht (s. Vorstellungstyp 35 in Tab. 2). Die Aussagen erinnern an einen Sonderfall der Passatzirkulation, den Monsun.
- b) Regen- und Trockenzeiten werden durch Lufttemperaturen bedingt: Im jahreszeitlichen Verlauf kommt es in den wechselfeuchten Tropen zu einer Abkühlung, wodurch Regen einsetzt. Umgekehrt wird Trockenheit durch Hitze erzeugt (s. Vorstellungstyp 36, 37 in Tab. 2).
- c) Regen- und Trockenzeiten sind die Folgen eines Füllens oder Stauens: In der Trockenzeit sammeln sich große Mengen Wasserdampf in der Luft. Diese Phase dauert einige Monate an, da das zu füllende Luftvolumen sehr groß ist. Regenzeiten setzen ein, wenn Luft mit Wasserdampf ausreichend gefüllt ist (s. Vorstellungstyp 38 in Tab. 2).

### 6 **Schlussfolgerungen: Vermittlungsstrategien zur Passatzirkulation im Geographieunterricht**

Die Vermittlungsstrategien resultieren aus dem wechselseitigen Vergleich der zentralen Schwierigkeiten der Lerner und den aus wissenschaftlicher Sicht zentralen Konzepten für ein angemessenes Verständnis der Passatzirkulation. Die folgenden neun Empfehlungen sind kognitiv ausgerichtet und orientieren sich am *Conceptual change*-Ansatz (POSNER ET AL. 1982). Es werden Möglichkeiten darlegt, bei den Lernern Unzufriedenheit mit den eigenen Vorstellungen durch einen kognitiven Konflikt zu erzeugen. Die wissenschaftlichen Vorstellungen können diesen Widerspruch auflösen. Sie werden hinsichtlich ihrer Verständlichkeit, Plausibilität und Fruchtbarkeit reflektiert:

#### 1) *Sich vertikal bewegende Luft als etwas Relatives betrachten!*

- a) UNZUFRIEDENHEIT: Die absolute Betrachtung der Lerner (Luft steigt auf, weil sie warm ist, etc.) steht im Widerspruch zum Phänomen Windstille: Luft müsste sich immer in einer permanenten Auf- und Abwärtsbewegung befinden, da sie entweder kalt oder warm ist, was jedoch offensichtlich nicht der Fall ist. Ab welcher Temperatur steigt Luft nicht mehr auf?
- b) VERSTÄNDLICHKEIT: Um vertikale Luftbewegungen zu verstehen, greifen Wissenschaftler auf zwei basale Logiken zurück: die des Behälter-Schemas und die des Teil-Ganzes-Schemas. Sie vergleichen die Anzahl von Luftteilchen im Inneren des Behälters (=sich vertikal bewegende Luft) mit der außerhalb des Behälters (=umgebende Luft).
- c) PLAUSIBILITÄT UND FRUCHTBARKEIT: Die Dauer der vertikalen Luftbewegung kann so genau erfasst werden. Luft steigt oder sinkt, solange eine Dichtedif-

ferenz zur umgebenden Luft vorhanden ist. Die Lerner können so erklären, warum sich Luft nicht in einer permanenten Aufwärts- oder Abwärtsbewegung befindet. Das Prinzip kann auf vertikale Luftbewegungen in unterschiedlichsten Kontexten übertragen werden.

**2) *Sich bewegende Luft als einen sich in seiner Form verändernden Behälter begreifen!***

- a) UNZUFRIEDENHEIT: Lerner betrachten Wind als Entität, die sich durch einen vermeintlich luftleeren Raum bewegt. Sie weisen dieser zudem Festkörpereigenschaften zu (Luft knallt gegen andere, etc.). Unzufriedenheit mit dieser Vorstellung könnte durch Beobachtungen bei Modellversuchen erzeugt werden: Beispielsweise neigen sich die Flammen in einem Tee-Licht-Kreis zur Mitte, da hier ein thermisches Tief entsteht und Luft permanent dorthin strömt (THEISSEN 2003, S. 8 f.). Wäre Wind eine begrenzte, sich bewegende Entität, würden sich die Flammen anders verhalten.
- b) VERSTÄNDLICHKEIT: Wissenschaftler stellen sich zwei Behälter mit einer gemeinsamen Wand vor, die mit sich unterschiedlich schnell bewegenden Teilchen gefüllt sind. Horizontaler Wind wird als ein Verschieben dieser imaginären Wand in Richtung des Behälters mit der geringeren Bewegungsgeschwindigkeit der Teilchen (=niedrigerer Druck) begriffen (s. Abb. 3). Die Dichte- und Temperaturveränderungen sich vertikal bewegender Luft verstehen Wissenschaftler ebenfalls mit Hilfe des Behälter- und des Teil-Ganzes-Schemas (s. Abb. 2): Der aufsteigende Luftbehälter dehnt sich aufgrund der geringer werden Dichte der umgebenden Luft aus bzw. der absinkende Luftbehälter wird zusammengepresst, wodurch es zu einer Abkühlung bzw. Erwärmung kommt (adiabatische Prozesse).

- c) PLAUSIBILITÄT UND FRUCHTBARKEIT: Das beobachtete Phänomen lässt sich so erklären. Die Behälter erscheinen als gedankliche Hilfskonstruktionen. Solange sich beispielsweise die Flammen im Tee-Licht-Kreis zur Mitte neigen, verschiebt sich eine imaginäre Wand in Richtung des niedrigeren Druckes. Sie können zudem verstehen, warum sich die Dichte der aufsteigenden bzw. absinkenden Luft verändert, sodass es zu Gleichgewichtszuständen kommen kann.

**3) *Temperaturveränderungen von ruhender und sich bewegender Luft angemessen verstehen!***

- a) UNZUFRIEDENHEIT: Die Vorstellungen der Lerner vom vertikalen Temperaturverlauf der Luft in der Troposphäre entsprechen grob den wissenschaftlichen Vorstellungen. Sie gehen jedoch davon aus, dass Luft Wärme leitet. Aufsteigende Luft wird also durch die kalte Luft in der Höhe abgekühlt und absinkende, kalte Luft durch die bodennahe Luft erwärmt. Diese Vorstellungen sind in sich widersprüchlich, da die aufsteigende, warme Luft die Höhenluft allmählich erwärmen müsste. Ein anderes Problem ergibt sich dadurch, dass Prozesse wie thermische Konvektion und damit vertikale Luftbewegungen bei großer Wärmeleitfähigkeit der Luft gar nicht stattfinden könnten (da es ja vorher zu einem Temperaturausgleich kommen würde), was jedoch offensichtlich nicht der Fall ist.
- b) VERSTÄNDLICHKEIT: Die wissenschaftliche Vorstellung von adiabatischen Prozessen (wörtlich bedeutet adiabatisch: nicht hindurch schreiten, vgl. WEISCHET, ENDLICHER 2008, S. 183) basiert auf zwei basalen Logiken, die direkt verständlich sind: Die Temperatur wird dabei als Bewegung von Luftteilchen verstanden. Die Ausdehnung beim Aufstieg hat eine

geringere, die Kompression beim Absinken eine schnellere Teilchenbewegung zur Folge. Die Erwärmung von ruhender Luft wird über das Person-Schema verstanden: Bodennahe Luftschichten absorbieren langwellige terrestrische Wärmestrahlung (Aufnahme), die Luftteilchen bewegen sich nun schneller (Zustandsänderung) und die Luft emittiert langwelligere Wärmestrahlung (Ausscheidung).

- c) **PLAUSIBILITÄT UND FRUCHTBARKEIT:** Die Lerner können damit verstehen, warum sich die Luft in der Höhe nicht kontinuierlich erwärmt. Sie können die Erklärung auch in anderen Kontexten heranziehen, beispielsweise um die hohen Temperaturen im Einflussbereich der Urpassate zu erklären bzw. thermische Konvektion im Bereich der ITCZ zu verstehen. Auch wird klar, warum die Sonne die obere Atmosphäre nicht direkt erwärmt.

#### **4) Wasser in der Atmosphäre – Verdunstung und Kondensation angemessen erfassen!**

- a) **UNZUFRIEDENHEIT:** Lerner gehen davon aus, dass Luft durch Aufnahme von Wasserdampf schwerer wird und Wolken aus Wasserdampf bestehen. Zudem haben sie Probleme, das Verhältnis von Luft zu Wasser in der Atmosphäre nach der Kondensation angemessen zu erfassen. Sie erklären zum Beispiel, dass sich Luft und Regen verbinden und gemeinsam absinken. Wasserdampf sei beim Kochen als weißer Rauch sichtbar. Diese Vorstellungen könnten in Frage gestellt werden: Wieso sieht man keinen zu Wolken aufsteigenden Wasserdampf in der Natur? Wo befindet sich das Wasser, bevor es als Regen zu Boden fällt?
- b) **VERSTÄNDLICHKEIT:** Wissenschaftler verstehen die Prozesse der Verdunstung und Kondensation vor allem mit

zwei basalen Logiken: Luft kann Wasserdampf aufnehmen und ausscheiden (Person-Schema). Wasserdampfteilchen nehmen nach der Aufnahme den Platz von Luftteilchen ein (Teil-Ganzes-Schema). Die wasserdampfhaltige Luft wird leichter, da Wasserdampfteilchen ein geringeres spezifisches Gewicht haben als Luftteilchen.

- c) **PLAUSIBILITÄT UND FRUCHTBARKEIT:** Mit Hilfe der wissenschaftlichen Vorstellung kann erklärt werden, warum Wasserdampf und Luft als eine Entität betrachtet werden können (Verdunstung=Aufnahme), während Regen (Kondensation=Ausscheidung) unabhängig von der Luft zu Boden fallen kann. Wasserdampf ist unsichtbar. Entsprechend müssen Wolken aus flüssigem Wasser bestehen. Zudem werden wichtige Voraussetzungen geschaffen, um Phänomene wie Verdunstungskälte oder Kondensationswärme, trocken- und feuchtadiabatische Prozesse zu verstehen.

#### **5) Wasser in der Atmosphäre – Wolken und Regentstehung angemessen erfassen!**

- a) **UNZUFRIEDENHEIT:** Um die Eigenschaften von Wolken und die Ursachen von Regen zu verstehen, greifen Lerner auf das Behälter-Schema zurück: Wolken füllen sich mit Wasserdampf [sic!] und Regen setzt ein, wenn eine bestimmte Menge an Wasserdampf vorhanden ist. Die Widersprüchlichkeiten dieser Vorstellung sollten aufgezeigt werden: Woraus bestehen die Grenzen dieses Wolken-Behälters? Wie erklären sich unterschiedliche Wolkengrößen und wann genau ist der kritische Punkt erreicht, bei dem Regen einsetzt? Warum wird aus Wasserdampf wieder flüssiges Wasser (=Regen)? Wie genau entleert sich die Wolke, etwa durch eine Öffnung, einen Abfluss?

- b) **VERSTÄNDLICHKEIT:** Wissenschaftler verstehen diese Vorgänge mit Hilfe von Teil-Ganzes- und Ziehen- und Drücken-Schemata. Wolken bestehen aus winzigen Tröpfchen flüssigen Wassers. Auf diese wirken Gewichtskraft (Ziehen-Schema) und Auftriebskräfte durch Aufwinde (Drücken-Schema). In der Wolke befinden sich diese Kräfte im Gleichgewicht. Unter bestimmten Bedingungen kommt es jedoch zu einem Zusammenfließen der Tröpfchen, sodass die Gewichtskraft überwiegt und der Tropfen als Regen zu Boden fällt.
- c) **PLAUSIBILITÄT UND FRUCHTBARKEIT:** Die Lerner können so verstehen, warum Wolken aus flüssigem Wasser bestehen können. Zudem lassen sich nun die Bedingungen genau beschreiben, unter denen Regen einsetzt.

### 6) *Solare Strahlungsintensität als Energie pro Fläche angemessen verstehen!*

- a) **UNZUFRIEDENHEIT:** Lerner erklären die höheren Lufttemperaturen in den Tropen mit der Nähe zur Sonne. Diese sei zwischen den Wendekreisen aufgrund der Kugelgestalt der Erde geringer. Weitere Varianten von Vorstellungen, die den Abstand zwischen Erde und Sonne als relevant erachten, konnten identifiziert werden. Hinweise auf die Zeitpunkte von Aphel und Perihel und Veranschaulichungen mit Hilfe von Modellen oder Abbildungen könnten die Vorstellungen in Frage stellen: Wenn der Abstand von Erde und Sonne hier relevant ist, wie kann es dann sein, dass sich die Erde im Januar auf der Nordhalbkugel knapp 5 Millionen Kilometer näher an der Sonne befindet als im Juli? Wieso herrschen auf den Halbkugeln jeweils unterschiedliche Jahreszeiten?
- b) **VERSTÄNDLICHKEIT:** Wissenschaftler verstehen die Intensität solarer Einstrahlung in Abhängigkeit vom Einstrahlungswinkel.

In den Tropen ist dieser mit  $66,5^\circ$  bis  $90^\circ$  am steilsten. Die Vorstellung von Energie pro Fläche in Abhängigkeit vom Einstrahlungswinkel kann mit Hilfe von Modellversuchen veranschaulicht werden: Trifft beispielsweise der Lichtkegel einer Taschenlampe im rechten Winkel auf ein Blatt Papier, erscheint die beschienene Fläche kleiner als bei einem flacheren Winkel. Anhand eines Telluriums könnte die Einstrahlungsintensität in Abhängigkeit von der Jahreszeit dargestellt werden.

- c) **PLAUSIBILITÄT UND FRUCHTBARKEIT:** Mit diesem Ansatz lassen sich die Jahreszeiten, die unabhängig vom Abstand von Erde zu Sonne entstehen, ebenso erklären wie die höhere Erwärmung bodennaher Luft in den Tropen durch terrestrische Wärmestrahlung als Folge der Absorption solarer Strahlung an der Erdoberfläche (s. o.). Durch das Simulieren jahreszeitlicher Veränderungen des Einstrahlungswinkels am Tellurium werden zudem die Grundlagen für ein Verständnis der Verlagerung der Passatzirkulation nach Norden bzw. Süden geschaffen.

### 7) *Den Einfluss der Erdrotation auf sich bewegende Luft angemessen erfassen!*

- a) **UNZUFRIEDENHEIT:** Lerner erklären die Passatwinde als eine Relativbewegung der Luft gegenüber der Erdoberfläche. Rotationsbedingt bewegt sich diese nach Osten. Die Luft als etwas Leichtes unterliege nicht der Schwerkraft und mache eine Scheinbewegung nach Westen. Diese Vorstellung könnte mit einem Hinweis auf die Rotationsgeschwindigkeiten der unterschiedlichen Breitenkreise hinterfragt werden. Sie liegen weit höher als mögliche Windgeschwindigkeiten.
- b) **VERSTÄNDLICHKEIT:** Wissenschaftler gehen davon aus, dass die Passatwinde aufgrund der unterschiedlichen Rota-

tionsgeschwindigkeiten der verschiedenen Breitenkreise abgelenkt werden. Diese werden aufgrund der Kugelgestalt der Erde zum Äquator hin größer, die Passatwinde behalten jedoch trägheitsbedingt ihre ursprüngliche Rotationsgeschwindigkeit bei, sodass sie auf der Nordhalbkugel in Bewegungsrichtung nach rechts und auf der Südhalbkugel in Bewegungsrichtung nach links abgelenkt werden. Zur Veranschaulichung der Coriolisablenkung lassen sich zahlreiche Versuche, Experimente und Animationen (Übersicht in STÖBER 2012, S. 45-87) einsetzen. Nachvollziehbarer wird das Phänomen auch durch Skizzen, auf denen die Erde in Breitenkreise zerlegt ist und die unterschiedlichen Rotationsgeschwindigkeiten gekennzeichnet sind. Die Luft der Atmosphäre unterliegt dabei der Erdanziehungskraft und rotiert entsprechend mit ihr.

- c) **PLAUSIBILITÄT UND FRUCHTBARKEIT:** Warum die Windgeschwindigkeiten der Passatwinde deutlich unter den Rotationsgeschwindigkeiten der Breitenkreise liegen, kann nun erklärt werden. Zudem lassen sich die Ansätze auch auf tropische Wirbelstürme oder beispielsweise auf Phänomene des dynamischen Wettergeschehens in den mittleren Breiten übertragen, da zyklonale oder antizyklonale Drehbewegungen ebenfalls durch die Coriolisablenkung bedingt werden.

**8) Die Passatzirkulation als komplexes System mit Wechselwirkungen angemessen erfassen!**

- a) **UNZUFRIEDENHEIT:** Lerner betrachten die Passatzirkulation als lineares System, bei dem Prozesse zeitlich nacheinander stattfinden. Passatwinde erscheinen als Entitäten, die sich durch einen vermeintlich luftleeren Raum bewegen. Beobachtungen bei Modellversuchen,

bei denen eine thermische Zirkulation mit gefärbtem Wasser in Form von zwei Konvektionszellen erzeugt wird (PERABO 2000, S. 30), stehen im Widerspruch zu diesen Vorstellungen. So könnte sichtbar gemacht werden, dass sich die gesamte Masse in Bewegung befindet und dass sich beispielsweise Divergenz in der Höhe und Konvergenz am Boden gegenseitig bedingen.

- b) **VERSTÄNDLICHKEIT:** Wissenschaftler beschreiben zahlreiche Wechselwirkungen (s. Abb. 1), die im Rahmen der Passatzirkulation stattfinden. So verstärken sich beispielsweise Divergenz in der Höhe und Konvergenz am Boden im Bereich der ITCZ gegenseitig. Feuchta-diabatische Abkühlung aufsteigender Luft im Bereich der ITCZ und trockenadiabatische Erwärmung der Urpasate erzeugen das Phänomen der Passatversion, welches zur Anreicherung der Passatgrundströmung mit Wasserdampf führt und die thermische Konvektion im Bereich der ITCZ verstärkt. Das gesamte System verlagert sich jahreszeitlich nach Norden bzw. Süden, wodurch beispielsweise Regenzeiten in den wechselfeuchten Tropen zustande kommen. Verständlich werden könnten solche komplexen Wechselwirkungen durch dynamische Visualisierungen in Form von Animationen, die es derzeit jedoch leider noch nicht in ausreichender Qualität gibt. Häufig werden schematische Abbildungen eingesetzt, beispielsweise als längenkreisparalleler Querschnitt. Hier ist darauf zu achten, dass Pfeile als Symbole für vorherrschende Windrichtungen Vorstellungen von sich bewegenden Luftkörpern evozieren könnten. Zudem sollten keine statischen Breitengradangaben verwendet werden, sondern dynamische: Im Bereich der ITCZ sollte beispielsweise vom Zenitstand der Sonne gesprochen werden, nicht vom



Äquator, da diese Angabe nur im Frühjahr und Herbst gültig ist. Die jahreszeitliche Verlagerung der Passatzirkulation lässt sich zudem über das Modell der tropischen Wettermaschine (OBERMANN 1999, S. 26 f.) veranschaulichen. Auch bei einer Verschiebung der Wärmequelle im eingangs beschriebenen Versuch kann eine Verlagerung der Konvektionszellen nach zeitlicher Verzögerung beobachtet werden.

- c) **PLAUSIBILITÄT UND FRUCHTBARKEIT:** Mit Hilfe der Vorstellung einer Passatzirkulation als komplexem System verstehen die Lerner, wie sich Luftbewegungen und andere Prozesse gegenseitig bedingen. Das Wissen kann herangezogen werden, um atmosphärische Wechselwirkungen in anderen Kontexten (lokale Windsysteme, dynamisches Wettergeschehen, etc.) besser zu verstehen.

### 9) *Inversionsbedingte Trockenheit in den Tropen angemessen erfassen!*

- a) **UNZUFRIEDENHEIT:** Lerner, die Trockenheit in den Tropen durch einen Wechsel der Windrichtung erklären, gehen davon aus, dass Regenzeiten dann einsetzen, wenn der Wind vom Meer weht. Unzufriedenheit mit dieser Vorstellung könnte durch Raumbeispiele ausgelöst werden, die im Widerspruch hierzu stehen, etwa Inseln im Bereich der trockenen Tropen, die durch eine geringe jährliche Niederschlagssumme gekennzeichnet sind (BASTEN 2012). Andere Lerner gehen davon aus, dass Trockenheit durch Hitze bedingt wird. Je höher also die Lufttemperaturen sind, umso trockener ist der Raum. Hier könnten Klimadiagramme von Stationen aus den immerfeuchten Tropen Unzufriedenheit auslösen.
- b) **VERSTÄNDLICHKEIT:** Wissenschaftler erklären die Trockenheit im Bereich der trockenen- und wechselfeuchten Tropen

durch die Passatinversion, eine Temperaturumkehr, welche aus der Wechselwirkung von feuchtadiabatischer Abkühlung aufsteigender Luft im Bereich der ITCZ und trockenadiabatischer Erwärmung absinkender Urpasate resultiert. Sich erwärmende, bodennahe Luft kann im Bereich der äußeren Tropen nur bis zur Inversionsschicht aufsteigen, sodass eine adiabatische Abkühlung nur begrenzt stattfindet und entsprechend Kondensation und Niederschlag seltener einsetzen.

- c) **PLAUSIBILITÄT UND FRUCHTBARKEIT:** Die geringen Jahresniederschlagssummen auf Inseln im Bereich der trockenen Tropen könnten Lerner damit ebenso erklären, wie die Ursachen von Trockenheit und die Entstehung von Regenzeiten in den wechselfeuchten Tropen. Die Kenntnisse könnten zudem herangezogen werden, um Inversionswetterlagen in anderen Kontexten zu verstehen.

Es wird empfohlen, diese kognitiv ausgerichteten Leitlinien mit einer Metareflexion zu kombinieren (s. Tab. 3). Dabei ist auch zu berücksichtigen, dass Wissenschaftler und Lerner atmosphärische Phänomene und Prozesse aus unterschiedlichen Perspektiven betrachten. Lerner betrachten Wettererscheinungen in ihrem Alltag eher deskriptiv, was darauf zurückgeführt werden könnte, dass die Fragen nach den Ursachen von Bewölkung, Abkühlung etc. irrelevant sind: Das Wetter beeinflusst Aktivitäten, lässt sich jedoch selbst nicht manipulieren. Eigene Wettervorhersagen aufgrund von Beobachtungen sind für Lerner aufgrund der Komplexität des dynamischen Wettergeschehens in den mittleren Breiten kaum möglich. Naturwissenschaftler hingegen betrachten atmosphärische Phänomene und Prozesse kausal-analytisch, um beispielsweise Entwicklungen des fragi-

**Tab.3: Metakognitiv ausgerichtete didaktische Empfehlungen im Überblick**

Didaktische Leitlinie	Begründung
Über die Rolle von Metaphern für das Lernen und Verstehen sprechen!	aus wissenschaftlicher Sicht unangemessener Gebrauch von Metaphern
Über Nichterfahrbarkeit bestimmter Phänomene und Prozesse sprechen!	aus wissenschaftlicher Sicht unangemessene Vergleiche, Analogiebildungen und monokausale Erklärungen
Über die Bedeutung von Erfahrungen für die Entwicklung von Vorstellungen sprechen!	aus wissenschaftlicher Sicht unangemessene Vorstellungen, die jedoch aufgrund von Alltagserfahrungen plausibel erscheinen und historischen wissenschaftlichen Vorstellungen ähneln
Die Rolle von Modellen, ihre Funktionen und ihr Verhältnis zur Wirklichkeit thematisieren!	aus wissenschaftlicher Sicht unangemessene Projektion von Ideen oder Aspekten des dynamischen Wettergeschehens in den gemäßigten Breiten auf die Tropen sowie fehlende Unterscheidung zwischen Modell und Wirklichkeit

len und komplexen globalen atmosphärischen Windsystemen besser vorhersagen zu können, konkrete Anwendungen wie die Ausgestaltung von Flug- oder Schifffahrtsrouten zu optimieren und natürlich auch Wettererscheinungen prognostizieren zu können. Diese unterschiedlichen Perspektiven sollten auf einer Metaebene thematisiert werden. Die Notwendigkeit bzw. der Nutzen einer kausal-analytischen Betrachtung könnte Lernern durch Aufzeigen von Anwendungsbezügen verdeutlicht werden. Im Sinne einer lernprozessanregenden Aufgabenstellung (TULODZIECKI ET AL. 2009, S. 88-107) könnten Lerner zum Beispiel mit einer komplexen Entscheidungsaufgabe konfrontiert werden: Auf welchen tropischen Schifffahrtsrouten und zu welcher Jahreszeit kann ein Containerschiff am effektivsten Hilfssegel zur Treibstoffersparnis einsetzen. So könnte aufgezeigt werden, wie eine kausal-analytische Betrachtung eine raumbezogene Vorhersage vorherrschender Windrichtungen zu bestimmten Zeiten in einem konkreten Anwendungskontext ermöglicht.

### 7 Diskussion und Ausblick

Die Forschungsarbeit beschäftigt sich mit einer didaktischen Rekonstruktion der Passatzirkulation. Hierzu wird zum einen die

wissenschaftliche Perspektive (fachliche Klärung) mit dem Ziel untersucht, für das Verständnis zentrale Konzepte herauszuarbeiten. Zum anderen werden Vorstellungen von Lernern (bisheriger Forschungsstand, qualitative Interviewstudie) erhoben und analysiert, um zentrale Schwierigkeiten zu identifizieren. Aus dem wechselseitigen Vergleich von Lerner- und Wissenschaftlervorstellungen werden didaktische Empfehlungen abgeleitet.

Die Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens hat sich hierbei als gewinnbringend erwiesen. So konnten Strukturen von Vorstellungen (basale Logiken), die Lerner bzw. Wissenschaftler nutzen, um atmosphärische Phänomene und Prozesse imaginativ zu verstehen, herausgearbeitet und verglichen werden. Der metaphorische Gebrauch dieser basalen Logiken besitzt dabei eine besondere Qualität, denn der Ursprungsbereich kann direkt verstanden werden. Daher werden diese Strukturen auch im Rahmen der didaktischen Schlussfolgerungen aufgegriffen (s. VERSTÄNDLICHKEIT bei den kognitiv ausgerichteten Empfehlungen). Zudem erwies sich die systematische Metaphernanalyse als ergiebig, da Potenziale und Gefahren, die mit metaphorischem Verstehen einhergehen, analysiert und bei der Formulierung meta-

kognitiv ausgerichteter didaktischer Empfehlungen berücksichtigt werden konnten. In früheren Studien dokumentierte Alltagsvorstellungen wurden im Rahmen der Auswertung der qualitativen Interviewstudie ebenfalls nachgewiesen, beispielsweise die Annahmen, dass Luft durch Aufnahme von Wasserdampf schwerer wird (ARON ET AL. 1994, S. 31) bzw. Wolken aus Wasserdampf bestehen (ASSARÉ, ORION 2005, S. 371; ARON ET AL. 1994, S. 32). Diese Ideen werden im Kontext der Vorstellungstypen 6, 8 und 13 artikuliert. Die Analyse möglicher zugrunde liegender Alltagserfahrungen erwies sich als sinnvoll und ergiebig. So lässt sich im Alltag beobachten, dass beispielsweise leere Gefäße schwerer werden, wenn sie mit Wasser gefüllt werden. Flüssiges Wasser fällt zum Beispiel aus einer Gießkanne zu Boden. Entsprechend schwierig erscheint es Lernern zu glauben, dass Luft durch Aufnahme von Wasserdampf leichter wird bzw. Wolken aus flüssigem Wasser bestehen. Im Rahmen der Auswertung konnten entsprechende metakognitiv ausgerichtete Leitlinien zur Reflektion von Alltagserfahrungen und ihrer Bedeutung für

das Lernen entwickelt werden.

In Hinblick auf das Spiralcurriculum könnten sich weiterführende Forschungsarbeiten mit der Entwicklung von Vorstellungen in Abhängigkeit vom Alter befassen. Hierzu könnten Vorstellungen von Lernern der unteren Sekundarstufe I erhoben und mit den Befunden dieser Arbeit verglichen werden. Welche Vorstellungen haben Lerner zum dynamischen Wettergeschehen in unseren Breiten bzw. zur globalen atmosphärischen Zirkulation? Solche komplexen Themen lassen sich nun besser erforschen, da mit dieser Arbeit wichtige grundlegende Alltagsvorstellungen zu Himmelsmechanik oder zu den Ursachen und Folgen horizontaler und vertikaler Luftbewegungen erhoben und analysiert werden konnten. Ein Blick in aktuelle Schulbücher zeigt, dass dort zahlreiche Abbildungen und Metaphern vorzufinden sind, die aus wissenschaftlicher Sicht unangemessene Vorstellungen evozieren könnten. Forschungsprojekte könnten sich entsprechend mit einer systematischen Schulbuchanalyse befassen und die Ergebnisse dieses Projektes zur Validierung nutzen.

## Literatur

- ARON, R. (1994): Atmospheric misconceptions. In: *The science teacher* 61, Heft 1, S. 31-33.
- BACON, F. (1622): *Historia naturalis et experimentalis ad condendam philosophiam*. Reprint in Auszügen in: G. HELLMANN: Neudrucke von Schriften und Karten über die Meteorologie, Bd. 6, 1896, S. 10. Deutsche Übersetzung (mit Kürzungen) in: SCHNEIDER-CARIUS, K. (1955): *Wetterkunde, Wetterforschung. Geschichte ihrer Probleme und Erkenntnisse in Dokumenten aus drei Jahrtausenden*. München, S. 56-57.
- BASTEN, T. (2012): *Ascension-Inland – rätselhafte Trockenheit. Eine Lernaufgabe zur Ursache von Trockenheit unter Berücksichtigung lebensweltlicher Vorstellungen*. In: *Geographie und Schule* 34, Heft 198, S.I-IV.
- BASTEN, T. (2013): *Klimageographische Inhalte des Geographieunterrichts erfahrungsbasiert verstehen – eine didaktische Rekonstruktion der Passatzirkulation*. Hannover. (Diss.)
- BOHNSACK, R. (2010): *Rekonstruktive Sozialforschung. Einführung in qualitative Methoden*. Opladen.
- CARAVITA, S., HALLDÉN, O. (1994): Ref-

- raising the problem of conceptual change. In: Learning and instruction, Heft 4, S. 89-111.
- CHI, M. (2008): Three types of conceptual change: belief revision, mental model transformation, and categorical shift. In: S. VOSNIADOU (HRSG.): International handbook of research on conceptual change. New York, S. 61-82.
- DOVE, J. (1998): Alternative conceptions about the weather. In: School science review 79, Heft 289, S. 65-69.
- DUIT, R., TREAGUST, D. (1998): Learning in Science - from behaviourism towards social constructivism and beyond. In: FRASER, B., TOBIN, K. (HRSG.): International Handbook of science education. Dordrecht, S. 3-26.
- GALILEI, G. (1632): Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo (dt.: Dialog über die beiden hauptsächlichsten Welt-systeme, das ptolemaische und das copernicanische). Reprint in Auszügen in: HELLMANN, G. (HRSG.) (1896): Neudrucke von Schriften und Karten über die Meteorologie, Bd. 6, S. 10 f., deutsche Übersetzung (mit Kürzungen) in: SCHNEIDER-CARIUS, K. (1955): Wetterkunde, Wetterforschung. Geschichte ihrer Probleme und Erkenntnisse in Dokumenten aus drei Jahrtausenden. München, S. 57-58.
- GROPENGIESSER, H. (2007): Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens. In: KRÜGER, D., VOGT, H. (HRSG.): Theorien in der biologiedidaktischen Forschung. Berlin, S. 105-116.
- GROPENGIESSER, H. (2008): Qualitative Inhaltsanalyse in der fachdidaktischen Lehr-Lernforschung. In: MAYRING, P., GLAESER-ZIKUDA, M. (HRSG.): Die Praxis der Qualitativen Inhaltsanalyse. Weinheim, S. 172-189.
- HÄCKEL, H. (2012): Meteorologie. Stuttgart.
- HADLEY, G. (1735): Concerning the cause of the trade winds. In: Philosophical Transactions of the Royal Society 19, S. 58-62. - Reprint in: HELLMANN, G. (HRSG.) (1896): Neudrucke von Schriften und Karten über die Meteorologie, Bd. 6, S. 17-21.
- HALLDÉN, O., SCHEJA, M., HAGLUND, L. (2008): The contextuality of knowledge: an intentional approach to meaning, making and conceptual change. In: VOSNIADOU, S. (HRSG.): International handbook of research on conceptual change. New York, S. 509-532.
- HALLEY, E. (1686): An historical account of the trade winds, and monsoons, observable in the seas between and near the tropicks, with an attempt to assign the physical cause of the said winds. In: Philosophical Transactions of the Royal Society 16, S. 153-168 -gekürzt in: HELLMANN, G. (HRSG.) (1896): Neudrucke von Schriften und Karten über die Meteorologie, Bd.6. Berlin, S. 13.
- HOPF, C. (2012): Qualitative Interviews. In: FLICK, U., KARDORFF, E., STEINKE, I. (HRSG.): Qualitative Forschung. Ein Handbuch. Reinbek, S. 349-359.
- JOHNSON, M. (1987): The body in the mind. The bodily basis of meaning, grammar, evolution. Oxford.
- KATTMANN, U., DUIT, R., GROPENGIESSER, H., KOMOREK, M. (1997): Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion - Ein Rahmen für naturwissenschaftsdidaktische Forschung und Entwicklung. In: Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften 3, Heft 3, S. 3-18.
- KOVECSES, Z. (1986): Metaphors of anger, pride, and love. Amsterdam.
- LAKOFF, G. (1987): Women, fire and dangerous things. What categories reveal about the mind. Chicago.
- LAKOFF, G., JOHNSON, M. (2008): Leben in Metaphern. Heidelberg.
- MAYRING, P. (2008): Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken. Weinheim.

- MINISTERIUM FÜR BILDUNG, WISSENSCHAFT, JUGEND UND KULTUR RHEINLAND-PFALZ (MBWJK) (HRSG.) (2011): Lehrplananpassung. Gesellschaftliches Aufgabenfeld. Jahrgangsstufen 11 bis 13 der gymnasialen Oberstufe. Mainz.
- NIEBERT, K., MARSCH, S., TREAGUST, D. (2012): Understanding Needs Embodiment: A Theory-Guided Reanalysis of the Role of Metaphors and Analogies in Understanding Science. In: Science Education 96, Heft 5, S. 849-877.
- OBERMANN, H. (1999): Wetter – ein zentrales Thema im Unterricht. In: Praxis Geographie 29, Heft 4, S. 4.
- PERABO, M. (2000): Das Land-Seewind-System, ein Modellexperiment. In: Praxis Geographie 30, Heft 9, S. 30.
- POSNER, G., STRIKE, K., HEWSON, P., GERTZOG, W. (1982): Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. In: Science Education 66, Heft 2, S. 211-227.
- RIEMEIER, T. (2007): Moderater Konstruktivismus. In: KRÜGER, D., VOGT, H. (HRSG.): Theorien in der biologiedidaktischen Forschung. Berlin, S. 69-79.
- SCHMITT, R. (2005): Systematic metaphor analysis as a method of qualitative research. In: The qualitative report 10, Heft 2, S. 358-394.
- STOBER, M. (2012): Rahmenkriterien für die didaktische Umsetzbarkeit von Modellen und Modell-Experimenten im Geographieunterricht. München.
- STRAHLER, A., STRAHLER, A. (2009): Physische Geographie. Stuttgart.
- THEISSEN, U. (2003): Experimente zum Thema Luft. In: Geographie heute 24, Heft 208, S. 8-13.
- TULODZIECKI, G., HERZIG, B., BLÖMEKE, S. (2009): Gestaltung von Unterricht. Bad Heilbrunn.
- VOSNIADOU, S. (2008): Conceptual change research: an introduction. In: VOSNIADOU, S. (HRSG.): International handbook of research on conceptual change. New York, S. 13-28.
- WEISCHET, W., ENDLICHER, W. (2008): Einführung in die Allgemeine Klimatologie. Stuttgart.
- WILDGEN, W. (2008): Kognitive Grammatik. Berlin.

**Autor:****Dr. Thomas Basten**

Geographisches Institut

Johannes Gutenberg-Universität Mainz

t.basten@geo.uni-mainz.de