

Klimageographische Inhalte des Geographieunterrichts erfahrungsbasiert  
verstehen – eine didaktische Rekonstruktion der Passatzirkulation

Von der Naturwissenschaftlichen Fakultät  
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover  
zur Erlangung des Grades  
Doktor der Naturwissenschaften  
Dr. rer. nat.  
genehmigte Dissertation  
von  
Thomas Basten

geboren am 19.05.1981 in Trier

2013

**Referentin:** Prof. Dr. phil. Christiane Meyer (Universität Hannover, Naturwissenschaftliche Fakultät, Institut für Didaktik der Naturwissenschaften, Fachgebiet Geographiedidaktik)

**Korreferent:** Prof. Dr. rer. nat. Volker Wilhelmi (Universität Mainz, Geographisches Institut, Fachdidaktik Geographie)

**Tag der Promotion:** 12.03.13

## Zusammenfassung

Die Passatzirkulation spielt als Gegenstand des Geographieunterrichts eine wichtige Rolle. Mit ihr lassen sich die klimatischen Bedingungen der extremen Naturräume der Tropen erklären. Zudem können transferfähige modellhafte Vorstellungen zu Windentstehung, Coriolisablenkung, adiabatischen Prozessen, etc. am Beispiel der Passatzirkulation erarbeitet werden. Doch wie lassen sich atmosphärische Phänomene und Prozesse gedanklich strukturieren? Die Arbeit setzt es sich zum Ziel, in Anlehnung an das Modell der didaktischen Rekonstruktion (KATTMANN 2007, 93ff.) Lerner- und Wissenschaftlervorstellungen miteinander zu vergleichen und Verfahren des Verstehens durch Metaphern und *kinesthetic image schemes* (LAKOFF 1987, 271ff.) herauszuarbeiten, um unter Berücksichtigung der Erkenntnisse der didaktischen Vorstellungsforschung Vermittlungsstrategien für klimageographische Inhalte des Geographieunterrichts am Beispiel der Passatzirkulation zu entwickeln. Nach konstruktivistischer Auffassung gehen Lernprozesse vom lernenden Subjekt aus, dessen Wahrnehmung und Welterschließung auf seinem Vorwissen basieren (RIEMEIER 2007, 69ff.; REINFRIED 2007, 19ff.). Die *Conceptual-Change-Forschung* hat herausgearbeitet, dass Alltagsvorstellungen, also Vorstellungen, die Lernende im Alltag entwickeln und die häufig aus wissenschaftlicher Sicht unangemessen erscheinen, in Vermittlungssituationen besonders resistent sind (KRÜGER 2007, 81ff.). Im Bereich von Alltagsvorstellungen zu atmosphärischen Phänomenen und Prozessen besteht derzeit ein Forschungsdesiderat. Im Rahmen dieser Arbeit sollen Empfehlungen zur Gestaltung von Lernumgebungen gemacht werden, die es Lernenden ermöglichen, sich ihrer Alltagsvorstellungen zur Passatzirkulation bewusst zu werden und diese zu überprüfen und weiterentwickeln zu können.

Das Erfassen der Wissenschaftlerperspektive erfolgt anhand von aktuellen und historischen Schriften. Diese werden mittels qualitativer Inhaltsanalyse (MAYRING 2008; GROPENIEBER 2008, 172ff.) unter Berücksichtigung der systematischen Metaphernanalyse (SCHMITT 2005, 358ff.) und der Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens (GROPENIEBER 2007, 105ff.) ausgewertet. Mit Hilfe dieses Analyseinstrumentes werden auch Lernervorstellungen aus 23 bisherigen empirischen Arbeiten zur Passatzirkulation oder verwandten Themen reinterpretiert. Zudem werden im Rahmen einer qualitativen Interviewstudie (n=30, 18w, 12m) mit Schülerinnen und Schülern der Jahrgangsstufe 10 verschiedener Gymnasien Vorstellungen zur Passatzirkulation erhoben und ausgewertet.

Insgesamt können 38 Vorstellungstypen von Lernern zur Passatzirkulation rekonstruiert werden. Es werden kognitiv (POSNER ET AL. 1982, 211ff.) und metakognitiv (CHI 2008, 61ff.; HALLDÉN ET AL. 2008, 509ff.; VOSNIADOU 2008, 3ff.) ausgerichtete didaktische Empfehlungen entwickelt und in Form von Bausteinen zur konkreten Ausgestaltung von Lernumgebungen konkretisiert.

## **Abstract**

An important topic of geography education is the trade wind system. It can be used to explain the climatic conditions of the tropic's landscapes. In addition the trade wind system offers an excellent opportunity for developing exemplary and transferable ideas with respect to the cause of wind, coriolis deflection, adiabatic processes, etc. But how can atmospheric phenomena and processes be imagined? The aim of this dissertation is - following the guidelines of didactic reconstruction (KATTMANN 2007, 93ff.) - to compare scientist's and learner's ideas, to analyse the way of understanding phenomena and processes with the help of metaphors and kinesthetic image schemes (LAKOFF 1987, 271ff.), and – taking into account the insights derived from didactic research on every day ideas– to develop learning strategies for climate geography contents of geography education using the example of the trade wind system. According to the constructivist concept the learning process takes place in the learner, whose perception and understanding of the world is based upon his previous knowledge (RIEMEIER 2007, 69ff.; REINFRIED 2007, 19ff.). Research on conceptual change has shown that this previous knowledge, which is influenced by everyday experiences and which may be inadequate or false from a scientific point of view, is particularly resistant to change in a new learning situation (KRÜGER 2007, 81ff.). There is a desideratum of research on every day ideas on atmospheric phenomena and processes. Didactical suggestions for learning situations will be formulated, in which learners will become aware of their every day ideas on trade wind system and will be able to test and to develop them.

Current and historical documents serve as a basis for analysing the scientific perspective. For this purpose the qualitative content analysis (MAYRING 2008; GROPENIEBER 2008, 172ff.) is used, taking the metaphor analysis (SCHMITT 2005, 358ff.) and the theory of experience-based understanding (GROPENIEBER 2007, 105ff.) into account. In addition with the aid of this analysis tool the learners' conception of the trade winds or related topics in 23 previous empirical studies has been reinterpreted. Moreover the learners' views on 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 analysed.

A total of 38 different types of everyday ideas on the trade wind system could be reconstructed. Cognitive- (POSNER ET AL. 1982, 211ff.) and metacognitive-oriented (CHI 2008, 61ff.; HALLDÉN ET AL. 2008, 509ff.; VOSNIADOU 2008, 3ff.) guidelines were developed and implemented as modules for learning situations.

## **Schlagworte zum Inhalt**

*Passatzirkulation,  
erfahrungsbasiertes Verstehen,  
didaktische Rekonstruktion*

*trade wind system,  
embodied cognition,  
didactic reconstruction*

## Inhalt

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b> .....	5
<b>2</b>	<b>THEORETISCHER RAHMEN</b> .....	8
2.1	Zum Begriff Vorstellung .....	8
2.2	Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens .....	9
2.3	Alltagsvorstellungen vs. wissenschaftliche Vorstellungen .....	14
2.4	(Meta-)theoretische Grundlagen didaktischer Vorstellungsforschung und konkrete Empfehlungen zur Unterrichtsgestaltung .....	17
2.5	Zusammenfassung .....	21
<b>3</b>	<b>FORSCHUNGSHINTERGRUND UND -FRAGEN</b> .....	23
3.1	Die Passatzirkulation als Gegenstand des Geographieunterrichts.....	23
3.2	Einflussfaktoren auf die Vorstellungsentwicklung zur Passatzirkulation .....	26
3.3	Konsequenzen in Hinblick auf das Forschungsvorhaben und konkrete Fragestellungen .....	30
3.4	Zusammenfassung .....	32
<b>4</b>	<b>FORSCHUNGSDESIGN UND –METHODIK</b> .....	34
4.1	Das Modell der didaktischen Rekonstruktion als Forschungsdesign .....	34
4.2	Qualitatives, leitfadengestütztes Interview als Erhebungsinstrument .....	36
4.3	Qualitative Inhaltsanalyse unter Berücksichtigung der systematischen Metaphernanalyse und der Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens als Analyseinstrument .....	38
4.4	Zusammenfassung .....	40
<b>5</b>	<b>FACHLICHE KLÄRUNG</b> .....	42
5.1	Historische wissenschaftliche Vorstellungen zur Passatzirkulation .....	42
5.1.1	<i>Tropische Ostwinde aufgrund sich drehender Himmelsphären</i> .....	42
5.1.2	<i>Tropische Ostwinde als Zurückbleiben einer trägen Atmosphäre gegenüber der rotationsbedingten Bewegung der Erdoberfläche</i> .....	44
5.1.3	<i>Thermische Verhältnisse verursachen eine Zirkulation - tropische Nordost- und Südostwinde als Resultat des Tagesganges der Sonne</i> .....	46
5.1.4	<i>Unterschiedliche Rotationsgeschwindigkeiten der verschiedenen geographischen Breiten als Erklärung der tropischen Nordost- bzw. Südostwinde</i> .....	48
5.2	Aktuelle wissenschaftliche Vorstellungen zur Passatzirkulation.....	50
5.2.1	<i>Geordnete Wissenschaftleraussagen</i> .....	50
5.2.2	<i>Explikation der Wissenschaftleraussagen</i> .....	55
5.2.2.1	Aussagen zu Himmelsmechanik und elektromagnetischer Strahlung .....	56
5.2.2.2	Aussagen zu Luftdichte, -temperatur und -druck.....	60
5.2.2.3	Aussagen zu Verdunstung, Kondensation und Niederschlag .....	63

5.2.2.4	Aussagen zum Aufbau der Atmosphäre und zu vertikalen Luftbewegungen .....	66
5.2.2.5	Aussagen zu horizontalen Luftbewegungen und zur Coriolisablenkung .....	69
5.2.3	<i>Strukturierung der Wissenschaftlernaussagen</i> .....	71
5.2.3.1	Aufwinde im Bereich der ITCZ .....	71
5.2.3.2	Antipassate .....	73
5.2.3.3	Urpasate .....	74
5.2.3.4	Passate .....	74
5.2.3.5	Trockene, wechselfeuchte und immerfeuchte Tropen .....	75
5.3	Zusammenfassung .....	75
<b>6</b>	<b>UNTERSUCHUNG BISHERIGER EMPIRISCHER ARBEITEN ZU ALLTAGSVORSTELLUNGEN</b> .....	<b>80</b>
6.1	Vorstellungen zu Wärme und elektromagnetischer Strahlung .....	82
6.2	Vorstellungen zur Himmelsmechanik .....	83
6.3	Vorstellungen zu Luft .....	84
6.4	Vorstellungen zu Wasser in der Atmosphäre .....	85
6.5	Vorstellungen zu adiabatischen Prozessen .....	86
6.6	Vorstellungen zur Windentstehung .....	87
6.7	Modellbildung und systemisches Denken .....	88
6.8	Zusammenfassung .....	89
<b>7</b>	<b>VORSTELLUNGEN VON SCHÜLERINNEN UND SCHÜLERN ZUR PASSATZIRKULATION</b> .....	<b>91</b>
7.1	Aussagen zu Aufwinden .....	96
7.1.1	<i>Luft steigt unter der Bedingung auf, dass sie warm ist</i> .....	96
7.1.2	<i>Luft steigt unter der Bedingung auf, dass sie wärmer oder leichter als etwas ist</i> .....	98
7.1.3	<i>Luft steigt unter der Bedingung auf, dass etwas anderes sie dazu bringt</i> .....	99
7.1.4	<i>Aufsteigende Luft kühlt ab – Ursachen</i> .....	100
7.1.5	<i>Aufsteigende Luft wird schwerer – Ursachen</i> .....	104
7.1.6	<i>Aufsteigende Luft wird leichter – Ursachen</i> .....	105
7.1.7	<i>Luft steigt auf, solange bestimmte Bedingungen gegeben sind</i> .....	106
7.1.8	<i>Luft steigt bis zu den Wolken oder bis es regnet auf</i> .....	108
7.1.9	<i>Luft steigt bis zu sonstigen Grenzen auf oder bis sie Hindernisse überquert hat</i> .....	109
7.1.10	<i>Fazit: Strukturierte Aussagen zu Aufwinden</i> .....	111
7.2	Aussagen zu Aufwinden in den Tropen .....	115
7.2.1	<i>Die Luft in den Tropen ist wärmer – Ursachen</i> .....	115
7.2.2	<i>Die Luft in den Tropen ist wärmer – Folgen</i> .....	117
7.2.3	<i>Die Luft in den Tropen enthält mehr Wasserdampf – Ursachen</i> .....	119

7.2.4	<i>Die Luft in den Tropen enthält mehr Wasserdampf – Folgen</i> .....	121
7.2.5	<i>Fazit: Strukturierte Aussagen zu Aufwinden in den Tropen</i> .....	124
7.3	<i>Aussagen zu Windentstehung</i> .....	127
7.3.1	<i>Wind entsteht durch ein Aufeinandertreffen</i> .....	127
7.3.2	<i>Wind entsteht als Folge eines Ausgleichs</i> .....	128
7.3.3	<i>Wind entsteht aufgrund eines Drückens oder aufgrund von Stößen</i> .....	130
7.3.4	<i>Fazit: Strukturierte Aussagen zu Windentstehung</i> .....	131
7.4	<i>Aussagen zum Antipassat</i> .....	133
7.4.1	<i>Die aufgestiegene Luft sinkt vor Ort wieder ab</i> .....	133
7.4.2	<i>Die aufgestiegene Luft sinkt allmählich, nach polwärtiger Bewegung wieder ab</i> .....	134
7.4.3	<i>Die aufgestiegene Luft weht als Wind auf gleichbleibender Höhe</i> .....	134
7.4.4	<i>Die sich in der Höhe bewegende Luft ändert ihre Richtung, weil sie auf etwas stößt oder von etwas angezogen wird</i> .....	135
7.4.5	<i>Die sich in der Höhe bewegende Luft ändert ihre Richtung aufgrund der Erdrotation</i> .....	136
7.4.6	<i>Fazit: Strukturierte Aussagen zum Antipassat</i> .....	138
7.5	<i>Aussagen zum Urpassat</i> .....	140
7.5.1	<i>Luft sinkt ab unter der Bedingung, dass sie kalt oder schwer ist</i> .....	140
7.5.2	<i>Luft sinkt ab unter der Bedingung, dass sie schwerer oder kälter als etwas ist</i> .....	141
7.5.3	<i>Luft sinkt aus sonstigen Gründen ab</i> .....	143
7.5.4	<i>Die absinkende Luft erwärmt sich – Ursachen</i> .....	144
7.5.5	<i>Die absinkende Luft erwärmt sich – Folgen</i> .....	146
7.5.6	<i>Die absinkende Luft erwärmt sich nicht – Ursachen</i> .....	147
7.5.7	<i>Die Luft sinkt bis zum Boden ab</i> .....	148
7.5.8	<i>Luft sinkt nur bis zu einer bestimmten Höhe ab</i> .....	149
7.5.9	<i>Fazit: Strukturierte Aussagen zum Urpassat</i> .....	150
7.6	<i>Aussagen zur Passatzirkulation</i> .....	155
7.6.1	<i>Ursachen und Folgen ohne Wechselwirkungen</i> .....	155
7.6.2	<i>Die Passatzirkulation als lineares System</i> .....	157
7.6.3	<i>Die Passatzirkulation als komplexes System mit Wechselwirkungen</i> .....	158
7.6.4	<i>Der Passatwind ändert seine Richtung aufgrund der Erdrotation</i> .....	162
7.6.5	<i>Der Passatwind ändert seine Richtung aufgrund von Zusammenstößen</i> .....	162
7.6.6	<i>Fazit: Strukturierte Aussagen zur Passatzirkulation</i> .....	164
7.7	<i>Aussagen zu Regenzeiten in den wechselfeuchten Tropen</i> .....	168

7.7.1	<i>Regenzeiten entstehen durch einen Wechsel der Windrichtung</i> .....	168
7.7.2	<i>Regenzeiten entstehen aufgrund eines sich ändernden Abstands zwischen Erde und Sonne</i> .....	169
7.7.3	<i>Regenzeiten entstehen aufgrund eines sich ändernden Einstrahlungswinkels der Sonne</i> .....	170
7.7.4	<i>Regenzeiten entstehen, weil sich etwas füllt oder anstaut</i> .....	170
7.7.5	<i>Fazit: Strukturierte Aussagen zur Entstehung von Regenzeiten in den wechselfeuchten Tropen</i> .....	172
7.8	Zusammenfassung .....	173
<b>8</b>	<b>DIDAKTISCHE STRUKTURIERUNG</b> .....	<b>179</b>
8.1	Kognitiv ausgerichtete didaktische Empfehlungen .....	179
8.2	Metakognitiv ausgerichtete didaktische Empfehlungen .....	189
8.3	Soziale und affektive Faktoren und didaktische Empfehlungen .....	192
8.4	Konkretisierung der didaktischen Empfehlungen .....	193
8.5	Zusammenfassung .....	201
<b>9</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE, DISKUSSION UND AUSBLICK</b> .....	<b>204</b>
9.1	Ergebnisse der fachlichen Klärung .....	204
9.2	Ergebnisse des Erfassens der Lernerperspektiven .....	210
9.3	Ergebnisse der didaktischen Strukturierung .....	218
9.4	Ausblick .....	227
	<b>Literatur</b> .....	<b>229</b>
	<b>Anhang</b> .....	<b>i</b>

## 1 Einleitung

*„In dem wunderbaren Organismus, in dem ewigen Treiben und Wirken der lebendigen Kräfte führt allerdings jedes tiefere Forschen an den Eingang neuer Labyrinthe. Aber gerade diese Mannigfaltigkeit unbetretener, vielverschlungener Wege erregt auf allen Stufen des Wissens freudiges Erstaunen. Jedes Naturgesetz, das sich dem Beobachter offenbart, läßt auf ein höheres, noch unerkanntes schließen; denn die Natur ist (...) ,das ewig Wachsende, ewig im Bilden und Entfalten Begriffene“ (HUMBOLDT 1845, 18).*

Wissenschaftliche Vorstellungen zu atmosphärischen Vorgängen beruhen auf einem langen Forschungsprozess, geprägt durch unterschiedlichste Positionen und Ansichten von Wissenschaftlern<sup>1</sup>. Aufgrund technischer Hilfsmittel konnten Wissenschaftler Erkenntnisse über den Mikro- und Makrokosmos gewinnen und dadurch Vorstellungen über Luft und Atmosphäre sukzessive entwickeln. Heutige wissenschaftliche Vorstellungen über Luft und Windsysteme sind das Ergebnis eines Aushandlungsprozesses von Wissenschaftlergemeinschaften über Generationen und Jahrhunderte hinweg. Das Modell der Allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre gilt heute allgemein als anerkannt. Es handelt sich hierbei um eine schematisch vereinfachte, kausal-analytische Betrachtung global vorherrschender Windrichtungen. Die Vorstellung einer Passatzirkulation<sup>2</sup> als Teil dieses Modells ziehen Wissenschaftler aus der Klimageographie beispielsweise heran, um die Tropen in ihren Eigenschaften als trockene, wechselfeuchte oder immerfeuchte Zonen zu verstehen. Luft und Windsysteme prägen nach wissenschaftlichen Vorstellungen den Naturraum. Doch wie lassen diese sich gedanklich fassen? Luft oder auch Wasserdampf sind unsichtbar und doch irgendwie allgegenwärtig. Es gibt keinen Ort, an dem man nicht von Luft oder Wasserdampf umgeben wäre. Dennoch spielen sie im Alltag kaum eine Rolle. Obgleich Sie beispielsweise als Leser gerade von Luft und Wasserdampf umgeben sind, nehmen Sie dies nicht bewusst wahr und denken nicht weiter über deren Bedeutung nach. Entsprechend fällt es Schülerinnen und Schüler häufig schwer, sich Luft und ihre Bewegungen vorzustellen. Wissenschaftler verstehen atmosphärische Prozesse mit Hilfe von Metaphern. Sie übertragen basale Logiken oder erfahrbare Quellbereiche auf abstrakte, unbekannte Zielbereiche. Luft wird beispielsweise je nach Kontext metaphorisch als fließendes Wasser charakterisiert oder als kompakter Behälter beschrieben. Auch Lerner greifen auf Metaphern zurück, um ihre Ideen zu veranschaulichen. Sie nutzen zudem zahlreiche Vergleiche und schlussfolgern

---

<sup>1</sup> Wenn nur die männliche Form verwendet wird, geschieht dies aus Gründen der Lesbarkeit. Die Darstellung umfasst jedoch männliche und weibliche Personen.

<sup>2</sup> Etymologisch lässt sich der Begriff `Passat´ aus dem mittelniederländischen `passaat´ ableiten, was wörtlich etwa `vorübergehen, hingehen´ bedeutet. Die englische Bezeichnung `trade wind´ bedeutet `beständig wehender Wind´ (engl. to blow trade = dt. beständig wehen; nicht zu verwechseln mit engl. trade = dt. Handel) (KLUGE 1999, 615).

aufgrund von Alltagserfahrungen. Die Arbeit macht es sich zum Ziel, diese Verfahren des Verstehens von Wissenschaftlern und Lernern systematisch herauszuarbeiten, miteinander zu vergleichen und hieran didaktische Überlegungen anzuschließen.

Der theoretische Rahmen wird in **Kapitel 2** dargestellt. Es beginnt mit einer kritischen Auseinandersetzung mit dem Begriff Vorstellung, bei der aufgezeigt wird, welche Schwierigkeiten mit dem Erfassen der gedanklichen Ebene verbunden sind. Dass Verstehen auf grundlegenden sensomotorischen Erfahrungen basiert, wird im Rahmen von *Embodied-Cognition*-Ansätzen angenommen. Die Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens stellt eine fachdidaktische Adaption dieser Ansätze dar. Sie wird vorgestellt und diskutiert. Inwiefern unterscheiden sich wissenschaftliche Vorstellungen von Alltagsvorstellungen? Dieser Frage soll ebenfalls in diesem Kapitel nachgegangen werden. Wie zu zeigen sein wird, liegt ein Schlüssel zur Abgrenzung beider Arten von Vorstellungen auf der Metaebene, in der Art und Weise, wie systematisch Annahmen verifiziert oder falsifiziert werden und welchen Stellenwert diese haben. Die Arbeit steht in der Tradition didaktischer Vorstellungsforschung. Daher werden Erkenntnisse dieser Forschungsrichtung dargestellt. Forschungshintergrund und Forschungsfragen dieser Arbeit sind Gegenstand von **Kapitel 3**. Hierzu wird zunächst untersucht, welche Rolle die Passatzirkulation im Geographieunterricht spielt, d.h. in welchen Kontexten und Jahrgangsstufen sie auftaucht und welche Vorgaben durch Lehrpläne oder Bildungsstandards gemacht werden. Anschließend werden Einflussfaktoren auf die Vorstellungsentwicklung zur Passatzirkulation beschrieben. Hierzu werden Ergebnisse verschiedener Studien zu Interessen von Schülerinnen und Schülern vorgestellt sowie Möglichkeiten, die Passatzirkulation interessenorientiert zu thematisieren, diskutiert. Auch der Einfluss kognitiver und metakognitiver Fähigkeiten wird kritisch reflektiert. Abschließend werden vor diesem Hintergrund die konkreten Fragestellungen entwickelt. In **Kapitel 4** wird das Forschungsdesign vorgestellt. Die Entscheidung für eine qualitative Forschungsmethodik wird begründet. Zudem werden Gütekriterien, die bei der Auswahl von Texten oder Interviewteilnehmern, bei der Erhebung und Auswertung beachtet wurden, ausführlich dargestellt. Die Arbeit orientiert sich am Modell der didaktischen Rekonstruktion. In einem iterativen, rekursiven Verfahren sollen aus dem Vergleich von Lerner- und Wissenschaftlerpositionen didaktische Überlegungen entwickelt werden. Das qualitative, leitfadengestützte Interview als Erhebungsinstrument wird ebenso vorgestellt wie das Analyseinstrument: die qualitative Inhaltsanalyse unter Berücksichtigung der systematischen Metaphernanalyse und der Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens. Zu berücksichtigende Gütekriterien werden ebenfalls reflektiert. **Kapitel 5** enthält die Ergebnisse der fachlichen Klärung. Im Rahmen dieser Untersuchungsaufgabe werden zunächst historische Quellentexte analysiert. Die herauszuarbeitenden Vorstellungen ähneln häufig Alltagsvorstellungen, da in beiden Fällen Mikro- und Makrokosmos aufgrund fehlender technischer Hilfsmittel kaum zugänglich waren bzw. sind.

Zudem zeigt die Untersuchung auf, in welchen Kontexten wissenschaftliche Vorstellungen entstanden sind und wie sie sich entwickelt haben. Um aktuelle wissenschaftliche Vorstellungen zu erfassen, werden Lehrbücher aus drei Disziplinen untersucht: der Klimageographie, der Klimatologie und der Meteorologie. Welche Vorstellungen von Schülerinnen und Schülern zur Passatzirkulation oder verwandten Themen bisher erhoben wurden, soll **Kapitel 6** klären. Die Ergebnisse bisheriger empirischer Forschung werden dargestellt und vor dem theoretischen Hintergrund und den Zielsetzungen dieser Arbeit reflektiert. Auch Vorstellungen zu Modellbildung und Systemen werden diskutiert. **Kapitel 7** enthält die Ergebnisse der Interviewstudie mit insgesamt 30 Schülerinnen und Schülern der Jahrgangsstufe 10 verschiedener Gymnasien in Landau in der Pfalz. Der Interviewleitfaden wird vorgestellt und begründet. Die Darstellung von Vorstellungen erfolgt exemplarisch. Eine komplette Auflistung aller erhobenen Aussagen findet sich im Anhang. In **Kapitel 8** werden die didaktischen Überlegungen dargestellt, die sich aus dem wechselseitigen Vergleich von Lerner- und Wissenschaftlerpositionen ergeben. Ziel ist die Entwicklung und Begründung didaktischer Empfehlungen. Die in Kapitel 2 herausgearbeiteten Erkenntnisse didaktischer Vorstellungsforschung werden hierbei ebenfalls berücksichtigt. In **Kapitel 9** enthält eine abschließende Reflexion des Forschungsvorhabens. Die gewonnenen Erkenntnisse werden zusammengefasst, diskutiert und weiterführende Fragestellungen reflektiert.

## 2 Theoretischer Rahmen

### 2.1 Zum Begriff Vorstellung

Die kognitive Linguistik beschäftigt sich mit dem Zusammenhang von Vorstellungen und Sprache. Der Begriff Vorstellung wird definiert als gedankliche Referenz zu einem sprachlichen Ausdruck, die diesem vorangegangen ist (WILDGEN 2008, 8ff.; GROPENGLIEßER 2006, 12f.). Die Sprache wiederum beeinflusst aufgrund ihrer Semantik und ihrer Grammatik im konkreten Gebrauch die gedankliche Ebene. Der konkrete Gebrauch der Sprache ist abhängig von der natürlichen und sozialen Umwelt des Individuums. Vorstellungen sind also ein Produkt der Sprache und gleichzeitig bietet die sprachliche Äußerung die Möglichkeit, Vorstellungen zu untersuchen. Es wäre allerdings eine unzulässige Vereinfachung anzunehmen, Vorstellungen seien lediglich in sprachlicher Form symbolisch-abstrakt vorhanden. Sinneswahrnehmungen führen dazu, dass Vorstellungen auch bildlich-konkret sein können. Sie besitzen ebenso eine affektive wie prozessuale Dimension. Bei Denkvorgängen interagieren diese Bereiche miteinander. Vorstellungen in dieser Ganzheitlichkeit werden auch als mentale Modelle bezeichnet. Sie erlauben eine innere Simulation äußerer Vorgänge (SCHNOTZ 2001, 79; WIETZEL 2007, 221ff.; REINFRIED 2010, 4f.). Wenn also auf der Grundlage sprachlicher Äußerungen Vorstellungen rekonstruiert werden, sollte berücksichtigt werden, dass diese gedanklich vielfältig repräsentierten Informationen zuvor symbolisch-abstrakt codiert wurden. Die eigentliche Vorstellung lässt sich nicht fassen. Ihre Rekonstruktion ist abhängig vom sprachlichen Ausdrucksvermögen des Individuums. In der Vorstellungsforschung greift man daher auch auf Zeichnungen zurück (z.B. GAPP & SCHLEICHER 2010; REINFRIED 2006a), um Vorstellungen in ihrer Bildhaftigkeit untersuchen zu können. Jedoch muss auch hier bedacht werden, dass die bildliche Information keine exakte Kopie der bildhaften Vorstellung darstellt, da sie ebenfalls codiert wird und von den zeichnerischen Fähigkeiten des Individuums abhängig ist.

Eine weitere Schwierigkeit stellt die Arbitrarität des sprachlichen Zeichens in Hinblick auf seinen gedanklichen Referenten dar. So kann der sprachliche Ausdruck `Regen´ beispielsweise unterschiedlichste, subjektive Bedeutungen enthalten. In der Vorstellungsforschung greift man daher auf die Prototypenhypothese zurück (ROSCHE 1978, 35f.; LAKOFF 1987, 44). Hierbei wird angenommen, dass das Bezeichnete bestimmte Eigenschaften aufweist, die sensorisch wahrnehmbar sind und die in allen gedanklichen Varianten im Sinne eines idealen Vertreters vorzufinden sind. So könnte eine Gemeinsamkeit bei der Vorstellung `Regen´ darin bestehen, dass etwas Nasses, Durchsichtiges, Tropfenartiges assoziiert wird. Zudem wird eine kategoriale Zuordnung unterstellt, die ein bestimmtes Weltwissen voraussetzt (LAKOFF 1987, 68f. und 279f.). Der Begriff `Regen´ steht beispielsweise im Kontext von Vorstellungen zum zeitlichen Ablauf eines Regenereignisses, seinen möglichen Folgen oder Ursachen.

In der Vorstellungsforschung werden Komplexitätsebenen von Vorstellungen unterschieden. So wird zwischen Begriffen, Konzepten, Denkfiguren und Theorien unterschieden. Begriffe äußern sich auf der sprachlichen Ebene durch ein einzelnes Wort. Sie bezeichnen im gedanklichen Bereich ein Objekt, eine Sache oder ein Ereignis. Konzepte sind Relationen von mindestens zwei Begriffen. Sie realisieren sich sprachlich auf der Satzebene. Stehen mehrere Konzepte in Relation zueinander, entsteht eine Denkfigur. Eine Kombination von Denkfiguren wird als Theorie bezeichnet (GROPENGLIEBER 2006, 13). Problematisch ist, dass ein sprachlicher Ausdruck wie z.B. 'Regen' nicht nur zwangsläufig eine begriffliche Ebene repräsentiert, sondern durchaus komplexer sein kann. Der einzelne sprachliche Ausdruck ist nur das Resultat einer Codierung vielfältiger, gedanklicher Informationen, deren Komplexität sich nicht fassen lässt. Ob einer Vorstellung letztlich der Status eines Konzeptes, einer Denkfigur oder einer Theorie zukommt, ist also nicht nur von der Menge der sprachlichen Ausdrücke abhängig. Vielmehr wird der Bedeutungsgehalt sprachlicher Äußerungen interpretiert. Aufgrund dieser Schwierigkeiten wird auf eine Differenzierung von Vorstellungen nach Komplexitätsniveaus im Rahmen dieser Arbeit verzichtet. Nicht eine Hierarchisierung von Vorstellungen nach Komplexität steht im Vordergrund, sondern eine möglichst genaue qualitative Beschreibung mentaler Modelle.

## 2.2 Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens

Die Forschungsrichtung der *Embodied Cognition* geht von einem grundlegenden Einfluss der Erfahrungen der Interaktion des eigenen Körpers mit der Umwelt für das Verstehen und Vorstellen aus. Indizien hierfür liefert die Sprache, die im Rahmen dieses kognitionslinguistischen Ansatzes untersucht wird (RICKHEIT 2010, 105ff.). Eine fachdidaktische Adaption stellt die Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens dar (GROPENGLIEBER 2006 und 2007).

Ein wichtiges Element dieser Theorie ist die Metapher. Sie kann definiert werden als eine Übertragung eines Bedeutungsgehaltes von einem konventionellen Quellbereich auf einen neuen, nicht-konventionellen Zielbereich (LAKOFF & JOHNSON 2008, 11ff.). In der Rhetorik wird die Metapher klassischerweise als Stilmittel betrachtet, als eine Substitution mit der Funktion der Verzierung oder Verschönerung. Die Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens steht in der Tradition kognitionslinguistischer Arbeiten und sieht in Metaphern noch mehr: Sie ermöglichen neue Erkenntnisse, indem sie abstrakte, unbekannte Zielbereiche durch konkrete, bekannte Quellbereiche veranschaulichen und damit erst zugänglich machen. Sie strukturieren unser Denken und Handeln, da durch Metaphern bestimmte Aspekte beleuchtet, andere jedoch verdeckt werden. Dieses Phänomen wird als *highlighting* und *hiding* bezeichnet. Wie Menschen Metaphern verstehen, hängt von ihrem Vorwissen und letztlich dem individuellen Prozess der Interpretation des Bedeutungsgehaltes der Metapher ab. So wäre es beispielsweise denkbar, dass Individuen

Metaphern als solche gar nicht erkennen oder zu sehr unterschiedlichen Auslegungen ihrer Bedeutung kommen (LAKOFF & JOHNSON 2008, 15ff.; NIEBERT ET AL. 2012, 849ff.).

Metaphern werden nicht isoliert verwendet, sondern sie stehen in einem Kontext (siehe Abbildung 1). Man spricht von sogenannten metaphorischen Konzepten, die auf der Grundlage verwendeter Metaphern rekonstruiert werden können (GROPENIEßER 2007, 108ff.; LAKOFF & JOHNSON 2008, 18ff.). So findet man in Lehrbüchern z.B. häufig das metaphorische Konzept 'Der Lehr-Lern-Prozess ist Weitergabe' (zu lesen: Zielbereich ist Quellbereich). Dieses manifestiert sich in Metaphern wie 'der Lehrer ist Geber', 'der Lerner ist Nehmer', 'Wissen ist Gabe', etc. Das metaphorische Konzept beleuchtet einerseits bestimmte Aspekte der Beziehung zwischen Lehrer und Lerner. Andererseits wird beispielsweise die Rolle des Vorwissens beim Lernen ausgeblendet. Würde man ausschließlich in diesem metaphorischen Konzept denken, wäre eine konstruktivistische Auffassung des Lernens nicht nachzuvollziehen.



Abbildung 1: Das metaphorische Konzept 'Der Lehr-Lern-Prozess ist Weitergabe' (eigene Darstellung).

Die Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens zeigt auf, dass die ursprünglichen Quellbereiche dieser Metaphern im sinnlich-körperlich Erfahrbaren liegen. Schon von der frühen Kindheit an werden grundlegende Erfahrungen mit der physischen Umwelt gesammelt, die zur Ausbildung bestimmter Schemata, sog. *kinesthetic image schemes*, führen (LAKOFF 1987, 271ff.). Sie ermöglichen ein direktes Verstehen bestimmter Strukturen oder basaler Logiken.

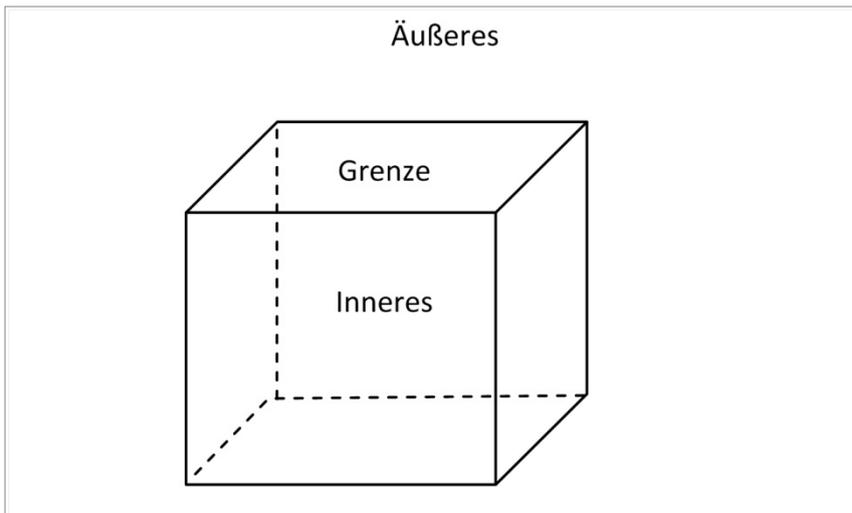


Abbildung 2: Basale Logik des Behälter-Schemas (eigene Darstellung, die äußere Form kann beliebig sein).

So basiert etwa das Behälter-Schema (siehe Abbildung 2) auf der Wahrnehmung des eigenen Körpers als Behälter, der geprägt ist durch ein Inneres, eine Grenze und ein Äußeres (LAKOFF 1987, 272). Gropengießer schlägt hier den Begriff des direkten oder verkörperten Verstehens vor (GROPENGIÉBER 2007, 110ff.). Mit Hilfe dieser basalen Logik wird auch die physische Umwelt erfasst. So erscheinen Gegenstände wie Kannen oder Gefäße ebenso als Behälter wie Zimmer oder Häuser. Das Behälter-Schema kann jedoch auch auf weniger zugängliche Bereiche übertragen werden. So versteht man beispielsweise die Äußerung, dass jemand die Gruppe verlassen muss, weil das Behälter-Schema (Inneres-Grenze-Äußeres) auf die Gruppe übertragen wird. Wissenschaftler verstehen bestimmte Eigenschaften von Luft, wie beispielsweise Luftdruck oder -dichte, über das Behälter-Schema. In der Geographie wird der Raum u. a. selbst als Behälter betrachtet (WARDENGA 2002). Dieses indirekte Verstehen aufgrund einer metaphorischen Übertragung wird im Rahmen der Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens auch als imaginatives Verstehen bezeichnet (GROPENGIÉBER 2006, 38ff.; GROPENGIÉBER 2007, 111ff.).

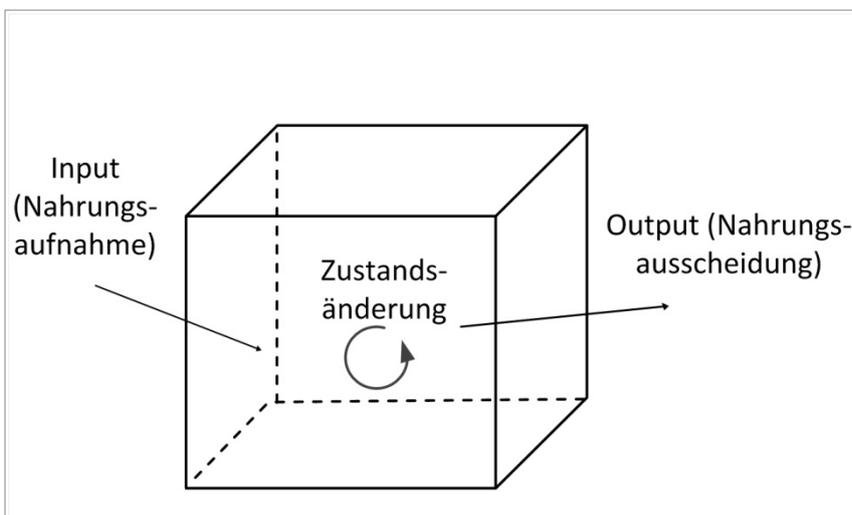
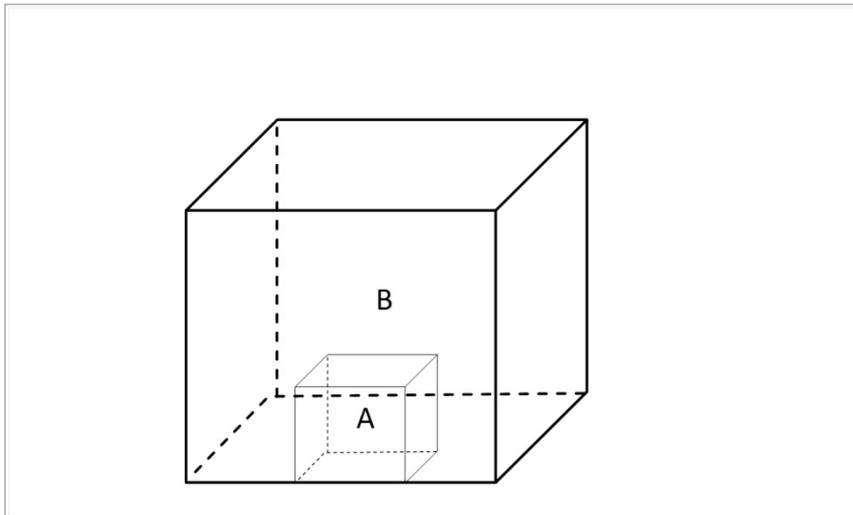


Abbildung 3: Person-Schema (eigene Darstellung).

Ein weiteres, wichtiges Schema ist das Person-Schema (siehe Abbildung 3). Lakoff & Johnson weisen diesem sowohl Merkmale wie Intentionalität und Handlungen als auch Umwandlungsprozesse wie Nahrungsaufnahme und –ausscheidung sowie eine daraus resultierende Zustandsveränderung des Körpers zu (LAKOFF & JOHNSON 2008, 44f.). Die physische Umwelt wird also über Personifizierungen, Anthropomorphismen oder Animismen verstanden. Wissenschaftler greifen auf dieses Schema zurück, um beispielsweise Absorptionsprozesse zu verstehen. Solare, kurzwellige Strahlung wird vom Körper aufgenommen, sein Zustand verändert sich, langwellige Strahlung wird ausgeschieden.



**Abbildung 4: Teil-Ganzes-Schema (eigene Darstellung).**

Grundlegend ist auch das Teil-Ganzes-Schema (LAKOFF 1987, 273), ohne dass die Mengenlehre in der Mathematik nicht vorstellbar wäre (siehe Abbildung 4). Es basiert auf der grundlegenden Erfahrung, dass der eigene Körper aus Teilen besteht, die in einem asymmetrischen Verhältnis zueinander stehen. So ist der Arm beispielsweise ein Teil des Körpers, jedoch nicht umgekehrt. Allgemeiner formuliert: Wenn A ein Teil von B ist, dann ist B nicht Teil von A. Dieses Schema hilft einerseits die konkrete physische Umwelt zu erfassen. So wird beispielsweise das Zimmer als Teil der Wohnung verstanden. Übertragen wird das Ganze jedoch auch auf abstraktere Bereiche, wodurch beispielsweise die Eigenschaften des Institutes als Teil der Universität oder des Menschen als Teil einer sozialen Gruppe imaginativ verstanden werden.

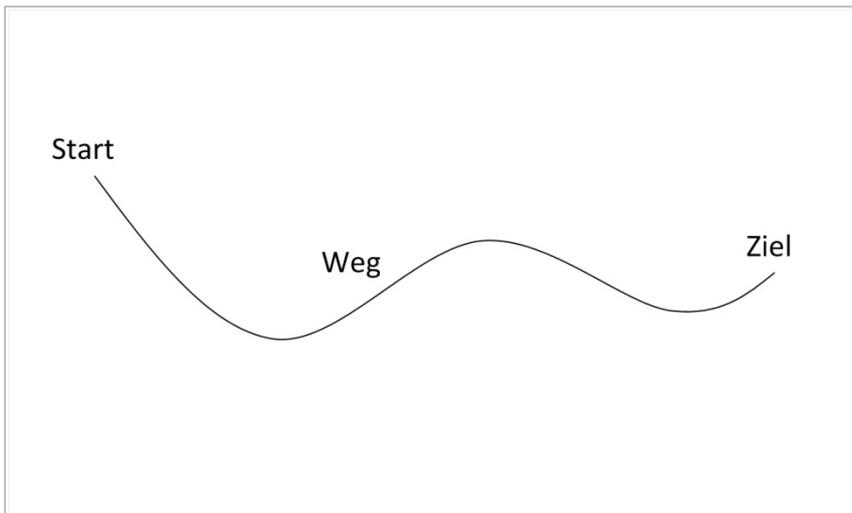


Abbildung 5: Start-Weg-Ziel-Schema (eigene Darstellung).

Die Erfahrung von Räumlichkeit, von Entfernungen oder Positionen, die sich bewegende Objekte im Drei-Dimensionalen Raum zueinander haben können, führt zur Ausbildung des sogenannten Start-Weg-Ziel-Schemas (LAKOFF 1987, 275f.). Einerseits kann die konkrete physische Welt hierüber begriffen werden, beispielsweise bei einer Wanderung oder einer Autofahrt oder allgemeiner im Rahmen räumlicher Orientierung. Andererseits werden abstrakte Dinge hierüber imaginativ verstanden. Ein Forschungsvorhaben setzt Ziele voraus, die über einen bestimmten Weg erreicht werden. Dieser Weg kann mühsam und lang sein. Die Ziele liegen dann in weiter Ferne. Zeit wird über das Start-Weg-Ziel-Schema imaginativ verstanden. So liegt die Zukunft beispielsweise vor uns, die Vergangenheit hinter uns.

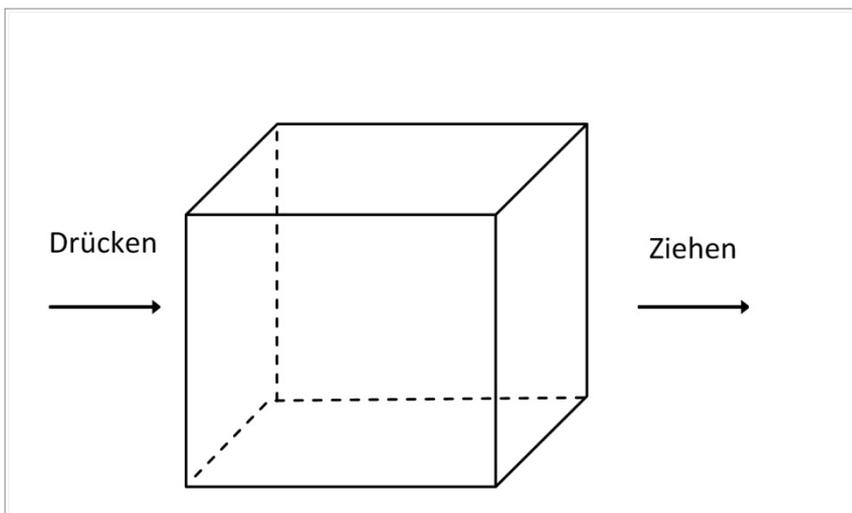


Abbildung 6: Drücken- und Ziehen-Schema (eigene Darstellung).

Auf unseren Körper wirken Kräfte, er bewegt sich im Raum, kann auf Hindernisse stoßen, gezogen oder gedrückt werden. Diese körperlichen Erfahrungen können direkt verstanden werden. Sie führen zur Ausbildung von Schemata, die das Drücken oder Ziehen beschreiben (KOVECSSES 1986, 90; JOHNSON 1987, 42ff., 90). Entsprechend können die Ursachen von Bewegungen direkt am eigenen Körper oder indirekt an anderen Körpern nachvollzogen werden. Die auf den Körper wirkende Gewichtskraft wird

beispielsweise als Ziehen verstanden (JOHNSON 1987, 47f.). Durch metaphorische Übertragungen werden auch abstraktere Phänomene, wie beispielsweise die Motive eines Menschen, die ihn antreiben, imaginativ verstanden.

Problematisch ist, dass *kinesthetic image schemes* in ihrer Anzahl nur schwer zu erfassen und zudem zum Teil schwierig voneinander abzugrenzen sind. Hilfreich wäre hier eine genauere Definition dieser verkörperten Schemata. Im Moment scheint es so, als ob jedes Wort, welches grundlegende körperliche Vorgänge oder Fähigkeiten des Körpers beschreibt, auch ein bestimmtes Schema repräsentiert. Die vorgestellten Schemata sind in Hinblick auf das Thema der Arbeit von zentraler Bedeutung. Weltwissen, welches die kategoriale Zuordnung von Bedeutungen ermöglicht, wird ebenfalls auf Erfahrungen zurückgeführt und als *basic-level-categories* bzw. *frames* bezeichnet (LAKOFF 1987, 267). In Hinblick auf das Forschungsvorhaben erscheint jedoch v. a. die Ebene der Schemata interessant, ermöglicht sie doch, grundlegende Strukturen von Vorstellungen herauszuarbeiten und miteinander zu vergleichen.

### **2.3 Alltagsvorstellungen vs. wissenschaftliche Vorstellungen**

Vorstellungen basieren auf Beobachtungen oder Erlebnissen, die direkt durch unmittelbare Umwelteinflüsse (Primärerfahrungen) oder über Medien (Sekundärerfahrungen) erfolgen können (HURRELMANN 2006, 239ff.; LUKESCH 2008, 384ff.). Als Alltagserfahrungen werden die Ereignisse bezeichnet, die sich bei der Bewältigung des Alltags primär oder sekundär wahrnehmen lassen. Aufgrund dieser Erfahrungen entwickelt der Wahrnehmende unter Berücksichtigung bestimmter logischer Schlussfolgerungen Alltagsvorstellungen, mit deren Hilfe er sich die Phänomene des Alltags erklärt. Studien belegen, dass sich diese Vorstellungen geschlechts-, alters- und kulturübergreifend ähneln, da sich grundlegende Primärerfahrungen mit der physischen Umwelt nicht unterscheiden (WANDERSEE ET AL 1994, 177ff.; REUTLINGER 2008, 333ff.). Auch Stereotype oder Vorurteile sind ähnlich strukturiert, da sie einen universellen Zweck erfüllen: Sie schützen das Individuum oder die soziale Gruppe, indem sie andere Individuen oder soziale Gruppen vereinfachend und wertend darstellen, um sich abzugrenzen oder aufzuwerten (KLATETZKI 2008, 351ff.).

Alltagsvorstellungen werden also definiert über den Kontext ihrer Entstehung bzw. Verwendung (SCHULER 2011, 16f.). In der Forschung wurde herausgearbeitet, welche Verfahren der Entwicklung von Alltagsvorstellungen zugrunde liegen (vgl. im Folgenden DUIT 2008, REINFRIED 2008 und GROPENIEßER 2006, 17ff.). Analogiebildungen sind ein wichtiges Mittel der Erkenntnisgewinnung im Alltag. Es wird beispielsweise angenommen, dass Jahreszeiten durch einen sich ändernden Abstand der Erde zur Sonne bedingt sind, in Analogie zur Erfahrung, dass es umso wärmer wird, je näher man sich an einer Wärmequelle (z.B. Grill, Feuer) befindet. Alltagsvorstellungen basieren auch auf Personifizierungen und animistischen, anthropomorphistischen oder teleologischen Ideen. Dabei

werden grundlegende Erfahrungen mit dem eigenen Ich, der eigenen Psyche und physischen Eigenschaften auf andere Objekte übertragen oder es wird angenommen, dass Ereignisse zweckbestimmt sind. Eine häufig anzutreffende animistische Vorstellung ist die, dass Wolken ihr Wasser nicht mehr halten können. Auch Menschen, die bereits wissen, dass Wolken keine beseelten Objekte sind, bedienen sich solcher Formulierungen, da sie die Vorgänge nicht anders fassen können (sog. sekundärer Animismus). Die Annahme, dass alles Geschehen in der Natur zweckgerichtet ist, findet sich ebenfalls häufig. Beispiele hierfür sind die Vorstellungen, dass es regnet, damit Tiere und Pflanzen Wasser haben oder dass Luft bis zum Boden absinkt, damit Lebewesen atmen können. Auch Bezeichnungen wie die Ozonschicht als Schutzschicht implizieren eine Zweckausrichtung. Teleologische Vorstellungen deuten darauf hin, dass Menschen im Alltag Phänomene in einen höheren, weltanschaulichen Kontext einbinden. Die Interpretation von Metaphern führt ebenfalls zu Alltagsvorstellungen. Diese werden häufig zu umfassend oder wörtlich verstanden. So stellen sich Lerner beispielsweise das Ozonloch als Loch in der Atmosphäre vor. Alltagsvorstellungen entstehen auch aufgrund von Vorurteilen und vereinfachenden Annahmen gegenüber Unbekanntem, beispielsweise Menschen aus anderen Kulturen.

Interessanterweise beinhalten die beschriebenen Verfahren Schritte der Induktion, Deduktion oder Abduktion, die so grundsätzlich auch die Basis für wissenschaftliche Vorstellungen bilden. Der eigentliche Unterschied zwischen wissenschaftlichen Vorstellungen und Alltagsvorstellungen ist auf der Metaebene zu finden. Wissenschaftliche Forschung steht im Paradigma bestimmter Wissenschafts- oder Erkenntnistheorien, etwa dem kritischen Rationalismus (POPPER 1979) oder der Hermeneutik (DILTHEY 1883). Diese beschreiben die Bedingungen und Verfahren, mit denen wissenschaftliche Erkenntnisse systematisch gewonnen werden können. Im Rahmen dieser Metatheorien werden methodologische Überlegungen in Hinblick auf die Frage entwickelt, wie Hypothesen möglichst zielführend und effektiv verifiziert oder falsifiziert werden können. Wissenschaftliche Forschung sollte bestimmte Gütekriterien wie Validität, Reliabilität und Objektivität berücksichtigen (SCHÜLEIN & REITZE 2012, 226ff.; EGNER 2010, 26ff.; BORSORF 2007, 17ff.) Eben hierin unterscheiden sich wissenschaftliche Vorstellungen und Alltagsvorstellungen (GROEBEN ET AL. 1988, 17ff.). Die Zuschreibung lebendiger Eigenschaften auf eine Wolke beispielsweise ist wissenschaftlich nicht haltbar, sie wird falsifiziert. Im Alltag erfolgt diese Falsifikation nicht, da im Beispiel die entsprechenden Methoden und technischen Hilfsmittel nicht zur Verfügung stehen und zudem im Alltagskontext keine Notwendigkeit besteht. Diese entsteht erst, wenn die Alltagsvorstellung innere Widersprüche aufweist, im Widerspruch zu anderen Alltagsvorstellungen steht oder Phänomene nicht wie erwartet erklären kann. Umgekehrt erfolgt eine vermeintliche Verifikation von Hypothesen im Alltag immer dann, wenn Phänomene mit ihr erklärt werden können. Diese unterliegt jedoch nicht den Gütekriterien wissenschaftlichen Überprüfens. Sie sind subjektiv,

häufig nicht wiederholbar und besitzen für das Individuum einen absoluten Wahrheitsanspruch. Interessanterweise ähneln sich Alltagsvorstellungen und historische wissenschaftliche Vorstellungen häufig. Ursächlich hierfür erscheint die Nicht-Erfahrbarkeit weiter Teile des Kosmos, die Wissenschaftler in der Vergangenheit zu ähnlichen Schlussfolgerungen veranlasste wie heute Menschen in ihrem Alltag. Maßstabsebenen im Mikrokosmos und Makrokosmos sowie Zeiträume im Bereich von Milli-, Mikro- oder Nanosekunden, von Jahrhunderten, Jahrtausenden oder Jahrmillionen werden erst durch technische Entwicklungen Wissenschaftlern zugänglicher (Mikrokopien, Luft- und Satellitenbilder, Zeitlupentechnik, Datierungsmethoden, etc.).

Wie Lethmate aufzeigt, werden folgende Begriffe weitestgehend synonym für Alltagsvorstellungen gebraucht: vorunterrichtliche Vorstellungen, alternative Vorstellungen, lebensweltliche Vorstellungen, Alltagskonzepte, naive Theorien, subjektive Theorien, Präkonzepte, Fehlkonzepte, Fehlvorstellungen, Schülervorstellungen, mentale Modelle, Ideen oder Alltagstheorien (LETHMATE 2007, 55). Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff Alltagsvorstellungen verwendet, da er im Gegensatz zu Schülervorstellungen oder vorunterrichtlichen Vorstellungen umfassender ist. So belegen Studien, dass auch Erwachsene entsprechende Vorstellungen besitzen (WANDERSEE ET AL. 1994, 177ff.; REUTLINGER 2008, 333ff.). Die Begriffe Fehlkonzept oder Fehlvorstellung sind abzulehnen, da sie eine negative Konnotation enthalten, die mit dem konstruktivistischen Paradigma des Forschungsvorhabens nicht vereinbar ist. Da Vorstellungen sich permanent verändern, ist der Begriff Präkonzept ebenfalls unglücklich. Konzept oder Theorie implizieren zudem bestimmte Komplexitätsebenen von Vorstellungen. Alltagsvorstellungen erhalten ihre Bedeutung dadurch, dass sie dem Individuum die Bewältigung alltäglicher Lebenssituationen ermöglichen. Eben dies soll durch die Begriffswahl betont werden. Synonym wird auch von lebensweltlichen Vorstellungen gesprochen. Aussagen von Lernern, die sich an wissenschaftlichen Positionen orientieren, könnten auch als wissenschaftsorientierte Vorstellungen bezeichnet werden. Allerdings sind wissenschaftsorientierte Vorstellungen häufig mit Alltagsvorstellungen verknüpft. So erscheint beispielsweise die Vorstellung, dass die Jahreszeiten durch den sich ändernden Abstand von Erde zu Sonne bestimmt werden, sowohl wissenschaftsorientiert, da beispielweise Aussagen zur elliptischen Erdbahn gemacht werden, als auch alltagsorientiert, da Erfahrungen mit Entfernungen zu Wärmequellen zugrunde gelegt werden. Entsprechend schwer fällt es zu identifizieren, welche Vorstellungen fest verankert sind und welche womöglich ad hoc formuliert wurden. Aufgrund dieser Schwierigkeiten wird auf eine differenzierende Untersuchung im Rahmen dieser Arbeit verzichtet.

## **2.4 (Meta-)theoretische Grundlagen didaktischer Vorstellungsforschung und konkrete Empfehlungen zur Unterrichtsgestaltung**

Die didaktische Vorstellungsforschung untersucht die Bedingungen, unter denen Individuen im Laufe ihres Lebens Vorstellungen entwickeln. Aufbauend auf den hieraus gewonnen Erkenntnissen gibt sie Empfehlungen zur Gestaltung von Lehr-Lernumgebungen, die es Lernern ermöglichen sollen, ihre Vorstellungen zielgerichtet und effektiv weiterentwickeln zu können. Heutige Vorstellungsforschung steht im Paradigma einer gemäßigt-konstruktivistischen Lehr-Lern-Theorie. Lernen erscheint als aktiver, selbstgesteuerter, sozialer und situierter Prozess, bei dem das Individuum sein Wissen auf der Basis seines Vorwissens und seiner Erfahrungen entwickelt (REINFRIED 2007; RIEMEIER 2007).

Die frühe Phase der Vorstellungsforschung zu Beginn der achtziger Jahre des 20. Jahrhunderts ist geprägt durch den Begriff *conceptual change*. Er basiert auf der Theorie des Paradigmenwechsels des Wissenschaftstheoretikers Thomas S. Kuhn (KUHN 1962). Erkenntnisse sind demnach abhängig vom wissenschaftlichen Paradigma. Ändert sich dieses, können frühere Argumente oder empirische Befunde plötzlich zu neuen Erkenntnissen führen. Wissenschaftlicher Fortschritt scheint somit auch eine Frage von Paradigmenwechseln zu sein (CHALMERS 2007, 87ff.; PLÖGER 2003, 107ff.). Die frühe *Conceptual-Change*-Forschung geht davon aus, dass Lernen ebenso erfolgen könnte. Wenn Lerner grundlegende Annahmen ändern, sollen neue, plötzliche Erkenntnisse möglich werden. Der Ansatz von Posner et al. (POSNER ET AL. 1982) beschreibt vier Bedingungen, die für einen erfolgreichen Konzeptwechsel erfüllt sein müssen: (1) Vorstellungen werden weiterentwickelt, wenn das Individuum Grenzen oder Widersprüche erkennt, die eine Unzufriedenheit mit der ursprünglichen Vorstellung auslösen. Der Lehrer sollte also die Voraussetzungen dafür schaffen, dass Lernende sich ihrer Alltagsvorstellungen bewusst werden und diese als unzureichend empfinden. (2) Der Lernende muss die neue Vorstellung verstehen können. (3) Die neue Vorstellung sollte plausibel sein und Aspekte erklären können, die die ursprüngliche Vorstellung nicht erklären konnte. (4) Der Lerner sollte die Anwendungsfähigkeit der neuen Vorstellungen erkennen, sie als fruchtbar, als Werkzeug erkennen können. Das Aufzeigen von Widersprüchen in oder Grenzen von Vorstellungen wird auch als Herbeiführen von kognitiven Konflikten bezeichnet. Grundsätzlich sind vier Szenarien denkbar: (1a) Die Vorstellung eines Lerners könnte in sich widersprüchlich sein. (1b) Verschiedene Vorstellungen von Lernern könnten sich widersprechen. (1c) Zwischen der Vorstellungen der Lerner und der Wissenschaftlervorstellung gibt es Diskrepanzen. (1d) Die Vorhersage der Lerner stimmt nicht mit dem Ergebnis überein (DUIT & TREAGUST 1998).

Kritisiert wird an diesem frühen Ansatz, dass er zu kognitiv ausgerichtet ist. Affektive und soziale Aspekte werden vernachlässigt. So zeigen Studien, dass Lerner beispielsweise durchaus neue Vorstellungen verstehen und deren Erklärungswert erkennen, diese jedoch ablehnen, da sie beispielsweise im Widerspruch zu ihren Grundüberzeugungen stehen. Ebenso können neue

Vorstellungen neben alten Vorstellungen bestehen bleiben, auch wenn diese sich scheinbar widersprechen. Oder es werden sogenannte Hybridvorstellungen entwickelt, d.h. die neue Vorstellung wird mit Elementen der alten Vorstellung verknüpft. Dass alte Vorstellungen von Lernern nicht so einfach aufgegeben werden, liegt daran, dass sie sich in Alltagssituationen vielfach bewährt haben. Lerner sind häufig fest von der Richtigkeit ihrer Vorstellungen überzeugt, da sie sich als fruchtbar, als hilfreich bei der Bewältigung vielfältiger Lebenssituationen erwiesen haben (VOSNIADOU & BREWER 1992, JUNG 1993, DUIT 1995, DUIT 2000, STARK 2003). Die genannten Befunde deuten darauf hin, dass Lernen nicht im Sinne einer Akkommodation als radikaler Vorstellungswechsel stattfindet, sondern als allmähliches, sukzessives Modifizieren, Ausdifferenzieren und Erweitern. In der Vorstellungsforschung werden daher alternative Begriffe wie *conceptual growth*, *conceptual development* oder *conceptual reconstruction* diskutiert (KRÜGER 2007, 82f.).

Neuere Ansätze der Vorstellungsforschung fokussieren die ontologische und epistemologische Perspektive von Lernenden. So geht beispielsweise der Kategorisierungsansatz von Chi (CHI 2008) davon aus, dass Lernen auf der Grundlage bestimmter ontologischer Kategorisierungen erfolgt, die Lerner sich im Laufe ihres Lebens häufig unbewusst angeeignet haben. So haben Lerner beispielsweise Schwierigkeiten, die temperaturbedingte Veränderung von Stoffen zu erfassen, da sie Wärme selbst als etwas Stoffliches kategorisieren. Ontologische Kategorisierungen müssten also aufgedeckt und thematisiert werden (CHINN & BREWER 1993). Dies setzt bestimmte metakognitive Fähigkeiten der Lerner voraus. Das Problem des Nicht-Glaubens wissenschaftlicher Vorstellungen bleibt jedoch weiter bestehen. Sprachlich und phänomenologisch spricht vieles dafür, dass Wärme etwas Stoffliches ist. Kategorisierungen im Laufe eines Lebens erfolgen nicht willkürlich, sondern aufgrund grundlegender Erfahrungen (SCHNOTZ 2001, 77; STARK 2003).

Der Rahmentheorieansatz versucht konzeptuelle Strukturen von Vorstellungen aufzudecken. Er geht davon aus, dass Vorstellungen eingebettet sind in fundamentale ontologische und epistemologische Überzeugungen, die als Rahmentheorie bezeichnet werden und die bereits in der frühen Kindheit entwickelt werden. Sie bilden das Fundament für sogenannte spezifische Theorien, aus denen bestimmte Annahmen deduktiv abgeleitet werden können. Umgekehrt können Beobachtungen und Erfahrungen zu einer Modifikation spezifischer Theorien führen, sofern sie nicht im Widerspruch zur Rahmentheorie stehen. So könnte beispielsweise die Annahme, dass Luft mit zunehmender Temperatur schwerer wird, auf die Rahmentheorie zurückzuführen sein, dass alle existierenden Dinge eine Masse und ein Gewicht haben. Konform hierzu könnte die spezifische Theorie Wärme als etwas Stoffliches mit einem Gewicht betrachten. Wird nun im Unterricht das Phänomen Wärme auf molekularer Ebene mit Hilfe der kinetischen Gastheorie erklärt, führt dies nicht automatisch dazu, dass auch die Rahmentheorie in Frage gestellt wird. Vielmehr könnte der Lernende die Erklärung ablehnen oder diese neben seiner alten Vorstellung weiter bestehen lassen. Studien belegen, dass

Lerner ihre Vorstellungen an die wissenschaftliche Sicht schneller und effektiver angleichen, wenn die Rahmentheorien diese unterstützen (VOSNIADOU & BREWER 1992, VOSNIADOU 2008). Während der Rahmentheorieansatz davon ausgeht, dass Erklärungssysteme bereits in der Kindheit relativ kohärent sind, betrachtet diSessa Vorstellungen als unverbundene Fragmente (DISSA 2008). Vorstellungsentwicklung bedeutet aus dieser Perspektive das Bilden von Vernetzungen zwischen Wissensbruchstücken, sogenannten *p-prims*.

Ein Ansatz, der stärker den sozialen Aspekt und die Situiertheit von Vorstellungsentwicklungen fokussiert, ist das sogenannte Kontextmodell (CARAVITA & HALLDÉN 1994, 89ff.; HALLDÉN ET AL. 2008, 509ff.). Hierbei werden Vorstellungen im Kontext ihrer Entstehung betrachtet und hinsichtlich verschiedener Ebenen unterschieden. Auf der Ebene der konkreten Wahrnehmung gibt es einen Unterschied zwischen der subjektiven Sichtweise, die zu Alltagsvorstellungen führt, und der systematischen, Gütekriterien berücksichtigenden Empirie im Kontext der Wissenschaft. Diese stehen durch Prozesse von Induktion, Deduktion oder Abduktion in Relation zu einer mittleren Ebene, die im Alltagskontext geprägt ist durch Konventionen oder den gesunden Menschenverstand, im Wissenschaftskontext durch theoretische Konzepte. Auf einer Metaebene werden wissenschaftliche Vorstellungen durch Theorien und Metatheorien erklärt bzw. begründet, während Vorstellungen im Alltagskontext umfassender durch Weltanschauungen oder Ideologien erklärt bzw. begründet werden. Wenn also Vorstellungsentwicklungen im Unterricht nicht wie intendiert stattfinden, könnte es daran liegen, dass Lerner mit wissenschaftlichen Vorstellungen konfrontiert werden ohne die entsprechenden Kontexte zu kennen und Phänomene aus einer grundlegenden anderen Perspektive betrachten (HALLDÉN 1999, STARK 2003). Weitere Ansätze verstehen in Anlehnung an die Arbeiten Vygotskys (VYGOTSKY 1978) Vorstellungsentwicklungen als Enkulturationsprozesse, fokussieren also soziokulturelle Aspekte (HODSON&HODSON 1998, LEACH & SCOTT 2002).

Die vorgestellten Ansätze sind als komplementär zu betrachten. Vorstellungsentwicklung ist keine rein kognitive Angelegenheit, vielmehr spielen Emotionen, Unbewusstes sowie soziale Aspekte und kulturelle Kontexte eine wichtige Rolle. Die Empfehlungen der didaktischen Vorstellungsforschung zur Gestaltung von Lehr-Lernumgebungen berücksichtigen kognitive Aspekte. Hierzu gehört das Erzeugen von Unzufriedenheit mit den eigenen Vorstellungen in Anlehnung an das *Conceptual-Change*-Modell von Posner et al. (POSNER ET AL. 1982) durch kognitive Konflikte. Empfohlen werden bestimmte Fragetechniken, *discrepant questioning*, die durch Aufzeigen kleinerer Widersprüche sukzessive Erkenntnisse innerhalb eines allmählichen, längerfristigen Konzeptveränderungsprozesses ermöglichen sollen (REA-RAMIREZ & NÚÑEZ-OVIEDO 2008). In Anlehnung an die Ergebnisse der Multimedia-Lernforschung wird empfohlen, Darstellungsformen durch Sequenzierung mehrerer Gedankenschritte, sogenannte *idea units*, in Form von eigenen schematischen Bildern in

Kombination mit kurzen Texten zu vereinfachen (REINFRIED ET AL. 2010, 140f.). Vorgeschlagen werden die Differenzierung und Weiterentwicklung von Alltagsvorstellungen durch Strukturierung, sogenannte *anchored instruction* oder *advance organizer*. Hierzu sollten ähnliche Begriffe und Konzepte klar abgegrenzt werden, Kernkonzepte oder Basismodelle deutlich gemacht und Anwendungssituationen geschaffen werden (AUSUBEL 1974, 159f.; GERSTENMAIER & MANDL 1995, 875f.; SCHULER 2011, 324). Eine weitere kognitiv ausgerichtete Strategie zur Weiterentwicklung von Alltagsvorstellungen besteht in der Veranschaulichung durch Modellexperimente (SCHMEINCK 2008, DRIELING 2008), Realbegegnungen sowie lebensnahe Analogien<sup>3</sup> oder Metaphern (FELZMANN 2010). Der kognitiv ausgerichtete Einsatz von Metaphern im Lernprozess wird dabei kritisch betrachtet. Einerseits ermöglicht er im Sinne der kognitiven Metaphertheorie neue Erkenntnisse (AMIN 2009), andererseits birgt er die Gefahr der Überforderung der Lernenden (VOSNIADOU 2009). Warum einige Metaphern in Lernprozessen effektiv eingesetzt werden können und andere nicht, untersucht eine Studie aus dem Jahr 2012, indem sie 17 Arbeiten zum Einsatz von Metaphern in Lehr-Lernprozessen vor dem Hintergrund der Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens mit Hilfe der systematischen Metaphernanalyse reanalysiert (NIEBERT ET AL. 2012). Sie kommt zum Ergebnis, dass es keine absolute Sicherheit für das Verstehen von Metaphern im Lehr-Lernprozess gibt. Konstruiert der Lehrer die Metapher, sind ihm sowohl Quell- als auch Zielbereich bekannt. Der Lerner kennt bestenfalls nur den Quellbereich. Welche Aspekte des Quellbereiches der Lerner letztlich auf den Zielbereich überträgt, hängt von seinen Erfahrungen und seiner individuellen Interpretation ab. Metaphern sollten einen eindeutigen und direkt erfahrbaren Quellbereich haben (NIEBERT ET AL. 2012, 865ff.).

Weitere Vorschläge zur Gestaltung von Lehr-Lernumgebungen sind metakognitiv ausgerichtet: Das Nachdenken der Lernenden über ihren Lernprozess soll sie u. a. für die Bedeutung ihrer Alltagsvorstellungen sensibilisieren (REINFRIED 2010, 19f.). Lernende sollten Methoden der Wissenschaft und Metatheorien, also Vorstellungen über die Wissenschaft kennenlernen, um den Erklärungswert ihrer Alltagsvorstellungen besser beurteilen zu können. Sie gehen also u. a. der Frage nach, wie wissenschaftliche Erkenntnisse gewonnen und überprüft werden (DUIT 2008, 4). In Hinblick auf die vorgestellten Ansätze sollte Lehren und Lernen als Weiterentwickeln von Vorstellungen auch die Metaebene miteinbinden durch das Bewusstmachen und Nachdenken über ontologische Kategorisierungen, grundlegende ontologische und epistemologische Überzeugungen sowie über die Situiertheit von Vorstellungen. Empfohlen wird zudem eine Kombination von inhaltlichem und metakognitivem Lernen, sog. multiple Konzeptwechsel (DUIT & TREAGUST 2003).

---

<sup>3</sup> Analogien können im weitesten Sinne als Metaphern aufgefasst werden. Es findet eine vergleichende Übertragung statt: Ursprungsbereich ist wie Zielbereich (NIEBERT ET AL. 2012, 853f.). Im Rahmen dieser Arbeit werden auch Personifizierungen als Metaphern betrachtet. Diese sind jedoch abzugrenzen vom Person-Schema, welches durch die basale Logik Aufnahme-Zustandsänderung-Ausscheidung charakterisiert wird.

Neben diesen kognitiv und metakognitiv ausgerichteten Empfehlungen der didaktischen Vorstellungsforschung werden weitere Aspekte angesprochen. Die gleichen Alltagsvorstellungen sollten zu verschiedenen Zeiten, in veränderten Kontexten, unter veränderter Zielsetzung, aus verschiedenen Perspektiven betrachtet und mit anderen Konzepten verknüpft werden, mit dem Ziel multiple und damit flexible Repräsentation, sogenannte *cognitive flexibility*, zu entwickeln (GERSTENMAIER & MANDL 1995, 876). Ferner sollten Lernumgebungen authentische, herausfordernde Problemstellungen bereithalten, Lernen in sozialer Interaktion ermöglichen und offen in Hinblick auf Lernprozesse und –produkte sein (REINMANN-ROTHMEIER & MANDL 2001, REMPFLER 2007, REINFRIED 2007). Die im Rahmen des *Thinking-Through-Geography*-Ansatzes entwickelten Methoden erfordern ebenfalls intensive Auseinandersetzung mit dem Vorwissen und werden zur Integration von Alltagsvorstellungen empfohlen (VANKAN 2007, 158ff.; SCHULER 2011, 324).

### 2.5 Zusammenfassung

Vorstellungen sind gedanklich vielfältig repräsentierte Informationen. Sie besitzen symbolisch-abstrakte, bildlich-konkrete, affektive und prozessuale Dimensionen. Sprache oder Zeichnungen sind das Resultat einer Codierung dieser Informationen. Ihre Qualität hängt vom Ausdrucksvermögen oder den zeichnerischen Fähigkeiten des Individuums ab. Vorstellungen können also nur rekonstruiert werden. Es handelt sich um einen interpretativen Prozess, bei dem der Bedeutungsgehalt von Zeichnungen oder sprachlicher Äußerungen ermittelt wird.

Die Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens geht davon aus, dass grundlegende sensorische Erfahrungen seit frühester Kindheit Vorstellungen in ihrer Struktur prägen. Sie führen zur Ausbildung sogenannter *kinesthetic image schemes*, die direkt verstanden werden können. In Hinblick auf das Forschungsvorhaben erscheinen das Behälter-Schema, das Person-Schema, das Teil-Ganzes-Schema, das Start-Weg-Ziel-Schema sowie Drücken- und Ziehen-Schema hilfreich, um die basalen Logiken der Vorstellungen herauszuarbeiten. Indirektes Verstehen erfolgt durch eine metaphorische Übertragung dieser Schemata auf neue Zielbereiche. Metaphern strukturieren damit unsere Vorstellungen und ermöglichen neue Erkenntnisse. Auf der sprachlichen Ebene lassen sich entsprechende metaphorische Konzepte rekonstruieren. Als *highlighting and hiding* wird die Eigenschaft von Metaphern oder metaphorischen Konzepten bezeichnet, bestimmte Aspekte zu beleuchten und andere zu verdecken.

Alltagsvorstellungen lassen sich über den Kontext ihrer Entstehung oder Verwendung definieren. Sie entwickeln sich im Alltag und befähigen zur Bewältigung von Lebenssituationen. Die ihrer Entwicklung zugrundeliegenden Verfahren wurden von der Vorstellungsforschung herausgearbeitet: Analogiebildungen, Personifizierungen, animistische, anthropomorphistische oder teleologische Annahmen, bildliche Interpretationen von Metaphern sowie das Entwickeln von Stereotypen und

Vorurteilen. Im Gegensatz zu wissenschaftlichen Vorstellungen unterliegen diese Verfahren jedoch keinen Gütekriterien wie Validität, Reliabilität oder Objektivität. Heutige Alltagsvorstellungen ähneln häufig historischen, wissenschaftlichen Vorstellungen. Es gibt zudem geschlechts-, alters- und kulturübergreifende Gemeinsamkeiten.

Im Rahmen didaktischer Vorstellungsforschung wurden verschiedene Ansätze entwickelt, um die Entstehung und Veränderung von Vorstellungen im Alltag bzw. in der Schule zu beschreiben. In der frühen Phase Anfang der achtziger Jahre arbeiteten Posner et al. vier Bedingungen heraus, die eine erfolgreiche Vorstellungsänderung einleiten können: (1) Erkennen von Widersprüchen in der Alltagsvorstellung, (2) Verständlichkeit der neuen Vorstellung, (3) Erkennen des Erklärungspotentials der neuen Vorstellung, (4) Erproben der neuen Vorstellung in verschiedenen Anwendungskontexten. Kritisiert wird dieser Ansatz aufgrund seiner rein kognitiven Ausrichtung und der Vernachlässigung affektiver oder sozialer Aspekte. Studien zeigen, dass Vorstellungsentwicklungen keine rein kognitive Angelegenheit sind und sich Vorstellungen nicht abrupt, sondern erst allmählich ändern. Die Arbeiten von Posner et al. als auch die neueren Ansätze sind als komplementär zu betrachten. Sie berücksichtigen grundlegende ontologische und epistemologische Überzeugungen von Lernenden (Kategorisierungsansatz, Rahmentheorieansatz), beschreiben Vorstellungsentwicklung als Herstellen von Kohärenz (Ansatz der unverbundenen Fragmente) oder untersuchen soziale Aspekte bzw. die Situiertheit (Kontextmodell) von Vorstellungen. Konkrete Vorschläge zur Gestaltung von Lehr-Lern-Umgebungen auf der Basis der Erkenntnisse der didaktischen Vorstellungsforschung sind einerseits kognitiv ausgerichtet: das Erzeugen kognitiver Konflikte in Anlehnung an das Modell von Posner et al., *discrepant questioning*, *idea units*, *anchored instruction*, *advance organizer* sowie Veranschaulichungen durch Modellexperimente, Realbegegnungen sowie lebensnahe Analogien oder Metaphern. Andererseits wird die Bedeutung von Metakognition hervorgehoben: Bewusstwerden und Nachdenken über die Bedeutung von Alltagsvorstellungen und Wissenschaft und grundlegende ontologische und epistemologische Überzeugungen. Multiple Konzeptwechsel zwischen inhaltlichem und metakognitiven Lernen werden empfohlen. Lernumgebungen sollten zudem so gestaltet sein, dass sie *cognitive flexibility* ermöglichen, authentische, herausfordernde Problemstellungen bereithalten, Lernen in sozialer Interaktion ermöglichen und offen in Hinblick auf Lernprozesse und –produkte sind.

### **3 Forschungshintergrund und -fragen**

#### **3.1 Die Passatzirkulation als Gegenstand des Geographieunterrichts**

Die Klimageographie befasst sich als Teilgebiet der Physischen Geographie mit den Wechselwirkungen zwischen Erdoberfläche und Atmosphäre. Das Klima wird dabei als ein Faktor im Landschaftshaushalt betrachtet. Sie ist abzugrenzen von der Klimatologie als Geowissenschaft, die sich mit den physikalischen Bedingungen und Erscheinungen der Atmosphäre beschäftigt. Als Teilgebiet der Physik untersucht die Meteorologie die konkreten Wettererscheinungen. Die Passatzirkulation ist Forschungsgegenstand aller drei Disziplinen: Die Klimageographie untersucht beispielsweise die Ursachen und Auswirkungen von Humidität und Aridität oder Niederschlagsvariabilität auf den Landschaftshaushalt, aber auch vorherrschender Windrichtungen. Sie unterscheidet Räume aufgrund ihrer klimatischen Eigenschaften und typisiert diese beispielsweise in immer-, wechselfeuchte und trockene Tropen. Die Klimatologie fokussiert die physikalischen Prozesse und Eigenschaften, die im Rahmen dieser tropischen Zirkulation vorzufinden sind: beispielsweise Auswirkungen von Verdunstung oder Kondensation auf die Lufttemperatur, das spezifische Gewicht von Luft oder Wasserdampf, Ursachen von horizontalen oder vertikalen Luftbewegungen sowie die dabei stattfindenden Veränderungen der Eigenschaften von Luft. Die Forschungsfragen von Klimageographie und Klimatologie können sich überschneiden. So untersucht die Klimageographie beispielsweise ebenfalls die Ursache von Luftbewegungen, jedoch in Hinblick auf den Landschaftshaushalt. Die Passatzirkulation ist jedoch auch aus meteorologischer Sicht relevant, da mit ihr konkrete Wettererscheinungen wie beispielsweise heftige zenitale Regen und Gewitter verbunden sind (BORSODORF 2007, 45-57; GEBHARDT ET AL 2011, 227ff.).

Im Geographieunterricht sollte die Passatzirkulation nicht nur in ihren Auswirkungen auf den Naturraum betrachtet werden. Mit den Bildungsstandards geht die Orientierungsfigur des Mensch-Umwelt-Systems einher. Geographie wird als Systemwissenschaft verstanden. Systeme werden dabei in den Bildungsstandards als in sich geschlossene, funktionale Einheiten betrachtet, bei denen Systemelemente in Abhängigkeit zueinander existieren und zwischen denen Wechselwirkungen stattfinden. Im Fokus des Geographieunterrichts steht dabei die Interaktion zwischen naturgeographischen und humangeographischen Systemen, die auf verschiedenen Maßstabsebenen betrachtet und hinsichtlich ihrer Systemkomponenten Struktur, Funktion und Prozess analysiert werden soll (DGFG 2010, 10ff.). Die integrative Betrachtung von Natur und Gesellschaft ermöglicht es, den Blick auf den Raum zu erweitern (WARDENGA 2002, 8ff.). Aus naturgeographischer Sicht erscheinen die Tropen zum einen als konkreter, physisch-materieller Containerraum, der durch das Klima und damit die Passatzirkulation als einen Landschaftsfaktor geprägt wird. Zum anderen werden sie als System von Lagebeziehungen interpretiert. So bestehen beispielsweise Wechselwirkungen zwischen den trockenen und den immerfeuchten Tropen in Hinblick auf Luftbewegungen, -feuchtig-

keit, -temperatur, etc. Der humangeographische Raum kann ebenso als Container oder System von Lagebeziehungen betrachtet werden, aber auch, gerade in der Wechselwirkung mit dem naturgeographischen Subsystem, als Kategorie der Sinneswahrnehmung oder als Konstruktion. Wie werden beispielsweise Hitze und Trockenheit oder tropische Schwüle von Menschen vor Ort wahrgenommen? Welche Bedeutung kommt Regenereignissen in den wechselfeuchten Tropen zu, aus der Perspektive der Menschen vor Ort oder aus anderen Perspektiven? Wie werden diese Räume touristisch vermarktet? Wie nehmen Schülerinnen und Schüler diese Räume wahr, beispielsweise als Konsumenten tropischer Produkte oder im Rahmen von Urlaub? Der Mehrwert dieses erweiterten Blickes auf den Raum liegt auf der Hand: Er fördert die Fähigkeiten der Schülerinnen und Schüler zu kritischer Reflexivität und Meinungsbildung, indem er zu Perspektivwechseln anregt und den Raum als Konstruktion entlarvt. Er zeigt auch die Relevanz aus Schülersicht auf, indem er Menschen oder Gruppen in ihrem Handeln und Wahrnehmen fokussiert, zu denen sich Bezüge zur Lebenswelt der Lernenden herstellen lassen (WARDENGA 2002, 8ff.; RHODE-JÜCHTERN 2009, 116ff.). Dies bedeutet jedoch nicht, dass geowissenschaftliche Inhalte im Geographieunterricht nicht mehr erwünscht wären. Im Gegenteil wird in den Bildungsstandards in Anlehnung an die Leipziger Erklärung der Deutschen Gesellschaft für Geographie die Geographie als Zentrierungsfach der schulrelevanten Inhalte aller Geowissenschaften bezeichnet (DGFG 2010, 6). Geowissenschaftliche Inhalte im Unterricht thematisieren die Komplexität und Fragilität des Systems Erde, Georisiken und ihr Management sowie Georessourcen und ihre Begrenztheit. Sie sensibilisieren Schülerinnen und Schüler damit in Hinblick auf Bildung für nachhaltige Entwicklung und globales Lernen, sie sind interdisziplinär ausgerichtet, schaffen konkrete Anwendungskontexte für naturwissenschaftliche Inhalte und fördern dabei fächerübergreifendes und vernetzendes Denken (WEFER 2010, 15ff.). Das Verstehen von atmosphärischen Prozessen und Wechselwirkungen im Rahmen der Passatzirkulation ermöglicht es, naturräumliche Potentiale der Tropen angemessen zu erfassen und es schafft damit die Basis, um Lebens- und Wirtschaftsweisen der Menschen in diesen Räumen unter dem Kriterium der Nachhaltigkeit im Sinne von Bildung für nachhaltige Entwicklung (BMBF 2002) beurteilen zu können

Doch in welcher Jahrgangsstufe wird die Passatzirkulation in welchem Kontext behandelt, welche Aspekte sind dabei wichtig und welches Vorwissen aus dem Fach oder anderen naturwissenschaftlichen Fächern ist relevant? Lehrplanvorgaben können aufgrund der Vielzahl der Curricula nicht für alle Bundesländer untersucht werden. Da die Studie mit Schülerinnen und Schülern des Gymnasiums in Rheinland-Pfalz durchgeführt wird, soll die Analyse exemplarisch an gymnasialen Lehrplänen dieses Bundeslandes erfolgen. In Rheinland-Pfalz wird die Passatzirkulation im Gymnasium in Jahrgangsstufe 7 im Rahmen der Frage thematisiert, wie Naturfaktoren den Lebensraum des Menschen prägen. Hierzu sollen Einblicke in die Zusammenhänge von Klima und

Landschaft vermittelt werden. Unter anderem sollen die Tropen als Klimazone am Beispiel Afrika thematisiert werden. Wüste, Savanne und tropische Regenwald werden als Grundbegriffe vorgegeben (MBWW 1998a, 63ff.). Relevante Vorkenntnisse beziehen sich also auf Aspekte wie Himmelsmechanik, Luft sowie Wind- und Regenentstehung. In Rheinland-Pfalz wird im Rahmenlehrplan Naturwissenschaften für das gleichnamige Fach, zu dem Physik, Chemie und Biologie zählen, bereits für die Orientierungsstufe der Themenbereich Sonne, Wetter, Jahreszeiten vorgegeben. Schon hier sollen Wetterphänomene, der Wasserkreislauf, Aggregatzustände und Teilchenmodell, Energiequellen und –umwandlung sowie die Entstehung der Jahreszeiten thematisiert werden (MBWJK 2010, 33ff.). Im Geographieunterricht werden diese Themen erst zu Beginn der Jahrgangsstufe 7, jedoch vor der Passatzirkulation behandelt (MBWW 1998a, 63ff.). Die Lernenden können also auf wissenschaftsorientierte Vorstellungen zur Himmelsmechanik, zur Schiefe der Ekliptik sowie der Bedeutung unterschiedlicher Einstrahlungswinkel der Sonne auf die Erdoberfläche zurückgreifen. Den Wind als landschaftsprägende Kraft haben sie als exogene Kraft zu Beginn der Jahrgangsstufe 7 kennengelernt. Genauere Vorstellungen zur Windentstehung unter Berücksichtigung der kinetischen Gastheorie könnten unter Umständen bereits durch das Fach Naturwissenschaften in der Orientierungsstufe generiert worden sein. In der Regel wird jedoch in Jahrgangsstufe 7 auf eine vertiefende Betrachtung klimatologischer oder meteorologischer Prozesse im Rahmen der Passatzirkulation verzichtet. Die Wirkungsweise der Gradientkraft, adiabatische Prozesse oder die Coriolisablenkung spielen bei der Thematisierung der Passatzirkulation in Jahrgangsstufe 11 bzw. 12 in Rheinland-Pfalz im Grund- oder Leistungsfach eine entscheidende Rolle. Hier wird das tropische Windsystem als Teil der Allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre betrachtet (MBWJK 2011, 41 und 133). Die wissenschaftlichen Modellvorstellungen zu Ursachen und Folgen horizontaler oder vertikaler Luftbewegungen, der Rolle von Wasserdampf sowie der Erdrotation besitzen exemplarische Bedeutung, da sie nicht nur im Zusammenhang mit der tropischen Zirkulation relevant sind, sondern auch die außertropischen Windsysteme prägen. Ohne Coriolisablenkung gäbe es beispielsweise in unseren Breiten kein dynamisches zyklonales und antizyklonales Wettergeschehen. Wolkenauflösung und warme Luft in Hochdruckgebieten sind in Mitteleuropa ebenso wie in den trockenen Tropen eine Folge adiabatischer Kompression absinkender Luftmassen. Advective oder konvektive Niederschläge entstehen auch in Deutschland durch Abkühlung im Rahmen adiabatischer Dilatation. Die Oberstufenschülerinnen und –schüler können auf Vorkenntnisse aus dem naturwissenschaftlichen Unterricht zurückgreifen. Der Lehrplan Physik für das Gymnasium in Rheinland gibt beispielsweise die Thematisierung der Eigenschaften solarer Strahlung und ihre Reflexion oder Absorption in der Atmosphäre sowie Wärmestrahlung und –leitung für Jahrgangsstufe 8 bzw. 9 vor. Hierbei wird explizit auf das Land-See-Klima verwiesen (MBWW 1998b, 179). Kraft, Masse und Dichte sind ebenfalls Gegenstand des Physikunterrichts der Klasse 9.

Hierbei sollen insbesondere der Druck in Gasen, das Teilchenmodell sowie der Luftdruck behandelt werden. Im Chemieunterricht lernen Schülerinnen und Schüler das Teilchenmodell bereits in Klasse 8 kennen, wenn sie Stoffe und ihre Eigenschaften und damit auch Aggregatzustände thematisieren. Die kinetische Gastheorie wird in Jahrgangsstufe 9 im Zusammenhang mit Gasen vertieft. Unter den Anmerkungen zu fächerübergreifendem Lernen findet sich ein expliziter Hinweis auf das Thema Luft (MBWW 1998b, 211ff.). Die Thematisierung der Passatzirkulation in der Oberstufe ermöglicht es, diese naturwissenschaftlichen Vorstellungen in einem konkreten, raumbezogenen und vernetzten Anwendungskontext zu betrachten.

### **3.2 Einflussfaktoren auf die Vorstellungsentwicklung zur Passatzirkulation**

Verschiedene Faktoren haben Einfluss darauf, wie zielführend und effektiv Schülerinnen und Schüler ihre Vorstellungen zur Passatzirkulation entwickeln. Neben Alltagsvorstellungen oder wissenschaftlichen Vorstellungen, die Schülerinnen und Schüler bereits im Unterricht erworben haben, können weitere spezielle Einflussfaktoren auf das Lernen zur Passatzirkulation identifiziert werden. So spielt das Interesse eine entscheidende Rolle. Dieses kann definiert werden als spezifische Person-Gegenstands-Relation, die durch drei Merkmale geprägt wird: Es findet eine kognitive Auseinandersetzung mit dem Gegenstand statt, wobei dieser konkrete Dinge ebenso umfassen kann wie abstrakte Begriffe oder Ideen. Diese Auseinandersetzung besitzt subjektive Bedeutsamkeit für das Individuum (Valenz). Die Beschäftigung mit dem Gegenstand erfolgt freiwillig und ist mit positiven Emotionen und häufig auch einem Flow-Erleben verbunden (KRAPP 2010, 15f.). Der eigentliche Auslöser dieser Beschäftigung wird als Motivation bezeichnet. Lernpsychologisch kann diese aus unterschiedlichen Perspektiven betrachtet werden: behavioristisch als Störreiz, humanistisch als Selbstverwirklichung, Defizit- oder Wachstumsbedürfnis oder kognitivistisch als Wunsch zur Wiederherstellung von Gleichgewichtszuständen (Äquilibration). Sie kann intrinsisch, also durch innere Zustände des Individuums bestimmt, oder extrinsisch, durch äußere Einflüsse bedingt, erfolgen (MIETZEL 2007, 349ff.). Verschiedene Studien haben das Interesse von Schülerinnen und Schülern an geographischen oder geowissenschaftlichen Inhalten oder Arbeitsweisen untersucht. Hemmer & Hemmer führten in den Jahren 1995 und 2005 zwei quantitative Untersuchungen mit insgesamt über 6000 Probanden verschiedener Schularten der Jahrgangsstufen 5 bis 9 und 11 in Bayern durch. Im Fokus standen der Einfluss von Alter, Geschlecht und Schulart auf das Interesse der Schülerinnen und Schüler sowie ein Vergleich der Ergebnisse von 1995 und 2005. Die beiden Untersuchungen erfolgten daher mit dem gleichen Messinstrument. Erfasst wurde das Interesse an 50 Themen, die dem Lehrplan entnommen oder aus geographiedidaktischer Sicht wünschenswert sind, 24 Regionen und 17 Arbeitsweisen mit Hilfe einer fünfstufigen Skala. Das erhobene hohe

Interesse an tropischen Regionen wie Lateinamerika, Schwarzafrika oder Indien ist in Bezug auf die Fragestellung dieser Arbeit nicht sehr aussagekräftig, da nicht klar ist, welche Rolle hier das tropische Windsystem spielt. Das Thema Passatzirkulation, repräsentiert durch das Item Oberflächenformen/Klima/Zonierung, erschien sowohl 1995 als auch 2005 aus Sicht von Schülerinnen und Schüler wenig interessant und landete sowohl bei Mädchen als auch bei Jungen auf den letzten 10 Plätzen der Interessensskala. Insgesamt sind physisch-geographische Inhalte bei Jungen beliebter als bei Mädchen. Das Gesamtinteresse am Schulfach Geographie nimmt von Klasse 5 bis 9 signifikant ab und steigt erst wieder in der Sekundarstufe II (HEMMER & HEMMER 2010a, 65ff.). In einer ebenfalls quantitativ angelegten Studie zum Interesse an Afrika und Entwicklungsländern mit 2400 Schülerinnen und Schülern der Sekundarstufe I im Jahr 2002 kommt Schmidt-Wulffen zum Ergebnis, dass abstrakte Themen wie Geofaktoren und Klimazonen bei Lernern auf wenig Resonanz stoßen, wobei auch hier ein stärkeres Interesse der Jungen an diesen physisch-geographischen Inhalten erhoben wird (SCHMIDT-WULFFEN 2010, 209ff.). Das Interesse an geowissenschaftlichen Themen und Arbeitsweisen wurde im Rahmen des Projektes Forschungsdialog Erde vom Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften der Universität Kiel im Jahr 2001 untersucht. Hierzu wurden insgesamt 333 Schülerinnen und Schüler der Sekundarstufe II befragt. Berücksichtigt wurden auch die Kontexte, in denen die Inhalte stehen. Der Themenbereich Atmosphäre erschien aus Lernalterssicht mittelmäßig interessant. Das Interesse stieg jedoch, je lebensnäher der Kontext wurde (HEMMER & HEMMER 2010b, 239ff.).

In Hinblick auf die Thematisierung der Passatzirkulation im Geographieunterricht lassen sich bestimmte Empfehlungen der Interessensforschung übertragen. Schmidt-Wulffen schlägt vor, abstrakte Inhalte in konkrete, gesellschaftlich relevante Fragestellungen einzubetten. Er nennt Klafkis Ansatz der epochaltypischen Schlüsselprobleme (SCHMIDT-WULFFEN 2010, 209ff.). Nach Klafki handelt es sich hierbei um Fragestellungen, die von internationaler oder globaler Bedeutung und zukünftig wandelbar sind, eine inhaltsbezogene als auch kommunikationsbezogene Komponente enthalten und zu vernetztem Denken befähigen (KLAFKI 1996, 60ff.). So könnten beispielsweise die Lebensbedingungen in den tropischen Regionen unter der Perspektive gesellschaftlich produzierter Ungleichheiten betrachtet oder Friedensfragen in Hinblick auf Wasserverfügbarkeit in den trockenen und wechselfeuchten Tropen diskutiert und dabei jeweils spezifische physisch-geographische Rahmenbedingungen beachtet werden. Lebensnähe ließe sich durch das Aufzeigen von Wahrnehmungsperspektiven und gesellschaftlichen Konstruktionen ebenso erzeugen wie durch das Bewusstmachen der Konsumentenrolle der Lerner in Hinblick auf tropischer Produkte oder Urlaube. Um die Verknüpfung der Passatzirkulation mit gesellschaftlichen Herausforderungen auf verschiedenen Maßstabsebenen zu betonen, erscheint auch eine Integration des Syndromansatzes sinnvoll. Dieser vom Wissenschaftlichen Beirat der Bundesregierung für Globale

Umweltveränderungen (WBGU 1996) entwickelte Ansatz untersucht gegenwärtige Krisen, indem er diese als Syndrome eines globalen Wandels klassifiziert und deren Symptome herausarbeitet. Hierzu werden verschiedene, gesellschaftliche, technische, aber auch natürliche Sphären unterschieden, deren Vernetzung zueinander je nach Syndrom spezifisch ist. Eine Integration dieses Ansatzes im Geographieunterricht wird derzeit diskutiert (SCHINDLER 2005; CASSEL-GINTZ & BAHR 2008, 2ff.). Die Passatzirkulation ließe sich im Zusammenhang mit dem Sahel-Syndrom thematisieren. Dieses untersucht die Ursachen und Folgen landwirtschaftlicher Übernutzung von Ökosystemen in Ungunsträumen, beispielsweise in der Sahelzone. Die Passatzirkulation erscheint hier relevant, da durch sie die Regenzeiten in den trockenen und wechselfeuchten Tropen näher beschrieben und erklärt werden können. Die Zerstörung tropischer Regenwälder ist ein Symptom des Raubbau-Syndroms. Ebenfalls denkbar wäre eine Verknüpfung mit dem Massentourismus-Syndrom. Hierbei könnten die Zusammenhänge von Massentourismus, den durch das Windsystem bedingten, empfindlichen tropischen Ökozonen und Umweltdegradationen untersucht werden. Die Ursachen und Folgen von Staudamm- und Bewässerungsprojekten thematisiert das Aralsee-Syndrom. In den trockenen Tropen lässt sich dieses Syndrom ebenfalls finden, beispielsweise im Zusammenhang mit dem Assuan-Staudamm. Mit Hilfe der Passatzirkulation könnte die Ursache der Trockenheit in dieser Zone der Tropen erklärt werden. Eine Integration des Syndromansatzes in den Geographieunterricht würde also die gesellschaftliche Relevanz des ansonsten eher abstrakten Themas Passatzirkulation aufzeigen. Zudem würde es vernetzendes Denken fördern, da Zusammenhänge zwischen verschiedenen Sphären hergestellt werden müssen. Weitere Empfehlungen der Interessensforschung betonen, dass Themen und Arbeitsweisen so kombiniert werden sollten, dass die Interessen von Mädchen und von Jungen gleichermaßen Berücksichtigung finden. Da beide Geschlechter altersunabhängig wenig Interesse am Thema Passatzirkulation zeigen, wäre es denkbar, dieses in der oben beschriebenen Weise mit anderen Inhalten zu kombinieren. Zudem könnten beliebte Arbeitsweisen wie Experimente oder Methoden, die neue Medien berücksichtigen, in den Geographieunterricht integriert und mit diesem Thema verknüpft werden. Um das Interesse von Mädchen an den physisch-geographischen Aspekten zu fördern, könnten Arbeitsweisen eingebracht werden, die Mädchen eher bevorzugen, beispielsweise Rollenspiele, bei denen der Umgang der Menschen mit den physisch-geographischen Bedingungen, beispielsweise Trockenheit oder Monsun, thematisiert wird (HEMMER & HEMMER 2010c, 273ff.). Motivierend und interessenfördernd erscheint auch der Ansatz der lernprozessanregenden Aufgabentypen (TULODZIECKI ET AL. 2009, 88ff.). Dieser unterscheidet vier aus Schülersicht lohnende und herausfordernde Aufgabenstellungen: (1) das komplexe Problem, bei dem der Lösungsweg unbekannt ist und erarbeitet wird, (2) die komplexe Entscheidungsaufgabe, bei der die Lerner sich zwischen mindestens zwei alternativen Verfahren oder Maßnahmen entscheiden müssen, (3) die komplexe Gestaltungsaufgabe, bei der etwas erarbeitet

wird und bei der am Ende ein Lernprodukt steht und (4) die komplexe Beurteilungsaufgabe, bei der eine bereits getroffene Maßnahme oder stattgefundene Entwicklung hinsichtlich ihrer Angemessenheit oder ihrer Auswirkungen beurteilt wird. Die Passatzirkulation ließe sich mit allen vier lernprozessanregenden Aufgabentypen verknüpfen. So erscheint beispielsweise ganzjährige Trockenheit auf einer abgeschiedenen tropischen Insel in Äquatornähe als komplexes Problem. Sie ist von großen, offenen Wasserflächen umgeben und es herrschen recht hohe Temperaturen, wodurch viel Wasser verdunstet, es also reichlich Niederschlag geben sollte. Dieses Unstimmige, Widersprüchliche und Rätselhafte macht ein komplexes Problem aus, dessen Lösung in Form einer Lernaufgabe über Teilaufgaben materialgestützt erarbeitet werden könnte (BASTEN 2012). Komplexe Probleme beinhalten beispielsweise auch die Fragestellungen, warum sich im Amazonasbecken Saharastaub finden lässt oder warum Kolumbus die Seeroute südlich des 30°N nach Amerika gewählt hat. Eine Entscheidungsaufgabe könnte thematisieren, wann die Lerner zum Beispiel einen Urlaub auf den Kapverdischen Inseln machen könnten. Die Urlauber müssten zwischen zwei oder mehr möglichen Terminen entscheiden, wobei klimatische Besonderheiten, der Nordostpassat mit Sahara-Staub von Oktober bis Juli und die Regenzeit zwischen August und September zu bedenken wären. Unter Berücksichtigung dieser Wind- und Wetterverhältnisse könnte eine Gestaltungsaufgabe thematisieren, welche Aktivitäten auf den Kapverden möglich sind. Im Rahmen einer Beurteilungsaufgabe könnte es beispielsweise um die Frage gehen, wie sinnvoll Hilfssegel zur Treibstoffersparnis für moderne Containerschiffe auf Routen im Bereich der Tropen wären, handelt es sich doch bei den Passatwinden um relativ konstante Winde. Insgesamt ließe sich die Passatzirkulation also durch Berücksichtigung epochaltypischer Schlüsselprobleme, den Syndromansatz, das Aufzeigen von Lebensnähe und das erweiterte Raumkonzept, die Kombination mit beliebteren Themen und Arbeitsweisen sowie lernprozessanregenden Aufgabenstellungen für Schülerinnen und Schüler zu einem interessanten Inhalt des Geographieunterrichts machen.

Einen weiteren wichtigen Einflussfaktor auf das Lernen zur Passatzirkulation stellen die kognitiven und metakognitiven Fähigkeiten der Schülerinnen und Schüler dar. Eine Entwicklung hin zur wissenschaftlichen Vorstellung erfolgt umso schneller, je eher die Lerner Schlüsselkonzepte des Denkens beherrschen. Eine wichtige Rolle spielt hier das induktive Schlussfolgern vom Konkreten zum Abstrakten durch Klassifizieren, Verallgemeinern, Abstrahieren, Aufstellen von Zusammenhangshypothesen, Vorhersagen von Ereignissen unter Unsicherheit, Fällen von Entscheidungen oder Beurteilen von Problemen oder Risiken. Auch die Fähigkeiten deduktiven Schlussfolgerns vom Abstrakten zum Konkreten durch widerspruchsfreies, folgerichtiges Schließen auf der Grundlage logischer Regeln und allgemein gültiger Gesetzmäßigkeiten beeinflussen den Lernerfolg ebenso wie die Fähigkeit zu problemlösendem oder kreativem Denken sowie zur Metakognition (VANKAN ET AL. 2007, 158ff.). Derzeit wird untersucht, inwiefern Schülerinnen und

Schüler im Geographieunterricht systemisch denken. Problematisch ist dabei, dass hinsichtlich der Begriffsdefinition derzeit noch Klärungsbedarf besteht. Rempfler und Uphues versuchen das systemische Denken über die Aspekte Vernetzungsart (von monokausal über linear bis zu komplex), Anzahl der Systemelemente und ihrer Relationen sowie die Systemstruktur und –prozesse zu fassen. Sie entwickeln ein Kompetenzmodell zur Beschreibung und Förderung von Systemkompetenz im Geographieunterricht und orientieren sich an bisherigen Arbeiten zur Systemkompetenz aus anderen Fächern, wobei das Forschungsinteresse auf den spezifischen Eigenschaften des Mensch-Umwelt-Systems im Fach Geographie liegt. Um geographische Systeme zu beschreiben, greifen sie auf Konzepte der sozialen Ökologie zurück (REMPFLER 2009, REMPFLE & UPHUES 2011a, 4ff.). Die Bedeutung von Metakognition wurde bereits im Zusammenhang mit den Erkenntnissen der didaktischen Vorstellungsforschung erläutert. Luft und Wasserdampf sind unsichtbar und doch scheinbar überall. Entsprechend sind sie gedanklich schwer zu fassen. Welche Rolle Metaphern oder *kinesthetic image schemes* beim Verstehen spielen, sollte mit Lernern thematisiert werden. Luftdichte oder Luftdruck sind beispielsweise metaphorische Vorstellungen, die einen Behälter implizieren. Vernetzendes oder systemisches Denken sowie die übrigen beschriebenen kognitiven und metakognitiven Fähigkeiten lassen sich mit entsprechenden Aufgabenstellungen und Methoden, wie beispielsweise den 10 im Rahmen des *Thinking-Through-Geography*-Ansatzes entwickelten neuen Lernmethoden trainieren, mit denen auch Aspekte der Passatzirkulation thematisiert werden könnten (VANKAN ET AL. 2007).

### **3.3 Konsequenzen in Hinblick auf das Forschungsvorhaben und konkrete Fragestellungen**

Die Passatzirkulation wird in Rheinland-Pfalz laut Lehrplan zwei Mal behandelt. Einmal in Klasse 7, wobei der Fokus auf den Klimazonen liegt und einmal in der gymnasialen Oberstufe im Zusammenhang mit der Allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre. In beiden Fällen können Lerner fächerübergreifend auf Wissen aus dem naturwissenschaftlichen Unterricht zurückgreifen. In der Oberstufe erfolgt im Sinne des Spiralcurriculums eine vertiefte Betrachtung der Passatzirkulation, bei der auch adiabatische Prozesse, Gradientkraft, Coriolisablenkung, etc. Berücksichtigung finden. Entsprechend erscheinen Schülerinnen und Schüler der Jahrgangsstufe 10 als Probanden interessant. Sie verfügen einerseits über wissenschaftsorientierte Vorstellungen, die sie im Rahmen ihres Geographieunterricht oder Unterrichts in anderen Fächern direkt zur Passatzirkulation oder indirekt entwickelt haben. Zudem dürften zahlreiche Alltagsvorstellungen zu den im Rahmen der Passatzirkulation stattfindenden Prozessen vorhanden sein, da Wind- und Wettererscheinungen, aber auch die Entstehung der Jahreszeiten den Alltag der Lerner prägen. Zum anderen lässt sich bei einer Erhebung der Vorstellungen von Schülerinnen und Schülern dieser Jahrgangsstufe ermitteln,

welche Lernervoraussetzungen bei einer vertieften Auseinandersetzung mit der Passatzirkulation in der gymnasialen Oberstufe zu erwarten sind. Klimageographische sowie klimatologische oder meteorologische Inhalte im Geographieunterricht bergen eine spezifische Schwierigkeit. Prägende Bestandteile wie Luft und Wasserdampf, sind unsichtbar, nicht direkt wahrnehmbar und doch sind Menschen in ihrem Alltag stets von Luft und Wasserdampf umgeben. Wie noch zu zeigen sein wird, besteht zu Alltagsvorstellungen zu atmosphärische Phänomenen und Prozessen ein Forschungsdesiderat (siehe Kapitel 6). Spannend erscheint daher die Frage, wie sich Lerner und Wissenschaftler Phänomene und Prozesse im Rahmen der Passatzirkulation vorstellen? Auf welche Schemata, Metaphern und metaphorischen Konzepte greifen sie zurück. Was wird hierdurch beleuchtet, was verdeckt? Inwiefern ähneln sich historische wissenschaftliche Vorstellungen und heutige Vorstellungen von Lernern?

Es wurde herausgearbeitet, dass kognitive und metakognitive Fähigkeiten Einfluss auf die Vorstellungsentwicklung haben. Entsprechend soll im Rahmen des Forschungsvorhabens herausgearbeitet werden, welche Verfahren logischen Schlussfolgerns oder allgemeiner welche Denkvorgänge sich rekonstruieren lassen. Dabei soll untersucht werden, inwiefern die Passatzirkulation von Lernern als auch von Wissenschaftlern systemisch betrachtet wird. Auf den spezifisch geographischen Systembegriff im Sinne der sozialen Ökologie, wie ihn Uphues und Rempfler vorschlagen, muss hierbei jedoch verzichtet werden. Die Passatzirkulation sollte eigentlich als naturgeographisches Subsystem aus der Perspektive der Klimatologie oder Meteorologie (i.w.S. als Geowissenschaft) als auch der Klimagraphie in den Geographieunterricht eingebracht und in das Mensch-Umwelt-System integriert werden. Die spezifische Schwierigkeit besteht darin, zwei grundsätzlich unterschiedliche Zugänge zu Systemen, den physisch-materiellen und den sozialen, miteinander in Einklang zu bringen. Der Systembegriff der Naturwissenschaft orientiert sich an messbaren Energie- oder Stoffflüssen, während der soziologische, an Luhmanns Systemtheorie angelehnte Begriff die Kommunikation als grundlegende Größe betrachtet (REMPFLER & UPHUES 2011a, 4ff.). Im Rahmen dieser Arbeit erweist sich dieses erweiterte, geographische Systemverständnis jedoch als problematisch, da das Miteinbeziehen des humangeographischen Subsystems mit wahrnehmungs- oder kulturgeographischen Aspekten durch die mit ihm verbundene Offenheit und Multiperspektivität (REINFRIED 2010, 16ff.) den Korpus der zu untersuchenden Aussagen sprengen würde. Die Passatzirkulation wird daher nicht als Subsystem, sondern als naturgeographisches System verstanden. Die Forschungsfragen orientieren sich an der Arbeit zur Systemkompetenz von Uphues und Rempfler (REMPFLER & UPHUES 2011b und 2011c): Bei der Klärung der Frage, wie sich Lerner und Wissenschaftler Phänomene und Prozesse im Rahmen der Passatzirkulation vorstellen, soll auch analysiert werden, wie hoch die Anzahl der Systemelemente und ihrer Relationen ist und welche Vernetzungsart (komplex, linear, monokausal) vorliegt.

Die Ergebnisse der Interessenforschung und die Studien zur geschlechterübergreifenden Ähnlichkeit von Alltagsvorstellungen stehen im Widerspruch zueinander. Das Interesse an physisch-geographischen Inhalten ist bei Jungen stärker ausgeprägt als bei Mädchen. Wenn Interesse Einfluss auf das Lernen hat, müssten bei geschlechtsspezifischen Interessen auch entsprechend unterschiedliche Vorstellungen vorhanden sein. In Hinblick auf das Forschungsvorhaben stellt sich daher die Frage, ob und inwiefern sich Vorstellungen von Jungen und Mädchen zu den im Rahmen der Passatzirkulation stattfindenden Prozessen unterscheiden.

Im Rahmen der Arbeit sollen auch didaktische Leitlinien unter Berücksichtigung der Ergebnisse der didaktischen Vorstellungsforschung entwickelt werden. Daher wird der Frage nachgegangen, welche Widersprüche Alltagsvorstellungen enthalten und welche Gemeinsamkeiten und Unterschiede es zwischen wissenschaftlichen Vorstellungen und den rekonstruierten Alltagsvorstellungen gibt. Welches sind die zentralen Schwierigkeiten der Lerner beim Verstehen wissenschaftlicher Vorstellungen? Auf der Grundlage dieses Vergleiches soll auch untersucht werden, welche Potentiale und Gefahren bestimmte Abbildungen und Metaphern beinhalten bzw. welche Interventionen die Entwicklung hin zur wissenschaftlichen Vorstellung fördern könnten.

### **3.4 Zusammenfassung**

Die Passatzirkulation ist Forschungsgegenstand von drei Disziplinen: der Klimatologie, der Klimageographie und der Meteorologie. Im Geographieunterricht sollte das tropische Windsystem jedoch nicht nur rein naturwissenschaftlich betrachtet werden. Die Integration des naturgeographischen und des humangeographischen Subsystems zu einem Mensch-Umwelt-System, wie es in den Bildungsstandards vorgestellt wird, ermöglicht es, den Raum erweitert zu betrachten und für die Schülerinnen und Schüler neue Zugänge zu erschließen. Die Passatzirkulation soll laut Lehrplan in Rheinland-Pfalz in Jahrgangsstufe 7 und vertieft im Grund- oder Leistungsfach in der Oberstufe thematisiert werden. Vorstellungen, die zuvor im Naturwissenschaftsunterricht in den Fächern Physik und Chemie entwickelt wurden, finden im Kontext der Passatzirkulation Anwendung. Neben den Alltagsvorstellungen und den wissenschaftlichen Vorstellungen wurden zwei weitere wichtige Einflussfaktoren auf das Lernen zur Passatzirkulation herausgearbeitet. Interesse und Motivation spielen eine wichtige Rolle. Verschiedene Studien kommen zum Ergebnis, dass die Passatzirkulation altersunabhängig für Jungen und für Mädchen wenig interessant ist. Jungen interessieren sich etwas mehr für physisch-geographische Inhalte als Mädchen. Durch Einbeziehen lebensweltlicher Kontexte, einen erweiterten Raumbegriff, die Kombination mit beliebteren Themen und Arbeitsweisen, epochaltypische Schlüsselprobleme oder den Syndromansatz sowie lernprozessanregende Aufgabenstellungen ließe sich die Passatzirkulation jedoch für Schülerinnen und Schüler interessanter gestalten. Weiterhin wurden die kognitiven und metakognitiven

Fähigkeiten der Lerner als wichtige Einflussfaktoren auf das Lernen zur Passatzirkulation dargestellt. Umso eher Lerner Verfahren induktiven oder deduktiven Schlussfolgerns, des Denkens auf der Metaebene sowie des problemlösenden, vernetzenden oder systemischen Denkens beherrschen, desto effektiver nähern sich Vorstellungen wissenschaftlichen Sichtweisen an.

Auf der Grundlage des bisher Dargestellten werden konkrete Forschungsfragen abgeleitet. Die Probanden sollten die Jahrgangsstufe 10 eines Gymnasiums besuchen, um einerseits erheben zu können, welche Alltagsvorstellungen und wissenschaftsorientierte Vorstellungen aus bisherigem Unterricht vorhanden sind und andererseits analysieren zu können, welche Voraussetzungen die Lerner für eine vertiefte Thematisierung der Passatzirkulation in der Oberstufe mitbringen. Folgende konkrete Fragestellungen liegen der Forschungsarbeit zugrunde:

1. Wie stellen sich Wissenschaftler Phänomene und Prozesse im Rahmen der Passatzirkulation vor?
  - 1.1 Wie haben sich die wissenschaftlichen Vorstellungen historisch entwickelt?
  - 1.2 Mit Hilfe welcher verkörperten Schemata verstehen Wissenschaftler diese Phänomene und Prozesse heute?
  - 1.3 Auf welche metaphorischen Konzepte greifen Wissenschaftler heute zurück? Was wird hierdurch beleuchtet (*highlighting*), was verdeckt (*hiding*)?
2. Wie stellen sich Lerner Phänomene und Prozesse im Rahmen der Passatzirkulation vor?
  - 2.1 Mit Hilfe welcher verkörperten Schemata verstehen Lerner diese?
  - 2.2 Auf welche metaphorischen Konzepte greifen Lerner zurück?
  - 2.3 Inwiefern gibt es geschlechtsspezifische Unterschiede bei den Vorstellungen der Lerner?
3. Welche Gemeinsamkeiten und Unterschiede lassen sich aus dem wechselseitigen Vergleich von Wissenschaftler- und Lernervorstellungen herausarbeiten?
  - 3.1 Welche Lernervorstellungen sind aus wissenschaftlicher Sicht angemessen, welche bedingt angemessen und welche unangemessen?
  - 3.2 Welche inhaltlichen Parallelen lassen sich zwischen historischen wissenschaftlichen Vorstellungen und aktuellen Vorstellungen von Lernern nachweisen?
4. Welche Vermittlungsstrategien lassen sich unter Berücksichtigung der Erkenntnisse der didaktischen Vorstellungsforschung ableiten?
  - 4.1 Welches sind die zentralen Schwierigkeiten der Lerner beim Verstehen der wissenschaftlichen Vorstellungen?
  - 4.2 Welches sind die aus wissenschaftlicher Sicht zentralen Konzepte, die für ein angemessenes Verstehen der Passatzirkulation notwendig erscheinen?
  - 4.3 Wie lassen sich diese zentralen Konzepte unter Berücksichtigung der zentralen Schwierigkeiten der Lerner erfolgreich vermitteln?

## 4 Forschungsdesign und –methodik

### 4.1 Das Modell der didaktischen Rekonstruktion als Forschungsdesign

Das Forschungsdesign orientiert sich am Modell der didaktischen Rekonstruktion (KATTMANN ET AL. 1997, 3ff.; KATTMANN 2007, 93ff.), einem konstruktivistischen Ansatz, der didaktische Überlegungen aus einem wechselseitigen Vergleich von Wissenschaftler- und Lernerpositionen ableitet. Beide Seiten sind dabei als gleichberechtigt zu betrachten (siehe Abbildung 7).

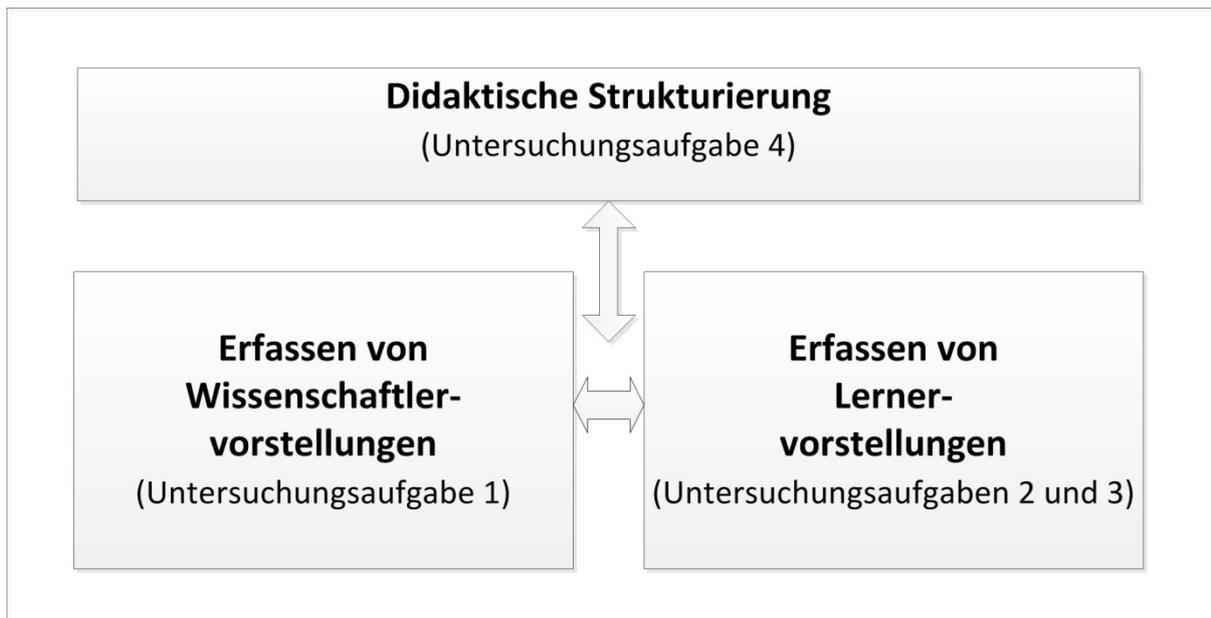


Abbildung 7: Das Forschungsdesign im Überblick (eigene Darstellung).

Im Rahmen einer fachlichen Klärung sollen wissenschaftliche Vorstellungen zu einem Thema analysiert werden. Diese werden als Konstrukte einer Wissenschaftlergemeinschaft betrachtet, die zwar auf der Grundlage von Gütekriterien entwickelt wurden, jedoch durchaus subjektive Ansichten enthalten können und in einen bestimmten Prozess ihrer Genese eingebettet sind. Sie werden durch bestimmte gesellschaftlich-normative Rahmenbedingungen, aber auch ethische oder epistemologische Überzeugungen der Wissenschaftler geprägt. Wissenschaftliche Vorstellungen entstehen in einem Kontext und erfüllen darin eine bestimmte Funktion. Sie haben Grenzen. Wissenschaftler greifen, bewusst oder unbewusst, auf metaphorische Konzepte zurück, um Vorstellungen fassen zu können. Die Vorstellungen der Lerner zu diesem Thema werden ebenfalls erhoben. Welche Prozesse oder Erfahrungen liegen ihrer Genese zugrunde? Wie sind die Vorstellungen strukturiert? Welche Rolle spielen Metaphern oder Vergleiche? Welche Belege führen Lerner für ihre Behauptungen an? Handelt es sich um Alltagsvorstellungen oder wissenschaftsorientierte Vorstellungen? In welche größeren Zusammenhänge ordnen sie ihre Vorstellungen ein? Welche Wertungen oder Sinnzuschreibungen wenden sie an? Die didaktische Strukturierung erfolgt schließlich auf der Grundlage eines wechselseitigen Vergleichs von Wissenschaftlervorstellungen und den Vorstellungen der Lerner. Hierbei werden Gemeinsamkeiten

und Unterschiede zwischen beiden Positionen herausgearbeitet. Erstere können als Anknüpfungspunkte dienen, letztere beinhalten womöglich Widersprüche, sodass darüber kognitive Konflikte initiiert werden können. Es ist zu klären, wie effektives und zielführendes Lernen auf der Grundlage der Vorstellungen der Lerner stattfinden kann. Im Rahmen dieser didaktischen Überlegungen werden auch metakognitive Aspekte berücksichtigt: Woran lassen sich beispielsweise Grenzen wissenschaftlicher Vorstellungen den Schülerinnen und Schülern aufzeigen, wie Strukturen und die Rolle von Metaphern?

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wird dieses Modell adaptiert<sup>4</sup>. In der fachlichen Klärung werden die wissenschaftlichen Vorstellungen zur Passatzirkulation und den damit verbundenen Phänomenen und Prozessen analysiert. Dabei sollen aktuelle und historische Vorstellungen herausgearbeitet und ebenfalls hinsichtlich der Forschungsfragen untersucht werden (Untersuchungsaufgabe 1). Die Vorstellungen der Lerner sollen durch zwei Untersuchungsaufgaben erfasst werden. Bisherige empirische Arbeiten über Vorstellungen von Schülerinnen und Schülern zur Passatzirkulation und damit verbundenen Phänomenen und Prozessen werden analysiert (Untersuchungsaufgabe 2). Die Vorstellungen der Schülerinnen und Schüler der 10. Jahrgangsstufe des Gymnasiums sollen erhoben und hinsichtlich der Forschungsfragen reflektiert werden (Untersuchungsaufgabe 3). Auf der Grundlage des wechselseitigen Vergleichs von wissenschaftlichen Vorstellungen und Vorstellungen der Lerner werden schließlich didaktische Leitlinien formuliert. Es handelt sich hierbei um allgemeine Richtlinien oder Empfehlungen zur Didaktisierung der Passatzirkulation auf der Grundlage der Vorstellungen der Lerner (Untersuchungsaufgabe 4). Abschließend werden die Ergebnisse der fachlichen Klärung, des Erfassens der Lernerperspektiven und der didaktischen Strukturierung zusammengefasst und diskutiert.

Die einzelnen Untersuchungsaufgaben sind miteinander vernetzt. Die Analyse bisheriger empirischer Arbeiten zu den Vorstellungen von Lernern setzt die fachliche Klärung voraus, da ohne sie die die Passatzirkulation prägenden Phänomene und Prozesse nicht eindeutig identifiziert werden könnten. Umgekehrt werden durch die Analyse bisheriger empirischer Arbeiten Forschungsdesiderata identifiziert, d.h. es wird klar, welche Aspekte bisher wenig erforscht sind oder welche Schülerinnen und Schülern Schwierigkeiten bereiten. Entsprechend müssen die Schwerpunkte bei der fachlichen Klärung ausgelegt werden. Die eigentliche Empirie, Untersuchungsaufgabe 3, erfolgt auf der Basis von Untersuchungsaufgabe 1 und 2, da durch sie die entsprechenden Schwerpunkte hinsichtlich der

---

<sup>4</sup> Ursprünglich als didaktisches Modell für den naturwissenschaftlichen Unterricht entwickelt (KATTMANN ET AL. 1997, 3ff.; KATTMANN 2007, 93ff.), wird für die Politikdidaktik eine Adaption und Erweiterung um eine normativ-legitimierende Untersuchungsaufgabe 'Zielklärung' vorgeschlagen (LANGE 2007, 58). In der Geographiedidaktik wird das Modell ebenfalls diskutiert (REINFRIED 2006b, 68f.; REINFRIED 2010, 16ff.; OTTO & SCHULER 2012, 156ff.). Hier geht es u. a. um die Frage, inwiefern humangeographische Inhalte unter Berücksichtigung von Multiperspektivität didaktisch rekonstruierbar sind. Im Rahmen dieser Arbeit wird das Modell in Bezug auf naturwissenschaftliche Inhalte herangezogen (siehe Kapitel 3).

Vorstellungen der Lerner benannt werden, die es zu untersuchen gilt. Die erhobenen Vorstellungen werden jedoch bestimmte Schwierigkeiten der Lerner offenbaren und die Lerner werden bestimmte Aspekte von sich aus vertieft darstellen, was wiederum Auswirkungen auf die fachliche Klärung hat, da die entsprechenden wissenschaftlichen Vorstellungen untersucht werden müssen. Die didaktische Strukturierung steht ebenfalls in Wechselwirkung zu den Lerner- und Wissenschaftlerperspektiven, da aus dem wechselseitigen Vergleich auch neue Fragen hinsichtlich der Untersuchungsaufgaben 1, 2 und 3 resultieren werden. Die lineare Anordnung und die Nummerierung der Untersuchungsaufgaben in dieser Arbeit dürfen also nicht darüber hinwegtäuschen, dass es sich bei der didaktischen Rekonstruktion tatsächlich um einen iterativen und rekursiven Prozess handelt (KATTMANN ET AL. 1997, 13f.).

## **4.2 Qualitatives, leitfadengestütztes Interview als Erhebungsinstrument**

Die vorliegende Arbeit nutzt qualitative Forschungsmethoden entsprechend ihrer Zielsetzung, Vorstellungen in ihrer Tiefe und Individualität zu erfassen. Die Studie geht dabei explorierend vor, d.h. die zu erhebenden Vorstellungen sind bisher noch unbekannt und sollen im Rahmen des Forschungsprozesses entdeckt werden (BOHNSACK 2010, 14ff.). Das Erhebungsinstrument für die Untersuchungsaufgabe 3 sollte daher eine Problemzentrierung ermöglichen, da Vorstellungen zur Passatzirkulation und bestimmte damit verbundene Phänomene und Prozesse thematisiert werden, andererseits offen sein und Interaktivität zulassen, d.h. die Möglichkeit eröffnen, bestimmte aus Sicht des Forschers interessante Vorstellungen zu vertiefen bzw. im Klärungsfall zu hinterfragen. Geeignet hierzu erscheint das leitfadengestützte Interview (HOPF 2012, 349ff.). Der Interviewer ordnet im Vorfeld die Fragen oder Impulse thematisch bestimmten Bereichen zu, wobei er möglichst offene Fragen an den Anfang eines Themenbereiches stellt und die Lenkung oder Vertiefung gegebenenfalls in Abhängigkeit von den Lernaussagen über bestimmte Impulse oder materialgestützte Interventionen erfolgen lässt (HELFFERICH 2011, 167ff.; SCHMIDT 2012, 447ff.). Entsprechend können alle Themenbereiche, die im Rahmen der fachlichen Klärung bzw. der Analyse der Ergebnisse aus bisherigen empirischen Arbeiten zu Alltagsvorstellungen zur Passatzirkulation oder verwandten Phänomenen als relevant identifiziert wurden, zentriert und thematisiert werden. Da Vorstellungen nicht nur sprachlich-abstrakt, sondern auch konkret-bildlich codiert sind, sollen die Probanden, sofern sie es für sinnvoll erachten, ergänzend zu ihren Aussagen Zeichnungen erstellen. Als vorteilhaft haben sich in der Pilotierungsphase im Januar und Februar 2011 Gruppeninterviews mit einer Größe von drei Schülerinnen oder Schülern erwiesen, da hierdurch Diskussionen unter den Lernenden hinsichtlich ihrer Alltagsvorstellungen und ihrer Begründung gefördert werden. Da untersucht

werden soll, inwiefern sich Vorstellungen geschlechtsspezifisch unterscheiden, werden reine Jungen- und reine Mädchengruppen gebildet.

Im Rahmen der Interviewstudie werden bestimmte Gütekriterien qualitativer Forschung berücksichtigt. Im Gegensatz zu quantitativen Forschungsvorhaben können die klassischen Gütekriterien wie Objektivität und Reliabilität nur bedingt eingehalten werden (STEINKE 2012, 319ff.; HELFFERICH 2011, 154ff.). Qualitative Methoden beinhalten immer Schritte der Interpretation. Ihre Stärken liegen gerade in der Tiefe dieser Auseinandersetzungen mit bestimmten Aussagen oder Inhalten. Die Ergebnisse sind aber aufgrund der kleinen Probandenzahl nicht repräsentativ. Hinsichtlich ihrer Validität lassen sich jedoch einige Kriterien berücksichtigen. Es handelt sich einerseits um die Auswahlgültigkeit (MERKENS 2012, 286ff.). Probanden sind Schülerinnen und Schüler der Jahrgangsstufe 10 des Gymnasiums. Um zu gewährleisten, dass die identifizierten Vorstellungen entwicklungs- und altersgemäß sind, wird darauf geachtet, dass die Schülerinnen und Schüler in naturwissenschaftlichen Fächern in einem mittleren Leistungsniveau liegen. Zudem wird das Thema Passatzirkulation im Vorfeld der Interviewstudie nicht bekannt gegeben, um zu verhindern, dass sich ausschließlich Lerner melden, die sich für das Thema interessieren und deren Vorstellungen möglicherweise wissenschaftsorientierter als durchschnittliche sind. Um eine breite Streuung zu erreichen, wurden Lerner aus insgesamt vier Gymnasien in Landau in der Pfalz ausgewählt. Interviews mit Schülerinnen und Schülern des Gymnasiums, an dem der Autor selbst unterrichtet, wurden lediglich im Rahmen der Vorstudie durchgeführt. In der eigentlichen Studie werden ausschließlich Lerner aus Schulen interviewt, an denen der Verfasser nicht als Lehrer tätig ist, um ein möglichst entspanntes Verhältnis zwischen Probanden und Interviewer zu erzielen, damit Lerner offen Alltagsvorstellungen artikulieren und reflektieren und nicht aus Leistungsdenken wissenschaftliche Vorstellungen reproduzieren, von denen sie nicht überzeugt sind oder sich gar ganz zurückhalten. Die Anzahl der Probanden ergibt sich aus dem Prinzip der Sättigung, d.h. es werden solange Interviews durchgeführt, wie neue Vorstellungen erhoben werden können (MERKENS 2012, 290ff.; STEINKE 2012, 328). Es hat sich herausgestellt, dass diese Sättigung nach 10 Interviews mit insgesamt 18 Mädchen und 12 Jungen, die im Erhebungszeitraum Mai-Juni 2011 stattfanden, erreicht wurde. Ein weiteres Gütekriterium qualitativer Forschung bezieht sich auf die Verfahrensgültigkeit (STEINKE 2012, 324ff.). So werden alle Fragen oder Impulse des Leitfadens im Vorfeld kritisch geprüft hinsichtlich ihrer Relevanz, ihrer Formulierung, ihrem Kontext, also ihrer Position innerhalb des Interviews. Auch die Fragetypen werden reflektiert. Nach Möglichkeit werden Operatoren verwendet, die den Schülerinnen und Schülern vertraut sind. Interventionen und Impulse werden hinsichtlich ihrer Suggestivität hinterfragt. Die Interviews werden videographisch dokumentiert und mittels spezieller Software (F5) unter Einhaltung folgender Regeln transkribiert: Zitierte Aussagen, beispielsweise vorgelesene Impulse oder Fragen, werden in Anführungszeichen

gesetzt. Die Videodokumentation ermöglicht es, nonverbale Äußerungen sowie den Entstehungsprozess von Zeichnungen mit auszuwerten. Während der Transkription werden diese Aspekte beschrieben und in Klammern gesetzt. Auch Verzögerungen oder unbestimmbare Laute werden so festgehalten. Während des Interviews soll die variierende Wiederholung inhaltlicher Aspekte, beispielsweise der Windentstehung in verschiedenen Kontexten, eine interne Validierung gewährleisten.

Auf Struktur-lege-Techniken oder sonstige Concept-Mapping-Verfahren, wie sie bei systemisch geprägten Inhalten üblich sind (z.B. in SCHULER 2011, 148ff.), wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet, da während der Vorstudien festgestellt wurde, dass diese Verfahren den Probanden erheblich Schwierigkeiten bereiten. Dies könnte daran liegen, dass zentrale Elemente des Systems Passatzirkulation schwer zu fassen sind, da sie unsichtbar und zum Teil abstrakt erscheinen. Von speziellen Methoden zur Reflexion von Zeichnungen während des Interviews, beispielsweise Drawing-Verfahren (WHITE & GUNSTONE 1992), wird ebenfalls abgesehen, da dies für die Verwendung der Zeichnungen im Sinne einer Datentriangulation nicht notwendig erscheint (FLICK 2011, 36ff.) und dadurch andere Schwerpunktsetzungen möglich werden. Auf Vermittlungsexperimente (KOMOREK & DUIT 2004, 619ff.) oder ähnliche Methoden, mit denen Vorstellungsentwicklungen dokumentiert werden, wird ebenfalls nicht zurückgegriffen, da im Forschungsinteresse vor allem die Alltagsvorstellungen und ihre Erfahrungshintergründe stehen. Eine Analyse der Vorstellungsentwicklungen der Schülerinnen und Schüler im Rahmen einer Evaluation von durch die didaktische Strukturierung entwickelten Lernangeboten, wie sie in anderen Forschungsarbeiten zu finden ist (z.B. in NIEBERT 2010), lässt sich aufgrund der Komplexität des Themas sowie der Menge und Vielfalt der zu erwartenden Vorstellungen aus Platzgründen leider nicht bewerkstelligen.

#### **4.3 Qualitative Inhaltsanalyse unter Berücksichtigung der systematischen Metaphernanalyse und der Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens als Analyseinstrument**

Für die Auswertung der Interviews als auch der Untersuchungen im Rahmen der fachlichen Klärung muss eine Methode gewählt werden, die der Zielsetzung entspricht. Es sollen einerseits Alltagsvorstellungen oder wissenschaftsorientierte Vorstellungen von Schülerinnen und Schülern auf der Basis ihrer Aussagen und nonverbaler Signale, die transkribiert vorliegen, und ihrer Zeichnungen rekonstruiert werden. Zum anderen sollen Vorstellungen von Wissenschaftlern herausgearbeitet werden. Da die Passatzirkulation Forschungsgegenstand dreier Disziplinen ist, bietet es sich an, diese drei Perspektiven auf das Phänomen zu berücksichtigen. Im Rahmen der fachlichen Klärung werden Aussagen von Meteorologen, Klimatologen und Klimageographen zur Passatzirkulation zu untersuchen sein. Es werden daher gängige Lehrwerke aus diesen drei Bereichen ausgewählt. Zudem

sollen historische wissenschaftliche Arbeiten untersucht werden. Als Methode zur Analyse von Lerner- und Wissenschaftlernaussagen erscheint die qualitative Inhaltsanalyse angemessen (MAYRING 2008; GROPENIEBER 2008, 172ff.). Sie soll im Sinne einer methodischen Triangulation mit der systematischen Metaphernanalyse (SCHMITT 2005, 358ff.) und der Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens (GROPENIEBER 2007, 105ff.) kombiniert werden. Die komplementären Methoden eröffnen durch unterschiedliche Perspektiven neue Zugänge zum Forschungsgegenstand (FLICK 2011, 41f.). Bei der qualitativen Inhaltsanalyse sind vier Schritte zu berücksichtigen. (1) Unter einer bestimmten Leitfrage werden die Aussagen redigiert, d.h. es werden bedeutungstragende Passagen selektiert und paraphrasiert, Redundanzen oder Füllsätze identifiziert. In Bezug auf die Untersuchungsaufgabe 3 heißt dies konkret, dass die dialogisch vorliegenden Lernaussagen in einen kohärenten Text überführt werden müssen. Beiträge oder Kommentare der übrigen Lerner werden daher paraphrasiert und in Klammern gesetzt, sofern dies relevant erscheint, um den Sinnzusammenhang der Äußerungen des Lerners zu verstehen. Die Zeichnungen finden in dieser Phase Berücksichtigung, da deren Inhalte interpretiert und als Ergänzung oder Erläuterung zu den Aussagen der Lerner eingebracht werden. Diese erscheinen ebenso in Klammern wie zu beschreibende nonverbale Signale. Bei der fachlichen Klärung erscheint das Redigieren der Aussagen etwas leichter, da mit den Lehrwerken bereits kohärente Texte vorliegen. Doch auch hier müssen die in Hinblick auf die Leitfrage relevante Abschnitte selektiert und unter Umständen paraphrasiert werden. (2) Der darauf folgende Schritt umfasst das thematische Ordnen der redigierten Aussagen. Der Text wird hinsichtlich seiner Kohärenz überprüft, bedeutungsgleiche Aussagen werden gebündelt und eventuelle Widersprüche identifiziert und gekennzeichnet. (3) Im Rahmen der Explikation wird der so entstandene Text hinsichtlich seiner Sprache, der vom Wissenschaftler oder Lerner in diesem Kontext verwendeten Metaphern sowie der Strukturen der Vorstellungen, der ihnen innewohnenden basalen Logiken unter Berücksichtigung der Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens analysiert. Entsprechend vorsichtig und zurückhaltend ist die Glättung der sprachlichen Äußerungen in den beiden vorherigen Schritten vorzunehmen. Die Explikation umfasst auch das Herausarbeiten von Vergleichen oder Begründungen, den Verfahren logischen Schlussfolgerns sowie Bezügen zur Lebenswelt und Erfahrbarkeit. Bei der fachlichen Klärung ist auch die historische Komponente zu berücksichtigen. Inwiefern haben sich wissenschaftliche Vorstellungen im Laufe der Zeit verändert? Welche Probleme oder offenen Fragen gibt es hierbei? Zur Beantwortung dieser Fragen sollte auch Sekundärliteratur herangezogen werden. (4) In einem letzten Schritt, der sogenannten Strukturierung, werden die Aussagen der Wissenschaftler und Lerner verallgemeinert und nochmals paraphrasiert. Diese kompakten Aussagen können später für den wechselseitigen Vergleich von Wissenschaftler- und Lernervorstellungen herangezogen werden.

Neben der qualitativen Inhaltsanalyse werden die wissenschaftlichen Texte und die transkribierten Lernaussagen im Sinne einer methodischen Triangulation nach dem Verfahren der systematischen Metaphernanalyse (SCHMITT 2005, 358ff.) untersucht. Dieses erfolgt in fünf Schritten: (1) Ausgehend von den gleichen inhaltlichen Fragen, die das Redigieren im Rahmen der qualitativen Inhaltsanalyse leiten, erfolgt eine Selektion der relevanten Textbereiche. (2) Sämtliche Metaphern in diesen Abschnitten werden mitsamt ihrer Zielbereiche herausgearbeitet. (3) Sie werden nun entsprechend ihrer Quellbereiche geordnet. (4) Metaphorische Konzepte werden rekonstruiert, indem Metaphern, die einen gemeinsamen Quell- und Zielbereich haben, identifiziert werden. Diese können nach der Syntax 'Quellbereich ist Zielbereich' dargestellt werden. (5) Diese metaphorischen Konzepte finden Berücksichtigung bei der Explikation im Rahmen der qualitativen Inhaltsanalyse. Es wird analysiert, welche Aspekte durch sie verdeckt und welche beleuchtet werden können. Der letzte Schritt ist stark interpretativ, da das Verstehen von Metaphern ein individueller Vorgang ist, der von den Fähigkeiten, dem Vorwissen und den Einstellungen des Wissenschaftlers bzw. Lernalters abhängig ist. Daher findet hier im Sinne einer Validierung ein Abgleich mit den Kontexten statt, die im Rahmen der Explikation analysiert werden.

Bei der Auswahl der wissenschaftlichen Texte wird darauf geachtet, dass diese aktuell sind und als gängige Lehrwerke in der Meteorologie, Klimatologie und Klimageographie eingesetzt werden. Hierzu werden entsprechende Gespräche mit Hochschuldozenten geführt. Die historischen Arbeiten sollten wichtige Ansichten und Kontroversen der damaligen Zeit aufzeigen. Es werden Texte ausgewählt, die mit ihrer Veröffentlichung gängige Lehrmeinungen widerlegt und für einen bestimmten Zeitabschnitt als wissenschaftlich anerkannt gegolten haben. Eine intensive Diskussion um die Passatzirkulation erfolgt seit der frühen Neuzeit, da das Thema im Zuge der Entdeckungen durch Segelschiffahrt an politischer Bedeutung gewinnt. Entsprechend erscheint eine Auswahl der Texte ab diesem Zeitraum als sinnvoll. Die Güte der Ergebnisse der fachlichen Klärung und des Erfassens der Lernerperspektiven soll durch die begründete Auswahl der Quellen bzw. Probanden, die vollständige und genaue Dokumentation des Analyseverfahrens sowie eine kommunikative Validierung durch regelmäßiges, kritisches Überprüfen der Interpretationen durch andere Vorstellungsforscher gewährleistet werden (STEINKE 2012, 323ff.; HELFFERICH 2011, 154ff.). Der Abgleich der eigenen Befunde mit den Ergebnissen bisheriger Arbeiten zu Alltagsvorstellungen, die im Rahmen der Untersuchungsaufgabe 2 dargestellt werden, soll ebenfalls die Validität erhöhen.

#### **4.4 Zusammenfassung**

Das Modell der didaktischen Rekonstruktion bildet den Forschungsrahmen dieser Arbeit, in dem Vorstellungen von Lernern und von Wissenschaftlern, die als gleichwertig zu betrachten sind, analysiert werden. Auf der Grundlage eines wechselseitigen Vergleiches sollen didaktische Leitlinien

entwickelt werden. Fragen oder Schwerpunktsetzungen, die im Zuge dieser Untersuchungsaufgaben aufkommen, haben wiederum Auswirkungen auf das Erfassen der Lerner- und Wissenschaftlerperspektiven. Es handelt sich also um ein iteratives und rekursives Verfahren, d.h. alle Untersuchungsaufgaben sind miteinander verknüpft und können nicht linear abgearbeitet werden, sondern sie beeinflussen sich während des Forschungsprozesses gegenseitig. Im Rahmen der Dissertation können nur die Ergebnisse dieses Verfahrens dargestellt werden.

Als Instrument zum Erfassen der Vorstellungen der Lerner wird das leitfadengestützte Interview ausgewählt. Es ermöglicht einerseits eine Problemzentrierung, andererseits Offenheit und Interaktivität. Die Schülerinnen und Schüler sollen gegebenenfalls Zeichnungen anfertigen, die sie zur Erläuterung ihrer Aussagen heranziehen. Diese finden im Sinne einer Datentriangulation Berücksichtigung. Gütekriterien qualitativer Forschung werden beachtet: Der gesamte Prozess der Planung, Durchführung und Auswertung der Empirie wird dokumentiert. Die Auswahl der Probanden sowie die Gestaltung des Interviewleitfadens wird kritisch reflektiert: Im Zeitraum Mai-Juni 2011 findet eine Interviewstudie mit insgesamt 30 Schülerinnen und Schülern (18 Mädchen, 12 Jungen) in Gruppen zu je drei Jungen oder drei Mädchen statt. Die Anzahl der Interviews ergibt sich aus dem Prinzip der Sättigung. Bei der Auswahl der Probanden wird auf eine möglichst breite Streuung (4 Gymnasien in Landau in der Pfalz) und einen mittleren Leistungsstand der Schülerinnen und Schüler geachtet. Zudem werden Inhalte des Interviews im Vorfeld nicht bekannt gegeben.

Als Analyseinstrument wird die qualitative Inhaltsanalyse unter Berücksichtigung der systematischen Metaphernanalyse und der Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens herangezogen. Diese eröffnen durch ihre unterschiedlichen Perspektiven neue Zugänge zum Forschungsgegenstand und ergänzen sich im Sinne einer methodischen Triangulation gegenseitig. Die Methoden eignen sich sowohl zur Auswertung der Interviewstudie als auch zur Analyse wissenschaftlicher Texte. Um die wissenschaftlichen Vorstellungen herauszuarbeiten, werden gängige Lehrwerke aus der Klimatologie, der Meteorologie und der Klimageographie sowie historische Texte untersucht. Auch hierbei soll die Auswahlgültigkeit als Gütekriterium qualitativer Forschung bedacht werden. Im Sinne einer kommunikativen Validierung werden die Ergebnisse dieses Analyseprozesses mit anderen in der didaktischen Vorstellungsforschung tätigen Wissenschaftlern diskutiert werden. Zudem sollen die Befunde mit den Ergebnissen bisheriger Arbeiten zu Alltagsvorstellungen verglichen werden.

## 5 Fachliche Klärung

### 5.1 Historische wissenschaftliche Vorstellungen zur Passatzirkulation

Alltagsvorstellungen ähneln häufig historischen wissenschaftlichen Vorstellungen. In beiden Fällen wurden bzw. werden Erfahrungen im Mesokosmos herangezogen, da Mikro- und Makrokosmos aufgrund fehlender technischer Hilfsmittel nicht zugänglich waren bzw. sind. Mittels qualitativer Inhaltsanalyse werden daher historische wissenschaftliche Aussagen zur Passatzirkulation von Francis Bacon, Galileo Galilei, Edmond Halley und George Hadley untersucht. Die Leitfragen lauten: Welche Vorstellungen zur Ursache der Passatwinde existieren? Mit welchen Argumenten werden Vorstellungen widerlegt bzw. begründet? Die Auswahl der vier Quellentexte begründet sich dadurch, dass sie jeweils mit ihrer Veröffentlichung gängige Lehrmeinungen widerlegt und für einen bestimmten Zeitabschnitt als wissenschaftlich anerkannt gegolten haben. Eine wissenschaftliche Auseinandersetzung mit der Passatzirkulation erfolgt seit Beginn der Neuzeit. Im Zeitalter der Entdeckungen durch die Segelschiffahrt gewinnen Erkenntnisse über Winde an politischer Bedeutung.

#### 5.1.1 Tropische Ostwinde aufgrund sich drehender Himmelsphären

**DOKUMENT:** Francis Bacon (1622): „Historia naturalis et experimentalis ad condendam philoAnnem“. 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 1955, S.56f.

#### **GEORDNETE AUSSAGEN:**

Bacon befasst sich mit der Erklärung eines Phänomens, das von den Entdeckungsreisenden der frühen Neuzeit zahlreich beschrieben wurde: die beständig wehenden Ostwinde im Bereich zwischen den Wendekreisen. Er stellt hierzu auf der Grundlage fremder Wind-Beschreibungen eigene theoretische Überlegungen über deren Ursache an. Bacon schließt dabei eine zeitgenössische Erklärung, die auf dem Ptolemäischen Weltbild basiert, das geozentrisch ausgerichtet war, nicht grundsätzlich aus: die Möglichkeit einer mitreißenden Wirkung der sich nach Westen drehenden Himmelsphären auf die Atmosphäre. Dass diese Wirkung nur im Bereich der Tropen Ostwinde hervorruft, liegt seiner Ansicht nach an der größeren Umdrehungsgeschwindigkeit der Sphären aufgrund der größeren Breitenkreise. Bacon weist nun darauf hin, dass auch ein anderer Grund ursächlich für die Passatwinde sein könnte: Die Sonne könnte im Bereich der Tropen Wärme erzeugen, die die Luft ausdehnt. Infolge der Ausdehnung entstehe ein Anstoß benachbarter Luft, der die Passatwinde erzeuge. Weil die Sonne sich im Rahmen ihrer sphärischen Drehung von Ost nach West bewege, stoße Luft andere Luft von Ost nach West an. Jener Anstoß sei in den Tropen, wo die Sonne heißer brenne, bedeutender, als außerhalb der Tropen.

**EXPLIKATION:**

Francis Bacon widmet sich ab den 20er Jahren des 17. Jahrhunderts verstärkt der Naturphilosophie. Seine Leistungen liegen v.a. im methodologischen Bereich: Von der Rechtsprechung kommend, propagiert Bacon ein induktives Vorgehen, um die Ursachen von Naturprozessen zu erschließen. Er entwirft die Utopie zentraler Forschungsstätten, in denen empirische Einzelerkenntnisse zusammengetragen und so der Vermehrung und besseren Fundierung menschlichen Wissens dienen und die Menschheit in die Lage versetzen, über die Natur zu herrschen (BÄUMER-SCHLEINKOFER 1999, 37). Bacon erläutert zwei mögliche Ursachen für die tropischen Ostwinde: die allgemeine Wirkung der sich um die Erde von Ost nach West drehenden Himmelsphären sowie die Wirkung einer sich um die Erde drehenden Sonne. Ersteres repräsentiert den Zeitgeist, letzteres dürfte die von Bacon aufgrund seiner wissenschaftsmethodischen Ausrichtung bevorzugte Erklärung sein (vgl. hierzu auch SHAPIN 1998, 50). In beiden Fällen basieren seine Ausführungen auf dem Ptolemäischen Weltbild, das bis Anfang des 17. Jahrhundert in Europa weit verbreitet war (KÖRBER 1987, 75f. und SCHNEIDER-CARIUS 1955, 41ff.). Nach Ptolemäus (etwa 100 n. Chr.\*) steht die (hier kugelförmige) Erde unbeweglich im Mittelpunkt des Universums, während die Sterne, Planeten sowie Sonne und Mond sich auf bestimmten, kreisförmigen Bahnen (Sphären) um die Erde bewegen. Insgesamt werden 11 Sphären unterschieden. Dieser Kosmos besteht aus fünf Elementen: Erde und Wasser sind die schweren Elemente, sie streben dem Zentrum des Universums, der Erde, zu. Luft als leichteres Element strebt seiner natürlichen Sphäre, der Atmosphäre, zu. Feuer als leichtestes Element strebt ebenfalls seiner eigenen über der Atmosphäre angeordneten Sphäre zu. Aus dem fünften Element, dem sog. Äther, bestehen die höheren Sphären. Sind die Elemente außerhalb ihrer natürlichen Orte, üben sie durch eine ihnen innewohnende Kraft eine Bewegung in Richtung ihrer natürlichen Sphäre aus. Schwere darf also nicht im physikalischen Sinn verstanden werden, sondern vielmehr teleologisch, animistisch, den Zustand einer kosmischen Ordnung herstellen wollend (KRAFFT 1999d, 348ff.; FREUDIG ET AL. 1996, 336 sowie SHAPIN 1998, 30ff.).

Bacons zweite Erklärung basiert auf der Beobachtung, dass sich das Volumen erwärmter Luft vergrößert. Er konnte dies experimentell nachweisen, da seit Ende des 16. Jahrhunderts entsprechende Instrumente, sog. Thermoskope, vorhanden waren. Die Geräte bestanden aus einer Hohlkugel, die einen röhrenförmigen Ausgang hatte, der unter die Wasseroberfläche eines entsprechend gefüllten Behälters mündete. Wurde die Luft in der Hohlkugel erhitzt, konnte man eine Volumenausdehnung am Wasserstand in der Röhre erkennen (KÖRBER 1987, 116 und SCHNEIDER-CARIUS 1955, 54ff.). Ursächlich für diese Volumenausdehnung war nach dem Ptolemäischen Weltbild ein Wärmestoff, der als Ausdünstung des Feuers in die Luft eindrang und damit sein Volumen vergrößerte (KÖRBER 1987, 113f. und SCHNEIDER-CARIUS 1955, 18ff.). Bacon schließt von dieser Beobachtung auf ein Prinzip zur Windentstehung in den Tropen: Aufgrund des Tagesganges der

Sonne und ihrer Intensität führe die Volumenausdehnung dazu, dass angrenzende Luft ähnlich wie bei einem mechanischen Uhrwerk einen Impuls erhält, der westwärts weitergetragen wird und für uns als Wind spürbar ist (vgl. hierzu SHAPIN 1998, 43ff. und 171ff.).

Bacon geht in beiden Erklärungen von vorherrschenden Ostwinden aus. Tatsächlich dürften zu dieser Zeit schon genauere See-Wind-Karten vorgelegen haben, die die Tendenz zu Nord- bzw. Südostwinden kenntlich gemacht haben (vgl. SCHNEIDER-CARIUS 1955, 54).

**STRUKTURIERUNG:**

Francis Bacon gibt zwei alternative Erklärungen für die tropischen Ostwinde. Einmal nennt er als mögliche Ursache der Passatwinde die mitreißende Wirkung höherer Sphären. Nach dieser Vorstellung kreisen Sphären um die Erde. Ursächlich für ihre Bewegung ist eine göttliche Kraft. Die Sphären ziehen die Luft mit sich. Die Geschwindigkeit der kreisenden Sphären ist aufgrund der Kugelgestalt der Erde über den Tropen am größten. Im Bereich der Tropen ist daher das Mitziehen der Luft am stärksten und spürbar als tropischer Ostwind. Eine zweite mögliche Erklärung zieht Bacon aus experimentell gewonnenen Erkenntnissen. Demnach stellt der Passatwind eine Art mechanische Reaktion sich ausdehnender Luft dar. Die Sonne umkreist als Teil einer Sphäre die Erde von Ost nach West. Im Bereich der Tropen scheint die Sonne am heißesten. Wärme dringt in die dortige Luft ein und vergrößert ihr Volumen. Vergrößerte Luft stößt angrenzende Luft an, ähnlich wie in einem mechanischen Uhrwerk. Der Prozess verlagert sich stetig westwärts aufgrund des Tagesganges der Sonne.

**5.1.2 Tropische Ostwinde als Zurückbleiben einer trägen Atmosphäre gegenüber der rotationsbedingten Bewegung der Erdoberfläche**

DOKUMENT: Galilei, G. (1632): Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo (dt.: Dialog über die beiden hauptsächlichen Weltsysteme, das ptolemaische und das copernicanische). Reprint in Auszügen in: G. Hellmann: Neudrucke von Schriften und Karten über die Meteorologie, Bd. 6, 1896, S.10f., deutsche Übersetzung (mit Kürzungen) in: Schneider-Carius 1955, 57f.

**GEORDNETE AUSSAGEN:**

Galilei formuliert eine Erklärung für ein bekanntes Phänomen. Er sieht den tropischen Ostwind als Beweis für die Rotation der Erde. Galileo beschreibt Luft als dünnen, flüssigen, nicht mit der Erde verbundenen Stoff. Erdnahe Luft kann von der Erdrotation mitgerissen werden, wenn die Erdoberfläche Unebenheiten aufweist oder die Luftmassen selber durch „Dämpfe, Rauch, Dünste (...) mit irdischen Qualitäten behaftet sind und sich daher von Hause aus für selbige Bewegungen eignen“ (SCHNEIDER-CARIUS 1955, 57). Sind diese beiden Bedingungen nicht gegeben oder nur in

abgeschwächter Form, „kommt der Grund teilweise in Fortfall, um dessentwillen die umgebende Luft sich der Geschwindigkeit der Erdumdrehung vollständig anschließen sollte“ (SCHNEIDER-CARIUS 1955, 57). Hier erwartet Galilei einen beständigen Ostwind. Dass diese Ostwinde nur in den Tropen auftreten, begründet er mit der größeren Umdrehungsgeschwindigkeit zwischen den Wendekreisen. Im Anschluss führt er zur Untermauerung seiner theoretischen Überlegungen die von Seefahrern beobachteten Windverhältnisse im Atlantik und Pazifik an.

### **EXPLIKATION:**

Spätestens seit 1616 gilt Galileis Hauptanliegen der Widerlegung des Ptolemäischen Weltbildes. Als Hofmathematiker und Hofphilosoph in Florenz unterliegt er der Zensur des Klerus. Galilei beobachtet mit Hilfe eines selbstkonstruierten Fernrohres die Planetenbahnen, Sonnenflecken und die Monde des Jupiters. Obgleich er also Beweise für das heliozentrische Planetensystem anführen kann und hiervon überzeugt ist, spricht er aufgrund der Gefahr durch die kirchliche Inquisition in seinem Werk lediglich von einer Hypothese des Kopernikanischen Weltsystems, die dem Ptolemäischen gegenübergestellt wird (vgl. KRAFFT 1999c, 163; KÖRBER 1987, 166 sowie HELLMANN 2000, 7ff.). Die Luft wird entsprechend der ptolemäischen Vorstellung als Element betrachtet, mit dem sich „irdische Qualitäten“ verbinden können: In diesem Sinne sind wohl v.a. Nebel oder Schwebstoffe, die im Rauch enthalten sind, gemeint. Die Tatsache, dass der verunreinigten Luft ein Motiv, eine Absicht unterstellt wird, sich ihrem natürlichen Ort entsprechend – hier der rotierenden Erde - zu verhalten, zeigt, dass Galileis Denken zum Teil den ptolemäischen Vorstellungen verhaftet ist (vgl. hierzu KRAFFT 1999c, 164). Einerseits nimmt er in einem 1613 verfassten Text an, dass Luft ein Gewicht besitzt, andererseits lehnt er die Vorstellung einer Schwereanziehung von Luft durch die Erde ab. Erst Newton entwickelt den Gedanken zu einer Theorie der Gravitation (SCHNEIDER-CARIUS 1955, 60f.). Ein weiterer Hinweis auf ptolemäisches Denken findet sich in Galileis folgender Äußerung aus dem Jahr 1630: Da alle Versuche, zur Wasserversorgung von Häusern dieses auf eine Höhe von über 10 Meter zu pumpen, scheitern, erklärt Galilei das Phänomen mit dem ‚horror vacui‘, die Natur meide leere Räume, die durch das Pumpen am Boden entstehen würden. Tatsächlich entspricht das Gewicht der 10-Meter-Wassersäule dem Gewicht der Luft, dass von außen auf ihre Basis drückt (vgl. SHAPIN 1998, 158ff., 177 sowie KÖRBER 1987, 117). Galilei betrachtet die rotierende Erde und die von ihr losgelöste Atmosphäre in einem Gedankenexperiment. Ihm eventuell vorliegende Aufzeichnungen von Seefahrern, die eine Nord- bzw. Südkomponente der Passatwinde andeuten, könnte Galilei entsprechend seiner wissenschaftsmethodischen Ausrichtung ignoriert haben (vgl. KRAFFT 1999c, 165 sowie FREUDIG et al. 1996, 161f.).

**STRUKTURIERUNG:**

Galilei erklärt den Passatwind als Zurückbleiben einer trägen Atmosphäre gegenüber der sich aufgrund der Erdrotation bewegenden Erdoberfläche. Die Erde dreht sich um ihre Achse. Die Atmosphäre macht eine Relativbewegung entgegen der Rotationsrichtung, da sie nicht der Erdanziehung unterliegt. Aufgrund der Kugelgestalt der Erde besteht im Bereich der Tropen die größte Relativbewegung, die als kontinuierlicher tropischer Ostwind spürbar ist.

**5.1.3 Thermische Verhältnisse verursachen eine Zirkulation - tropische Nordost- und Südostwinde als Resultat des Tagesganges der Sonne**

**DOKUMENT:** Edmond Halley (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 16, No. 183, 153-168 - gekürzt in: G. Hellmann: Neudrucke von Schriften und Karten über die Meteorologie, Bd. 6, 1896, S.13.

**GEORDNETE AUSSAGEN:**

Halley geht zunächst auf bisherige Erklärungen der Passatwinde ein und verwirft diese mit Hinweis auf seine neue Annahme, die alle Phänomene der tropischen Winde erklären kann, also insbesondere die Nord- bzw. Südwestrichtung. Er zieht hierzu die Gesetze der Statik heran: Luft, die von Wärme weniger verdünnt oder ausgedehnt und damit schwerer sei, muss eine Bewegung zu solchen Luftteilen machen, die dünner und damit weniger schwer seien, damit es zu einem Ausgleich komme. In der Nähe des Äquators sei die Luft dünner als in größerer Entfernung zu ihm. Er begründet dies mit dem Zenitstand der Sonne. Da Luft in größerer Entfernung nord- und südwärts des Äquators abkühle und damit schwerer werde, ströme diese zum Äquator, umgekehrt müsse in der Höhe aufgrund eines einzuhaltenden Gleichgewichts Luft vom Äquator Richtung Pole strömen. Die Gegenwart der Sonne, die sich kontinuierlich westwärts bewegt, verursache, dass die Bereiche, in denen sich die Luft ausdehne, mit ihr westwärts getragen werden. Die Konsequenz sei, dass zuströmende Luft dieser Bewegung folgen muss, also auf der Nordhalbkugel ein Nordost-, auf der Südhalbkugel ein Südostwind wehe. Damit seien alle Phänomene, die mit den Passat-Winden zusammenhängen, unzweifelhaft geklärt.

**EXPLIKATION:**

Edmond Halley ist zur Zeit der Veröffentlichung Mitglied der Royal Society, einer Wissenschafts- und Forschungsgesellschaft, die 1660 in London gegründet wurde. Er hat bereits 1676 eine 18 Monate dauernde Forschungsreise in die Tropen (St. Helena) unternommen und unterhält zahlreiche Kontakte zu bedeutenden Wissenschaftlern seiner Zeit. 1686 verbindet ihn eine innige Freundschaft

mit Isaac Newton, so dass Halley zu jenem Zeitpunkt mit der 1687 erschienenen Gravitationstheorie Newtons vertraut sein dürfte (KRAFFT 1999B, 192 sowie FREUDIG ET AL. 1996, 193f.).

Halleys Ausführungen zur „Statik“ beruhen auf wichtigen Erkenntnissen der vorangegangenen Jahrzehnte: Einerseits wurden die Messinstrumente zum Ermitteln der Temperatur präziser und zuverlässiger. Halley arbeitet bereits mit geschlossenen Quecksilber-Thermometern. Andererseits ermöglichte das Festlegen von Fixpunkten und Skalen eine Vergleichbarkeit von Messungen zu verschiedenen Zeiten an verschiedenen Orten (KÖRBER 1987, 115f.). Mit der Erfindung des Barometers in den 40iger Jahren des 17. Jahrhunderts gelingt es Evangelista Torricelli nachzuweisen, dass Luft ein Gewicht besitzt und einen Druck ausübt (SCHNEIDER-CARIUS 1955, 61ff.). Blaise Pascal weist 1648 die Abnahme des Luftdrucks mit der Höhe nach (SCHNEIDER-CARIUS 1955, 65ff., sowie KÖRBER 1987, 117f.). Robert Boyle, Gründungsmitglied der Royal Society, erkennt den Zusammenhang zwischen Druck und Volumen von Luft (verringertes Volumen, größerer Druck) und formuliert 1662: „Je schwerer das Gewicht ist, das auf der Luft liegt, desto stärker wird ihr Bemühen sein, sich auszudehnen“ (zitiert nach SCHNEIDER-CARIUS 1955, 74, vgl. auch WIEDERKEHR 1999d, S.70f.). Boyle stellt sich kleinste Luftteilchen mit einem elastischen, federähnlichen Charakter vor, der Kräften, die auf ihn einwirken, einen Widerstand entgegensetzt und der nachlässt, wenn diese Kräfte verringert werden. Halleys Vorstellung vom Mikrokosmos, in dem kleinste Teilchen die Luft konstituieren, basiert auf einem mechanistischem Naturverständnis, bei dem der göttliche Wille als letzte Ursache aller Bewegungen bzw. als den Dingen innewohnende Kraft angesehen wird (SHAPIN 1998, 119ff.). Robert Hooke weist im gleichen Jahr bereits kurz vor Halley darauf hin, dass aufgrund thermischer Ursachen eine Zirkulation zwischen Äquator und Polen stattfinden muss. Hooke bleibt jedoch bei der Galileischen Erklärung hinsichtlich der Ursache der Windrichtung (KÖRBER 1987, 167 und WIEDERKEHR 1999e, 217ff.). Nach Halley findet diese Zirkulation ausschließlich in den Tropen statt, da die Auswirkungen thermischer Effekte weiter polwärts zu gering sind, um kontinuierliche Süd- bzw. Nordostwinde entstehen zu lassen (PERSSON 2006, 19 und 34). Der beschriebene Kreislauf entstehe letztlich aufgrund eines der Luft innewohnenden Bedürfnisses zum Ausgleich.

### **STRUKTURIERUNG:**

Edmond Halley erklärt den Passatwind als Teil einer thermischen Zirkulation aufgrund des Tagesganges der Sonne. Im Bereich des Äquators scheint die Sonne am stärksten. Wärme als Substanz dringt hier am intensivsten in die Luft ein, vergrößert den Abstand von Luftteilchen zueinander und verringert damit das Gewicht der Luft. Ein permanenter Aufstieg von Luft in Äquaturnähe ist die Folge, da diese von dichter Luft verdrängt wird. Als Höhenwind bewegt sich die Luft polwärts aufgrund des Druckes der nachrückenden aufsteigenden Luft. In der Höhe entweicht der Wärmestoff, sodass die Luft schwerer wird und aufgrund der Erdanziehung absinkt. Die

abgesunkene, schwere Luft verdrängt schließlich leichte Luft am Boden. Diese Zirkulation folgt dem Tagesgang der Sonne, daher wehen die Passatwinde am Boden in nordwest- bzw. südwestlicher Richtung.

#### **5.1.4 Unterschiedliche Rotationsgeschwindigkeiten der verschiedenen geographischen Breiten als Erklärung der tropischen Nordost- bzw. Südostwinde**

DOKUMENT: George Hadley (1735): Concerning the cause of the trade winds. In: Philos. Trans. 19, 1735, S.58-62. - Reprint in: G. Hellmann: Neudrucke von Schriften und Karten über die Meteorologie, Bd. 6, 1896, S.17-21.

##### **GEORDNETE AUSSAGEN:**

Hadley geht eingangs auf die bisherigen Theorien zur Ursache der Passatwinde ein. Er weist darauf hin, dass die Erdrotation bereits als relevant erkannt wurde, ihre Wirkung jedoch nicht ausreichend beschrieben wurde. Konsens bestehe hinsichtlich der Sonnentätigkeit als ursprünglicher Ursache dieser Winde. Größere Luftverdünnung in Äquatornähe sei das Resultat senkrecht oder nahezu senkrecht auftreffender Sonnenstrahlen, die einen größeren Wärmegrad erzeugen als in anderen Gebieten. Die Luft sei dort spezifisch leichter, kühlere Luft in der Umgebung müsse aufgrund ihrer größeren Dichte und Schwere ihren Platz verlassen, um dorthin zu gelangen, wobei sie die dortige Luft zum Aufsteigen veranlasse. Hadley widerlegt im Folgenden die Annahme, dass die Bewegung der Luft nach Westen ausschließlich von der Sonneneinwirkung abgeleitet werden könne, indem er hypothetisch auf die Wirkung entgegengesetzter Winde hinweist: Luft ströme in jene Gebiete, wo die Sonnenwirkung zur betreffenden Zeit am intensivsten ist, so würden an einem Ort innerhalb der Tropen auf der Nordhalbkugel (NHK) Nordwestwinde am Morgen und Nordostwinde am Nachmittag entstehen.

Hadley sieht eine andere Ursache der Nord- bzw. Südostwinde: Unter der Annahme, dass die Luft in jedem ihrer Teile gleichen Schritt mit der Erde in ihrer täglichen Bewegung hält, würde keine Relativbewegung zwischen Erde und Luft bestehen und demzufolge auch kein Wind. Durch die oben beschriebenen Vorgänge entstehe nun ein Wind, Luft würde zum Äquator gezogen. Mit der Annäherung an den Äquator nehmen die Breitenkreise zu, so sei der Äquator ungefähr 2083 Meilen länger als die nördlichen und südlichen Wendekreise. Die Luft am Äquator bewege sich also schneller als an den Wendekreisen. Luft, die sich vom Wendekreis zum Äquator bewegt, müsse aufgrund ihrer geringeren Geschwindigkeit eine relative Gegenbewegung zur täglichen Erdbewegung machen. Die Ostkomponente würde mit Annäherung an den Äquator zunehmen und am Äquator genau aus Osten wehen. Die Geschwindigkeit dieser Ostwinde müsste 2083 Meilen pro Tag betragen oder 1,3 Meilen pro Minute. Da diese Windgeschwindigkeiten tatsächlich nicht vorherrschen, geht Hadley davon aus,

dass die Ostbewegung der Erd- und Meeresoberfläche (Erdrotation) entgegen der Relativbewegung wirkt und diese auf die tatsächlich bestehenden Windgeschwindigkeiten abbremst.

Haldey weist darauf hin, dass dieses Prinzip auch außerhalb der Tropen Gültigkeit besitzt und erklärt die Entstehung der westlichen Passatwinde jenseits der Wendekreise (Höhenwestwinde). Verdünnte Luft steige über den äquatorialen Gegenden auf und breite sich aufgrund ihrer Eigenschaften als Fluidium über der am Boden zuströmenden Luft nach Norden und Süden aus. Mit Abstand zur Erdoberfläche verliere sie einen großen Teil ihrer Wärmemenge, erlange Dichte und Schwere und nähere sich dadurch wieder der Erdoberfläche. Dies erfolge jenseits der Wendekreise und aufgrund ihrer größeren Geschwindigkeit (im Verhältnis zur Erdrotation) entstehe der Westwind. So würde die Luft ständig kreisen, an Geschwindigkeit verlieren oder gewinnen, je nachdem, ob sie sich dem Äquator nähere oder sich von ihm entferne. Abschließend weist Hadley darauf hin, dass seine Ausführungen nicht dazu dienen, Änderungen von Winden in verschiedenen Jahreszeiten und in verschiedenen Erdteilen zu erklären, hierzu sei eine umfassendere Schrift nötig.

### **EXPLIKATION:**

George Hadley ist zum Zeitpunkt der Veröffentlichung erst wenige Wochen Mitglied der Royal Society. Er stellt mit seinem Ansatz zu den Passatwinden die Ausführungen des renommierten Edmond Halleys in Frage. Anerkennung findet Hadley für seine Theorie zu seinen Lebzeiten kaum (PERSSON 2006, 17). Hadleys Annahme, die Atmosphäre befindet sich in gleicher Bewegung mit der Erdoberfläche, basiert auf den physikalischen Erkenntnissen der vorangegangenen Jahrzehnte. Luft besitzt ein Gewicht und unterliegt damit der Erdanziehung. Er grenzt sich hiermit deutlich von den Galileiischen Vorstellungen ab. Die Idee der thermischen Zirkulation im Bereich der Tropen übernimmt Hadley, baut diese jedoch aus und postuliert, basierend auf seinem Prinzip, eine globale Zirkulation, bei der auch die in den mittleren Breiten vorherrschenden Höhen-Westwinde erklärt werden können. Hadley nimmt an, dass Winde in Nord-Süd-Richtung durch die unterschiedlichen Rotationsgeschwindigkeiten der Breitenkreise in ihrer Richtung beeinflusst werden. Bei Winden auf der Nordhalbkugel würde dies zu einer Rechtsablenkung führen und somit ursächlich für die tropischen Nordost-Winde sein. Auf der Grundlage genauerer Windkarten erkennt Hadley eine Zunahme der Ostkomponente der Nordost-Passate mit Annäherung an den Äquator im Sommer auf der Nordhalbkugel. Er zieht die Schlussfolgerung: Die Ablenkung müsse am Äquator am stärksten sein. Letzteres stellt sich etwa 100 Jahre später als falsch heraus: In den 30iger Jahren des 19. Jahrhunderts erbringt Gustave Gaspard Coriolis den theoretisch-mathematischen Beweis der von Hadley postulierten Kraft – er zeigt jedoch auch, dass die Ablenkung am Äquator gleich Null ist (KÖRBER 1987, 168 sowie PERSSON 2006, 30). Hadley beschreibt die Wirkung der Reibung durch die Erd- oder Meeresoberfläche als eine dem Wind entgegen gerichtete Kraft, die ihn auf die

gemessenen Geschwindigkeiten abbremsen. Damit überschätzt er die Wirkung der Reibung, insbesondere über den Ozeanen (PERSSON 2006, 33ff.).

#### **STRUKTURIERUNG:**

George Hadley erklärt den Passatwind als Teil einer thermischen Zirkulation unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Rotationsgeschwindigkeiten der verschiedenen geographischen Breiten. Im Bereich des Äquators scheint die Sonne am stärksten. Wärme als Substanz dringt hier am intensivsten in die Luft ein, vergrößert den Abstand von Luftteilchen zueinander und verringert damit das Gewicht der Luft. Ein permanenter Aufstieg von Luft in Äquatornähe ist die Folge, da diese von dichter Luft verdrängt wird. In der Höhe bewegt sich die Luft polwärts aufgrund des Druckes der nachrückenden aufsteigenden Luft. Hierbei entweicht der Wärmestoff, sodass die Luft schwerer wird und aufgrund der Erdanziehung absinkt. Die abgesunkene, schwere Luft verdrängt schließlich leichte Luft am Boden. Bei diesem Vorgang erfolgt eine Ablenkung der sich bewegenden Luft nach Westen, eine Relativbewegung, da die Rotationsgeschwindigkeit der Breitenkreise äquatorwärts zunimmt.

## **5.2 Aktuelle wissenschaftliche Vorstellungen zur Passatzirkulation**

### **5.2.1 Geordnete Wissenschaftlernaussagen**

Die Zusammenfassung basiert auf den redigierten und geordneten Aussagen verschiedener Wissenschaftler, die im Rahmen der qualitativen Inhaltsanalyse unter der Leitfrage „Wie stellen sich Wissenschaftler aus der Meteorologie, der Klimageographie und der Klimageographie die Passatzirkulation vor?“ rekonstruiert werden konnten. Folgende Lehrbücher wurden hierzu untersucht:

- HÄCKEL, HANS (<sup>7</sup>2012): Meteorologie. Stuttgart.
- STRAHLER, ALAN & ARTHUR STRAHLER (<sup>4</sup>2009): Physische Geographie. Stuttgart.<sup>5</sup>
- WEISCHET, WOLFGANG & WILFRIED ENDLICHER (<sup>7</sup>2008): Einführung in die Allgemeine Klimatologie. Stuttgart.

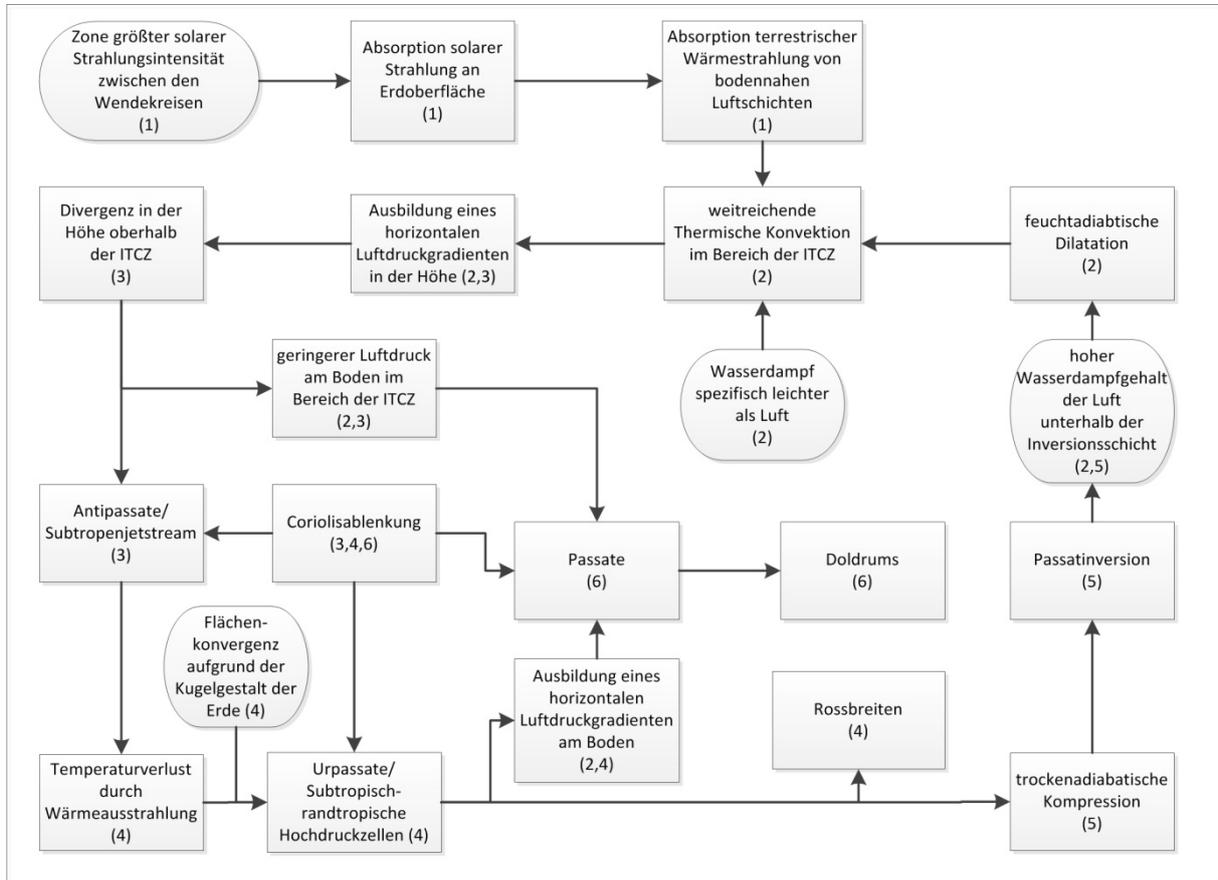
Durch die Berücksichtigung dreier Lehrwerke, die den Forschungsgegenstand aus unterschiedlichen Perspektiven betrachten, soll die Validität der Untersuchungsergebnisse sichergestellt werden<sup>6</sup>. Um Redundanzen zu vermeiden, werden die Wissenschaftlernaussagen zusammengefasst dargestellt. Die Schwierigkeit besteht darin, ein nicht-lineares System in Form eines (linearen) Textes zu beschreiben.

---

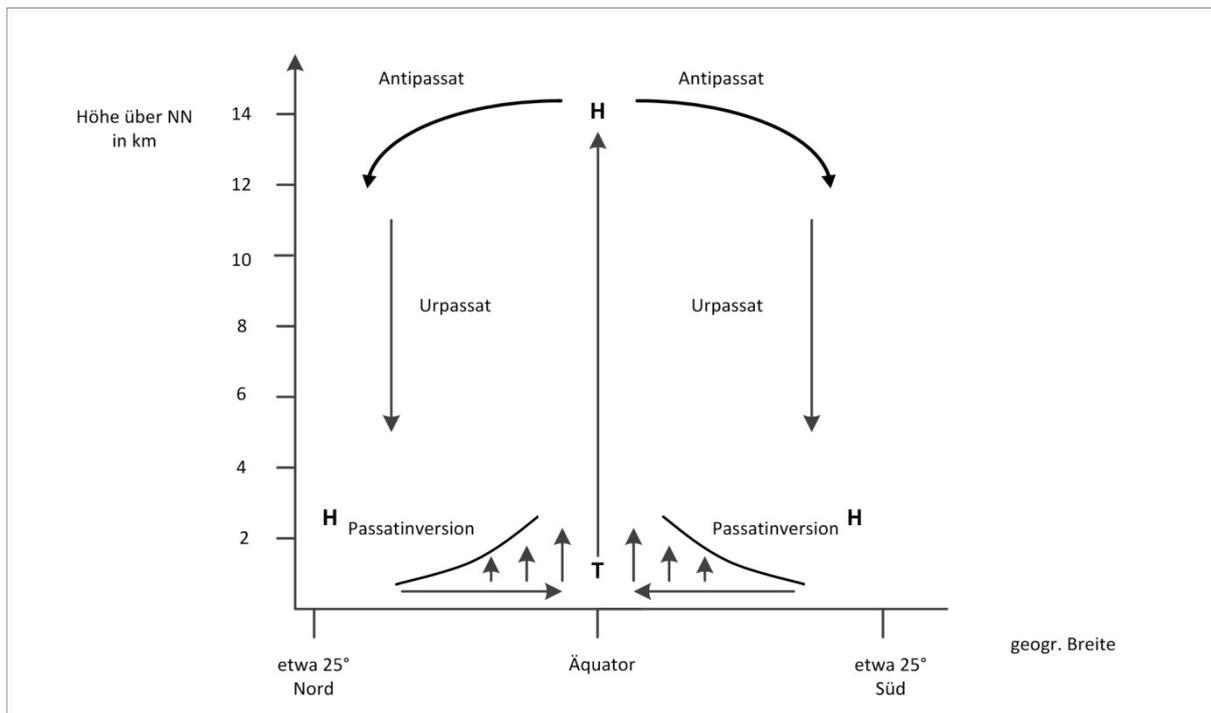
<sup>5</sup> Es handelt sich hierbei um die deutsche Übersetzung. Der Titel der englischen Originalausgabe lautet: STRAHLER, A. & A. STRAHLER (<sup>4</sup>2006): *Introducing physical geography*. New York.

<sup>6</sup> Die intensivste Auseinandersetzung mit der Passatzirkulation findet sich im Lehrbuch der Klimatologie (WEISCHET & ENDLICHER 2008). STRAHLER & STRAHLER 2009 fokussieren Wechselwirkungen des tropischen Windsystems mit der Erdoberfläche. HÄCKEL 2012 verweist in Hinblick auf die Passatzirkulation explizit auf Lehrbücher zur Klimatologie (HÄCKEL 2012, 301), erscheint hier jedoch für die Untersuchung u.a. interessant aufgrund der detaillierten Ausführungen zu Windentstehung, Wasser und Atmosphäre.

Daher werden die folgenden Aussagen nummeriert und durch ein Wirkungsdiagramm (siehe Abbildung 8) sowie eine schematische Darstellung der Zirkulationsverhältnisse im längenkreisparallelen Querschnitt (siehe Abbildung 9) veranschaulicht.



**Abbildung 8: 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`).**



**Abbildung 9: Die Passatzirkulation im längenkreisparallelen Querschnitt im Frühjahr und Herbst (eigene schematische Darstellung auf der Basis von HÄCKEL 2012, STRAHLER & STRAHLER 2009 und WEISCHET & ENDLICHER 2008.)**

Die Autoren beschreiben ein Modell einer längenkreisparallelen Zirkulation im Bereich der Tropen, die nach George Hadley auch als „Hadley-Zelle“ bezeichnet wird (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 269). Es lässt sich aus den Ausführungen der verschiedenen Wissenschaftler zu Himmelsmechanik, elektromagnetischer Strahlung, Luft, Wasserdampf, Wind und adiabatischen Prozessen wie folgt ableiten:

(1) Eine Zone größter Strahlungsintensität, bedingt durch den Zenitstand der Sonne, verschiebt sich im Laufe eines Jahres vom südlichen Wendekreis (23,5°S) am 21.12. über den Äquator am 21.3. zum nördlichen Wendekreis (23,5°N) am 21.06. und über den Äquator am 23.09. wieder zum südlichen Wendekreis. Die intensive solare Einstrahlung führt zu einer entsprechenden terrestrischen Ausstrahlung und Erwärmung bodennaher Luftschichten durch Absorption. Diese Zone wird im Folgenden als *ITCZ* (=intertropical convergence zone) bezeichnet. Sie bewegt sich im Laufe eines Jahres, wobei sie ganzjährig die immerfeuchten Tropen etwa zwischen 10°N und 10°S beeinflusst und Niederschläge bedingt<sup>7</sup>. Die wechselfeuchten Tropen, etwa zwischen 10°N und 25°N bzw. 10°S und 25°S, überquert die ITCZ im Jahresverlauf zwei Mal auf dem Weg nach Norden bzw. Süden und verursacht so zwei Regenzeiten im inneren Bereich der wechselfeuchten Tropen. Im äußeren Bereich gibt es nur eine Regenzeit, da die ITCZ diese Zone nur mit ihren nördlichsten bzw. südlichsten Ausläufern erreicht. Die trockenen Tropen, etwa zwischen 25°N und 35°N bzw. 25°S und 35°S liegen

<sup>7</sup> HÄCKEL verwendet hier den Begriff Zenitalregen (HÄCKEL 2012, 301). In den Lehrbüchern zur Klimatologie und zur Klimageographie wird von konvektiven Niederschlägen gesprochen (STRAHLER & STRAHLER 2009, 221; WEISCHET & ENDLICHER 2008, 256).

außerhalb des Einflussbereichs der ITCZ (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 23ff.; STRAHLER & STRAHLER 2009, 38ff. sowie 213ff.; HÄCKEL 2012, 161ff., 261ff., 300ff. sowie 323f.).

(2) Im Bereich der ITCZ erfolgt in einem aufgelockerten breitenkreisparallelen Gürtel *thermische Konvektion* in einzelnen lokalen Zellen. Mit einer zeitlichen Verzögerung zum Einstrahlungsmaximum von etwa 4 Wochen bildet sich am Boden ein thermisches Tiefdruckgebiet aus. Die vertikale Luftbewegung reicht aus vier Gründen extrem hoch: 1. Die Luft enthält große Mengen an Wasserdampf, welcher spezifisch leichter als Luft ist, so dass die Auftriebskraft während des Aufstiegs in Luftschichten mit weniger Wasserdampf entsprechend hoch ist. 2. Die Luft wird sehr stark erwärmt. 3. Der Aufstieg erfolgt überwiegend feuchtadiabatisch mit entsprechend geringerem Temperaturverlust pro Strecke (als bei einer trockenadiabatischen Abkühlung) und damit höherer Auftriebskraft. 4. Aus Kontinuitätsgründen verstärken sich Konvergenz am Boden, Konvektion und Divergenz in der Höhe gegenseitig (siehe unten 6) (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 178ff. sowie 251ff.; STRAHLER & STRAHLER 2009, 166ff. sowie 213ff.; HÄCKEL 2012, 61ff., 261ff. sowie 300ff.).

(3) In Höhen zwischen 8 Kilometern und 16 Kilometern über der ITCZ divergieren die aufsteigenden Luftmassen. Während sich in diesen Höhen Gewichtskraft und Auftriebskraft ausgleichen, bewirkt die Gradientkraft eine beschleunigte Bewegung in der Horizontalen in Richtung des geringeren Druckes. Dieser liegt polwärts, da die zonal aufsteigenden Luftmassen zu einem relativ hohen Luftdruck führen. Die Dichten der Luft auf horizontaler Ebene sind gleich, die Temperatur im Bereich der aufgestiegenen Luft jedoch höher. Die hieraus resultierenden Winde werden als *Antipassate*<sup>8</sup> bezeichnet. Eine zunehmende Ablenkung in nordöstliche bzw. südöstliche Richtung wird durch die Coriolis-Kraft verursacht, die schließlich ab 30°S bzw. 30°N einen isobarenparallelen Westwind, den sog. Subtropenjetstream hervorbringt. Über der ITCZ bewirkt der divergenzbedingte Massenverlust in der Höhe aufgrund des Eigengewichtes der Luft einen geringeren Druck am Boden und begünstigt somit Konvergenz (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 251ff.; STRAHLER & STRAHLER 2009, 174ff. sowie 213ff.; HÄCKEL 2012, 261ff. sowie 300ff.).

(4) Aus den Antipassaten sinken zwischen Äquator und 30° nördliche und südliche Breite permanent Luftmassen ab. Diese Winde werden als *Urpasate*<sup>9</sup> bezeichnet. Das Absinken hat einerseits thermische Ursachen: In der Höhe verringert sich die Temperatur der Luftmassen aufgrund ihrer Wärmeausstrahlung kontinuierlich. Hierdurch überwiegt allmählich die Gewichtskraft gegenüber der Auftriebskraft. Andererseits spielen dynamische Ursachen eine Rolle: Aufgrund der Kugelgestalt der

---

<sup>8</sup> Der Begriff wird im Klimatologie-Lehrbuch verwendet (Weischet & Endlicher 2008, 259), taucht jedoch nicht bei Strahler & Strahler 2009 und Häckel 2012 auf. Das Präfix `anti` stammt aus dem Griechischen und bedeutet wörtlich `gegen` (KLUGE 1999, 44). Als Antipassate werden also die Winde bezeichnet, die in entgegengesetzter Richtung zu den Passaten wehen.

<sup>9</sup> Der Begriff wird im Klimatologie-Lehrbuch verwendet (Weischet & Endlicher 2008, 251), taucht jedoch nicht bei Strahler & Strahler 2009 und Häckel 2012 auf. Das Präfix `ur` kann auf das indogermanische Wort `uds` zurückgeführt werden, was wörtlich etwa `aus`, `heraus` oder auch `anfänglich` oder `ursprünglich` bedeutet (KLUGE 1999, 850).

Erde überströmen die Antipassate eine zunehmend kleiner werdende Fläche. Hierdurch konvergieren die Luftmassen der Antipassate in der Höhe, die Luftdichte steigt im Verhältnis zu den unteren Luftmassen, so dass es zu einem dynamisch bedingten Absinken kommt. Aufgrund der Coriolis-Ablenkung wehen die Luftmassen aus östlicher Richtung. Konvergenzen, die der Subtropenjetstream durchläuft, führen zur Bildung von subtropisch-randtropischen Hochdruckzellen, die als „Gürtel“ entlang des 30. Breitengrades verlaufen. Die Corioliskraft bewirkt, dass die Luftmassen der Antipassate in einer antizyklonalen Drehbewegung (auf der Nordhalbkugel im Uhrzeigersinn und auf der Südhalbkugel gegen den Uhrzeigersinn) absinken. Am Boden divergieren die Luftmassen und strömen zum Teil als Passatwinde äquatorwärts und zum Teil polwärts. Die Zentren dieser Hochdruckzellen sind relativ windstill und werden als Rossbreiten bezeichnet, da hier Segelschiffe oft tagelang festsäßen und mitgeführte Pferde aufgrund mangelndem Trinkwassers und Nahrung über Bord werfen mussten (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 251ff.; STRAHLER & STRAHLER 2009, 174ff. sowie 213ff.; HÄCKEL 2012, 261ff. sowie 300ff.).

(5) Die Urpassate sinken aus großen Höhen (über 30° südliche und nördliche Breite noch bis zu etwa 12 Kilometer) ab. Da der Wasserdampf zu großen Teilen über der ITCZ bereits kondensiert und als konvektiver Niederschlag zu Boden gefallen ist, erwärmen sich die Luftmassen beim Absinken trockenadiabatisch. Es kommt zur Ausbildung der sog. *Passatinversion*<sup>10</sup>, da die absinkende Luft in Höhen von etwa 500 bis 600m (Randtropen) wärmer ist als aufsteigende, bodennahe Warmluft. Dies verhindert thermische Konvektion und damit Niederschlagbildung, obgleich die unteren Luftmassen große Mengen an Wasserdampf enthalten. Da mit Annäherung an den Äquator die Urpassate geringer ausgeprägt sind, verlagert sich die Inversionsschicht zunehmend in größere Höhen (bis etwa 1500 bis 2000m), bis sie sich schließlich ab etwa dem 10. Breitengrad auflöst (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 191ff. sowie 251ff.).

(6) Bei den Luftmassen unterhalb der Inversionsschicht handelt es sich um die *Passatwinde*. Ursächlich für ihre Bewegung ist ein horizontaler Luftdruckgradient, dessen Entstehung drei Ursachen hat: 1. Thermische Konvektion erzeugt Tiefdruckgebiete am Boden im Bereich der ITCZ. 2. In der Höhe strömende Luftmassen verändern die Luftdruckverhältnisse am Boden aufgrund des Eigengewichtes der auflastenden Luft. Im Falle des Passatkreislaufs bewirken die polwärts strömenden Antipassate ein Luftdruckgefälle von den Randtropen zur ITCZ. 3. Absinkende Luftmassen im Bereich der subtropisch-randtropischen Hochdruckzellen verstärken das Druckgefälle und führen dazu, dass im Bereich der ITCZ in kürzerer Zeit mehr Luftmassen konvergieren, die wiederum aus Kontinuitätsgründen schneller abgeführt werden müssen, so dass sich Konvergenz und Konvektion gegenseitig verstärken. Aufgrund der äquatorwärts geringer werdenden

---

<sup>10</sup> Der Begriff wird nur im Lehrbuch der Klimatologie verwendet (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 255). Weder STRAHLER & STRAHLER 2009 noch HÄCKEL 2012 gehen auf das Phänomen Passatinversion näher ein.

Coriolisablenkung verlaufen die NO- bzw. SO-Passate mit abnehmender geographischer Breite zunehmend in nördlicher bzw. südlicher Richtung. Da die Luftdruckunterschiede mit Annäherung an die ITCZ zunehmend geringer werden, kommt es zu einem allmählichen „Auslaufen“ (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 256) der Passatwinde im Bereich zwischen 10°N und 10°S. Hier herrschen unbeständige, wechselnde Bodenwinde, sog. Doldrums, vor, die durch lokale thermische Tiefs hervorgerufen und aufgrund der fehlenden Coriolisablenkung relativ schnell ausgeglichen werden können (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 191ff. sowie 251ff.; STRAHLER & STRAHLER 2009, 179ff.; HÄCKEL 2012, 300ff.).

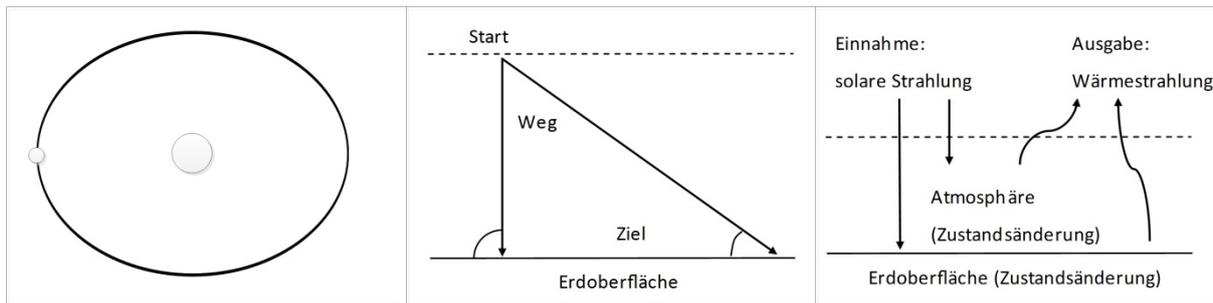
Das Modell der Passatzirkulation ist eine schematisch vereinfachte Darstellung der Realität. Grundsätzlich wird die Zirkulation durch die Land-Meer-Verteilung beeinflusst, wodurch es beispielsweise zu den Monsunereignissen kommt. Lokale und regionale Besonderheiten, wie etwa Gebirge oder Senken, beeinflussen Intensität und Richtung des Passats. Über den kontinentalen Tropen bilden sich häufig wesentlich größere Tiefdruckgebiete als über den Ozeanen aus. In Südamerika erstreckt sich die ITCZ beispielsweise oft über 20 Breitengrade. Die Folge ist ein relativ breites Gebiet mit geringen Luftdruckunterschieden und entsprechender Windstille. Entsprechend sind die Passatwinde eher über den Ozeanen, insbesondere über den Osthälften der Ozeane vorzufinden. Sogenannte Luftdruck-„Gürtel“ sind daher „klimatologische Fiktionen“ (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 247). Der Passatkreislauf ist kein absolut stabiles Zirkulationssystem. Er variiert zeitlich und räumlich sehr stark und wird überlagert durch andere Zirkulationssysteme wie z.B. die breitenkreisparallele Walkerzirkulation und durch verschiedene Wetterereignisse wie z.B. tropische Wirbelstürme. Auch die Regelmäßigkeit nachmittäglicher konvektiver Niederschläge im Bereich der ITCZ ist eine Modellvorstellung, die so nicht immer mit der Realität übereinstimmt (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 246ff.; STRAHLER & STRAHLER 2009, 196f.; HÄCKEL 2012, 301).

### **5.2.2 Explikation der Wissenschaftleraussagen**

Im Rahmen der folgenden Explikation werden die wissenschaftlichen Aussagen hinsichtlich der wichtigsten Schemata (*kinesthetic image schemes*) analysiert, auf denen das Verständnis der dargestellten Phänomene und Prozesse beruht. Zudem werden anhand der verwendeten Metaphern die zugrunde liegenden metaphorischen Konzepte rekonstruiert und hinsichtlich ihrer Potentiale (*highlighting*) und Gefahren (*hiding*) untersucht. In einem letzten Schritt erfolgt die Darstellung des historischen Entstehungsprozesses der wissenschaftlichen Aussagen.

### 5.2.2.1 Aussagen zu Himmelsmechanik und elektromagnetischer Strahlung

#### WICHTIGE SCHEMATA (KINESTHETIC IMAGE SCHEMES)



**Abbildung 10: Vorstellungen zur Himmelsmechanik, zum Einstrahlungswinkel und elektromagnetischer Strahlung (eigene schematische Darstellungen auf der Grundlage von HÄCKEL 2012, 165, 181, 211; STRAHLER & STRAHLER 2009, 56, 73, 82; WEISCHET & ENDLICHER 2008, 24, 57,86).**

Die wissenschaftlichen Vorstellungen zur Himmelsmechanik und elektromagnetischer Strahlung (vgl. im Folgenden HÄCKEL 2012, 161ff.; STRAHLER & STRAHLER 2009, 38ff.; WEISCHET & ENDLICHER 2008, 23ff.) basieren vor allem auf dem Teil-Ganzes-Schema, dem Start-Weg-Ziel-Schema und dem Person-Schema. Erde und Sonne sind Teile eines größeren Sonnensystems. Unser Heimatplanet bewegt sich entlang eines Weges um die Sonne. Diese sogenannte Erdrevolution erfolgt auf einer elliptischen Bahn, deren Exzentrizität jedoch sehr gering ist und im jahreszeitlichen Verlauf keine klimatologischen Auswirkungen hat (siehe Abbildung 10, links). Ursächlich für die starke Erwärmung der Luft im Bereich der ITCZ erscheint also nicht die Abstand Erde-Sonne, sondern der aus der Schiefe der Ekliptik resultierende steile Einstrahlungswinkel. Hierdurch erhält die beschienene Fläche mehr Energie. Diese Zone stärkster Energiezufuhr bewegt sich im Verlauf eines Jahres zwischen 23,5°N und 23,5°S. Teilaspekte dieses Phänomens können über das Start-Weg-Ziel-Schema verstanden werden. So bewegt sich solare Strahlung entlang eines Weges auf die Erde, die je nach Winkel unterschiedlich lang sein kann. Umso steiler der Einstrahlungswinkel der Sonne ist, umso kürzer ist der Weg solarer Strahlung durch die Atmosphäre und umso intensiver ist die Einstrahlung auf der Erdoberfläche. Bestimmte Strahlungsspektren solarer Strahlung werden in der Atmosphäre absorbiert. Umso länger also der Weg der Strahlen durch die Atmosphäre ist, desto mehr verändert sich die solare Strahlung durch Absorption (siehe Abbildung 10, Mitte). Die Erwärmung der Erdoberfläche und der Atmosphäre wird über das Person-Schema verstanden. Solare Strahlung wird eingenommen, der Zustand von Boden, Atmosphäre oder Luft ändert sich, da seine Temperatur steigt, und schließlich wird etwas ausgeschieden, nämlich langwellige Wärmestrahlung (siehe Abbildung 10, rechts).

#### METAPHERN UND METAPHORISCHE KONZEPTE

In allen drei wissenschaftlichen Lehrbüchern erscheinen Sonne und Erde als Personen mit bestimmten Absichten und Aufgaben. Die Sonne „spendet Licht, Wärme und Leben“ (HÄCKEL 2012, 178). Sie führt Bewegungen am Himmel aus und steuert das Leben auf der Erde (STRAHLER & STRAHLER

2009, 40). Die Sonne besitzt eine beeindruckende Kraft und „speist“ nahezu alle Prozesse in der Natur (STRAHLER & STRAHLER 2009, 68). Sie „steht“ am Himmel und „liefert“ Energie (STRAHLER & STRAHLER 2009, 73, 75). Himmelsmechanische Vorgänge scheinen einen bestimmten Zweck zu erfüllen. Die Sonne „berührt“ den Horizont, sie „schaut“ über einen Berg, „wandert“ eine „jahresperiodische Wanderung“ in bestimmter „Wanderungsrichtung“ (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 25-30). Die Erde „wandert um die Sonne“ und die Erdachse ist „zur Sonne hin geneigt“ (STRAHLER & STRAHLER 2009, 54f.). Auch sie macht einen „Jahresgang“, einen jährlichen „Umlauf“ (HÄCKEL 2012, 181f.). Das metaphorische Konzept `Sonne/Erde ist Person` veranschaulicht einerseits die Bedeutung der Sonne für die Erde. Leben wäre ohne die Sonne nicht möglich. Zudem kann die Bewegung der Sonne am Himmel so metaphorisch verstanden werden. Dies ist allerdings problematisch, da es sich tatsächlich um eine Bewegung der Erde um ihre Achse handelt und keine Bewegung der Sonne. Zudem sind die himmelsmechanischen Vorgänge nach wissenschaftlicher Auffassung nicht zweckgerichtet. Im Gegensatz zu den Handlungen einer Person, die intendiert und motiviert sind, erfolgt die Drehbewegung der Erde um ihre Achse davon unabhängig und permanent.

Die unbekannteren und schwer zugänglichen Zielbereiche `Strahlung und Energie` werden durch das metaphorische Konzept `Strahlung/Energie ist ein fluider Körper` veranschaulicht. Die Sonne wird als „Quelle“ eines „Strahlungsfluss(es)“ in Form von „Teilchen“ und „Wellen“ bezeichnet. Eine Strahlungsmenge „fließt“ und wird schließlich von der Erde „empfangen“, was ein „Sonnenbad“ ermöglicht. Dieser fluide Körper scheint der Erdanziehungskraft ausgesetzt zu sein: die „einfallende“ Sonnenstrahlung (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 32ff.). Oder es wird von einer „Strahlungsquelle“ oder „Energiequelle“ (HÄCKEL 2012, 173; STRAHLER & STRAHLER 2009, 68ff.) gesprochen, von der sich ein „Strahlungsstrom“ oder „Teilchenstrom“ mit unterschiedlichen „Wellenlängen“ ausbreitet (HÄCKEL 2012, 162ff.). Ein „Energiestrom“ bewegt sich „in einem annähernd konstanten Fluss“ von Sonne in Richtung Erde mit einer bestimmten „Flussrate“ (STRAHLER & STRAHLER 2009, 73). Eine Landschaft „taucht“ in rosarotes Licht (STRAHLER & STRAHLER 2009, 40). Das metaphorische Konzept `Strahlung/Energie ist fluider Körper` veranschaulicht einerseits die konstante Bewegung und Kohärenz elektromagnetischer Strahlung. Es evoziert Vorstellungen von fließendem Wasser und zeigt damit die Bedeutung auf, die diese für das Leben auf der Erde besitzt. Wissenschaftlich jedoch nicht angemessen ist die Vorstellung, dass elektromagnetische Strahlung eine Masse und damit ein Gewicht hat.

Ferner werden die abstrakten Zielbereiche `Strahlung und Energie` durch das metaphorische Konzept `Strahlung/Energie ist Nahrung` zugänglich gemacht. Solare Strahlung wird in der Luft oder an der Erdoberfläche aufgenommen, die Zustände von Luft und Erdoberfläche ändern sich, ihre Temperatur nimmt zu und sie emittieren langwellige Wärmestrahlung. Letztere kann ebenfalls als Nahrung dienen und von Luft oder anderen Körpern verzerrt werden. Ausgeschieden wird dann langwelligere

Wärmestrahlung. Sowohl der absorbierende Körper (z.B. die Erdoberfläche) als auch der reflektierende Körper werden als Person verstanden: Von letzterem wird die Strahlung „zurückgeschickt“ (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 51ff.). Die Erde kommt in den „Strahlungsgenuss“ (HÄCKEL 2012, 180). Ohne Strahlungsenergie von der Sonne wäre die Erde „ein kalter, unbelebter Brocken Materie“ (HÄCKEL 2012, 161). Pflanzen „konsumieren“ Sonnenenergie (STRAHLER & STRAHLER 2009, 42). Das metaphorische Konzept `Strahlung/Energie ist Nahrung` veranschaulicht einerseits die Bedeutung von Strahlung hinsichtlich der Veränderung des Zustandes von Objekten. Im Gegensatz zu Nahrung, die dem menschlichen Körper zugeführt wird, besitzt elektromagnetische Strahlung jedoch keine Masse und kein Gewicht. Die Gefahr besteht also, dass die aus wissenschaftlicher Sicht nicht angemessene Vorstellung evoziert wird, Objekte, die elektromagnetische Strahlung absorbieren, könnten schwerer werden bzw. leichter, wenn sie Strahlung emittieren.

Strahlung wird auch durch den Quellbereich `Transportmittel für Energie` zugänglich: Sie „befördert“ Energie von einem Himmelskörper zum nächsten. Bei Strahlung „wird Energie ohne materialen Träger transportiert“ (HÄCKEL 2012, 161, 164). Veranschaulicht wird die Eigenschaft von Strahlung, Energie räumlich zu bewegen. Problematisch ist, dass dieses metaphorische Konzept eine Zweckbestimmung suggeriert, die aus wissenschaftlicher Sicht nicht angemessen ist.

Die Wissenschaftler verwenden das metaphorische Konzept `Energie ist Ressource`. Energie wird aufgenommen und abgegeben, einem „Energiereservoir“ zugeführt. Bestimmte Vorgänge „liefern“ Energie. Sie wird im Boden „gebunden“, kann „verloren“ gehen, sowohl im Überschuss als auch defizitär vorhanden sein (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 47, 67, 71, 78, 87, 92, 164). Pflanzen „empfangen und speichern Sonnenenergie“ (STRAHLER & STRAHLER 2009, 42). Die Sonne gibt Energie ab (STRAHLER & STRAHLER 2009, 71). Veranschaulicht wird hierdurch die Verfügbarkeit und Notwendigkeit von Energie, um Prozesse in der Natur, beispielsweise Luftbewegungen, zu initiieren. Auch mit diesem metaphorischen Konzept wird jedoch die aus wissenschaftlicher Sicht nicht angemessene Vorstellung evoziert, dass Energie etwas Stoffliches sei und eine Masse habe. Zudem handelt es sich bei dem Quellbereich `Ressource` ebenfalls um ein relativ abstraktes Konzept, das unter Umständen nicht allen Interpretierenden bekannt ist.

Der Zielbereich `Wärme` wird ebenfalls durch den Quellbereich `Ressource` veranschaulicht. Die Wissenschaftler sprechen von „Wärmenachschub“, „Wärmespeicher“ oder „Wärmeverlust“ (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 71, 73, 108, 135). Sie thematisieren die „Speicherung von Wärme im Boden und in Gewässern“ (HÄCKEL 2012, 225) und sprechen vom „Wärmeverrat eines Gases“ (HÄCKEL 2012, 45). Das metaphorische Konzept `Wärme ist Ressource` verdeutlicht einerseits die Verfügbarkeit und andererseits die Notwendigkeit von Wärme. Problematisch ist jedoch auch hier, dass die Vorstellung evoziert wird, Wärme sei etwas Stoffliches, warme Luft also beispielsweise schwerer als kalte.

Um Phänomene wie Wärmeleitung oder -strahlung, also die Übertragung von Wärme von einem Körper zu einem anderen durch Kontakt oder in Form elektromagnetischer Strahlung, zu veranschaulichen, wird das metaphorische Konzept 'Wärme ist fluider Körper' herangezogen. Ausgehend von einer „Wärmequelle“ bewegt sich ein „Wärmestrom“, eine „Wärmemenge“. Sie kann den „Wärmeinhalt eines Gasvolumens“ bilden (WEISCHT & ENDLICHER 2008, 33, 67, 87, 182). Ein Wissenschaftler spricht von einem „Bodenwärmestrom“ (HÄCKEL 2012, 231). Aus dem Erdinneren kommt ein geothermischer „Wärmestrom“ (HÄCKEL 2012, 238). Problematisch ist auch hier, dass Wärme als etwas Stoffliches erscheint und damit aus wissenschaftlicher Sicht nicht angemessene Vorstellungen evozieren könnte, beispielsweise dass warme Luft schwerer als kalte ist, da sie eine Art Wärmestoff enthält.

### **HISTORISCHER ENTSTEHUNGSPROZESS**

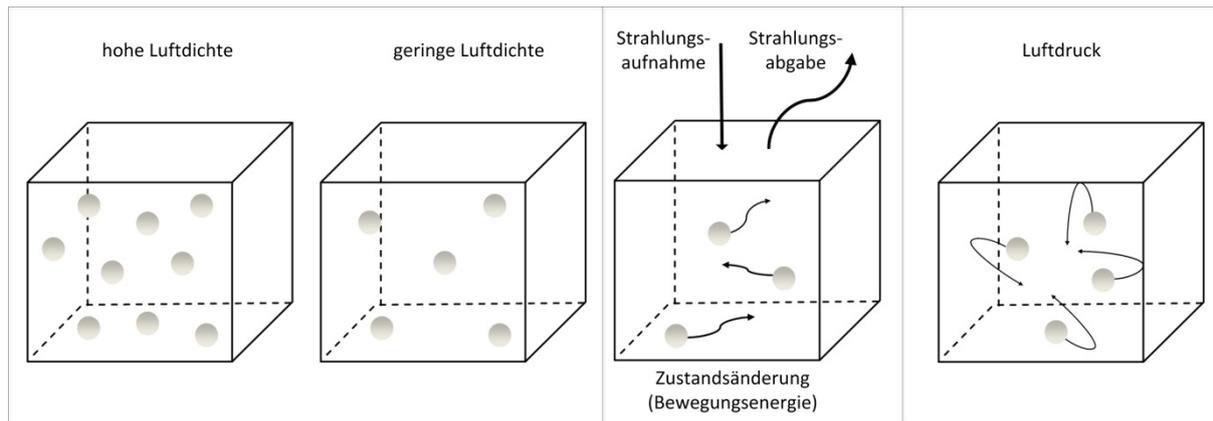
Bis in die frühe Neuzeit hinein beherrscht das Ptolemäische Weltbild die himmelsmechanischen Vorstellungen. Diese bereits in der Antike entwickelte Anschauung geht davon aus, dass die Erde den Mittelpunkt des Universums darstellt und verschiedene Sphären um sie kreisen, unter anderem eben auch die Sonne (siehe 4.1). Das heliozentrische Weltbild wird in der Neuzeit erstmals von Nicolaus Kopernicus in seinem 1543 erschienen Werk „De Revolutionibus Orbium Coelestium“ beschrieben. Darin erklärt er Tag und Nacht als Resultat der Bewegung der Erde um ihre Achse und er stellt die Bewegung der Erde und anderer Planeten um die Sonne dar. Der Universalgelehrte schafft es zu Lebzeiten kaum Anerkennung für dieses Werk zu erhalten (HAMEL 2002, 84ff.). Noch knapp 100 Jahre später muss Galileo Galilei seine Arbeit „Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo“ (dt.: Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme, das ptolemäische und das copernicanische) auf Druck der katholischen Inquisition widerrufen (HELLMANN 2000, 7ff.). Die Erkenntnisse Newtons und Keplers im 17. Jahrhundert beziehen erstmals das Konzept der Gravitation in himmelsmechanische Überlegungen mit ein. Spätestens mit Newtons 1687 erschienenem Werk „Philosophiae Naturalis Principia Mathematica“ gilt das heliozentrische Weltbild unter der Mehrheit der Wissenschaftler seiner Zeit als anerkannt (KRAFFT 1999B, 192 sowie FREUDIG ET AL. 1996, 193f.).

Die Vorstellungen über elektromagnetische Strahlung basieren auf Erkenntnissen, die erst im ausgehenden 18. und 19. Jahrhundert sukzessive gewonnen wurden. Die Vorstellung der Abhängigkeit der Strahlungsintensität vom Einstrahlungswinkel wird erstmals vom Mathematiker und Astronomen Johann Lambert beschrieben. Er beschäftigt sich in seinem 1760 erschienenen Werk „Photometria, seu de mensura et gradibus luminis colorum et umbras“ mit der Lehre von der Intensitätsmessung des Lichtes (BAUER 2006, 12ff.; HÄCKEL 2012, 165f.). Die Physiker Josef Stefan und Ludwig Boltzmann arbeiten erstmals 1879 den Zusammenhang von Strahlungsleistung und Temperatur eines Körpers heraus. Daraus aufbauend entdeckt Wilhelm Wien im Jahr 1896, wie sich

das Maximum der Strahlungsleistung eines Körpers mit Veränderung seiner Temperatur hinsichtlich der Wellenlänge verschiebt. Von Max Planck werden die Erkenntnisse zu Beginn des 20. Jahrhunderts schließlich zu einer Theorie der Wärmestrahlung weiterentwickelt (KRAFFT 1999e, 98f.; SCHNEIDER-CARIUS 1955, 322-327 und BERNHARDT 1997, 253f.).

### 5.2.2.2 Aussagen zu Luftdichte, -temperatur und -druck

#### WICHTIGE SCHEMATA (KINESTHETIC IMAGE SCHEMES)



**Abbildung 11:** Vorstellungen zu Luftdichte (links), Erwärmung von Luft (Mitte) und Luftdruck (rechts) (eigene schematische Darstellungen auf der Grundlage von HÄCKEL 2012, 17ff.; STRAHLER & STRAHLER 2009, 105ff. sowie 168f.; WEISCHET & ENDLICHER 2008, 39ff.).

Die Wissenschaftler begreifen zentrale Eigenschaften von Luft mit Hilfe bestimmter Schemata. Luftdichte (Abbildung 11 links) lässt sich gedanklich nur über das Behälter- und Teil-Ganzes-Schema fassen: Luft erscheint hierbei als mehr oder weniger gefüllter Behälter. Luftmoleküle stellen die Teile eines Ganzen, nämlich des Luftvolumens, dar. Die einzelnen Moleküle können wiederum aufgespalten werden, also als Teile eines Ganzen betrachtet werden. So enthält ein Wassermolekül weniger Teile als ein Luftmolekül und ist dadurch spezifisch leichter (HÄCKEL 2012, 17ff., STRAHLER & STRAHLER 2009, 105ff.; WEISCHET & ENDLICHER 2008, 39ff.).

Um Temperaturveränderungen von Luft (Abbildung 11 Mitte) zu verstehen, muss ebenfalls auf die basale Logik Äußeres-Grenze-Inneres sowie das Teil-Ganzes-Schema zurückgegriffen werden. Hinzu kommt das Person- und das Start-Weg-Ziel-Schema: Trifft solare Strahlung auf die Erdoberfläche, erfolgt eine selektive Absorption, d.h. ihre Energie wird z.T. „aufgenommen“ und den „Materiebausteinen in Form von zusätzlicher molekularer Bewegungsenergie“ zugeführt (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 51f.). Diese molekulare Bewegungsenergie äußert sich in Form fühlbarer Wärme (=langwellige Wärmestrahlung). Sie verteilt sich im Körper in Abhängigkeit von seiner Wärmeleitfähigkeit, der Fähigkeit der Moleküle ihre Bewegungsenergie durch Kollisionen untereinander zu übertragen. Der Körper hat nach der Absorption eine höhere Temperatur. Die langwellige Wärmeausstrahlung ist größer. Langwellige Wärmestrahlung wird von bodennahen Luftschichten absorbiert, da in Bodennähe eine größere Dichte absorbierender Luftmoleküle

vorhanden ist. Da Luft als Gas jedoch eine extrem geringe Wärmeleitfähigkeit besitzt, kann die erhöhte molekulare Bewegungsenergie auf diese Art nicht an höhere Luftschichten übertragen werden. Entsprechend nimmt die Temperatur der Atmosphäre mit der Höhe ab. Der Luftkörper nimmt also überwiegend langwellige Wärmestrahlung auf, absorbiert diese, wodurch sich sein Zustand verändert. Die Luftmoleküle bewegen sich schneller, was sich als Zunahme der Lufttemperatur messen lässt. Letztlich emittiert das Luftvolumen dadurch auch mehr langwellige Strahlung (HÄCKEL 2012, 44ff., STRAHLER & STRAHLER 2009, 112ff.; WEISCHET & ENDLICHER 2008, 63ff. sowie 101ff.).

Um das Phänomen Luftdruck zu verstehen, greifen die Wissenschaftler ebenfalls auf das Behälter-, das Teil-Ganzes- und das Start-Weg-Ziel-Schema zurück (Abbildung 11 rechts). Mit Hilfe der kinetischen Gastheorie kann die Entstehung des Luftdrucks erklärt werden. Die Moleküle eines Gases (oder einer Flüssigkeit) sind in ständiger ungerichteter Bewegung (sog. Brownsche Molekularbewegung). Die Druckkraft, die ein Gas auf eine begrenzende Wand ausübt, ist eine Folge der Stöße der Gasmoleküle gegen sie. Aufgrund der riesigen Zahl der Moleküle resultiert eine statistische Gleichverteilung der Stöße in alle Richtungen, was als allseitig gleicher Luftdruck messbar ist. Eine Temperaturerhöhung würde die kinetische Energie der Moleküle erhöhen und damit die Kraft der Stöße. Der Luftdruck würde steigen. Er ist also einerseits von der Temperatur und andererseits von der Anzahl der Teilchen, also der Luftdichte abhängig. Eine Volumenvergrößerung würde eine Verringerung des Luftdrucks bewirken, da weniger Moleküle pro Volumeneinheit vorhanden wären und damit die Zahl der Stöße pro Zeiteinheit verkleinert würde (HÄCKEL 2012, 37ff., STRAHLER & STRAHLER 2009, 168f.; WEISCHET & ENDLICHER 2008, 121ff.).

#### **METAPHERN UND METAPHORISCHE KONZEPTE**

Dass Luft häufig über das Behälter-Schema begriffen wird, zeigt sich auf der sprachlichen Ebene durch entsprechende Metaphern: eine „Luftsäule“ (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 135; HÄCKEL 2012, 38), ein „Luftquantum“ (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 141), ein „Luftkörper“ (STRAHLER & STRAHLER 2009, 142), ein „Luftpaket“ und ein „Luftvolumen“ (HÄCKEL 2012, 46), eine „Luftmasse“ (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 134), „blasenförmige Pakete“ (STRAHLER & STRAHLER 2009, 144) „Luftvolumina“ (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 135), eine „riesige Luftblase“ (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 181), ein „Schlauch“ (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 181, 184), eine „Walze“ (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 151). Das metaphorische Konzept 'Luft ist ein Behälter' ist einerseits unentbehrlich, um Eigenschaften oder Phänomene wie Luftdichte, -druck oder die Temperaturzunahme von Luft zu verstehen. Andererseits besteht Luft nicht tatsächlich aus Körpern oder Behältern. Sich bewegende Luft hat grundsätzlich andere Eigenschaften als sich bewegende Körper.

Druckgebiete werden über den Quellbereich 'Person' veranschaulicht: Sie haben „Aktionszentren“ (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 250) und „Zugbahnen“ (STRAHLER & STRAHLER 2009, 206). Organisch erscheinen sie, da sie Kerne enthalten oder Zellen besitzen (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 241, 250). Dieses metaphorische Konzept beleuchtet einerseits Zusammenhänge, Bestandteile und Bewegungen von Luftdruckgebieten. Allerdings sind Kerne oder Zellen nicht in ihrer biologischen Funktion zu verstehen. Druckgebiete bestehen aus einer Zelle, was sie als Teile eines Ganzen, eines globalen Drucksystems, kennzeichnen soll.

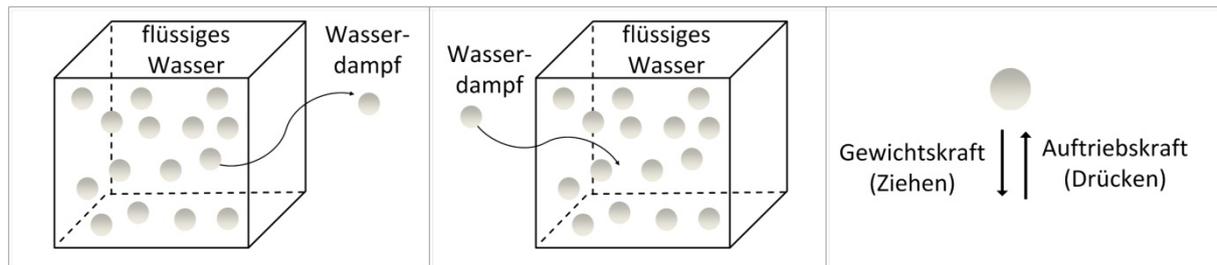
Zudem erscheinen Druckgebiete als Festkörper, wenn Wissenschaftler von Druckgürteln sprechen (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 245, 247; HÄCKEL 2012, 299). Hierüber wird die idealtypische, schematische Form oder zonale Anordnung der Druckgebiete im Kontext der Allgemeinen Zirkulation veranschaulicht. Die Gefahr besteht, dass Lerner dieses metaphorische Konzept missverstehen und Druckgebiete als etwas Festes, Statisches betrachten.

### **HISTORISCHER ENTSTEHUNGSPROZESS**

Die heutigen Vorstellungen zu Luftdruck, –temperatur und –dichte werden durch Experimente seit dem ausgehenden 18. Jahrhunderts gewonnen. Wichtig ist die Arbeit John Daltons, der nachgewiesen hat, dass verschiedene Gase in Abhängigkeit von ihrer Temperatur einen spezifischen Druck ausüben. Luft verhält sich häufig nicht wie ein Gasgemisch, sondern wie ein einziges Gas. Bis ins 18. Jahrhundert wurde Luft aufgrund dieser Problematik als einheitliches Element betrachtet. Erst der Nachweis von Kohlensäure und später anderer Gase in der Luft veränderte diese Vorstellung (SCHNEIDER-CARIUS 1955, 92, 270ff. sowie SPÄNKUCH 2002, 11ff.). Die kinetische Gastheorie, mit deren Hilfe die Autoren zahlreiche Prozesse veranschaulichen, entwickelten die Physiker Rudolf Clausius (vgl. KRAFFT 1999e, 98 sowie FREUDIG ET AL. 1996, 89), Ludwig Boltzmann (vgl. WIEDERKEHR 1999c, 61f. sowie FREUDIG et al. 1996, 49) und James Clerk Maxwell (vgl. WIEDERKEHR 1999a, 285ff. sowie FREUDIG ET AL. 1996, 286f.) Ende des 19. Jahrhunderts. Vorarbeit leisteten hierzu u.a. der schottische Botaniker Robert Brown, der 1827 die molekulare Wärmebewegung von Teilchen in Flüssigkeiten beobachtete, und der niederländische Physiker Johannes Diderik Waals, der die Anziehungskräfte von Molekülen in Flüssigkeiten und Gasen untersuchte und 1881 eine Theorie zur Oberflächenspannung und Kapillarität entwickelte, wofür er 1910 mit dem Nobelpreis für Physik geehrt wurde (FREUDIG ET AL. 1996, 65 und 410).

### 5.2.2.3 Aussagen zu Verdunstung, Kondensation und Niederschlag

#### WICHTIGE SCHEMATA (KINESTHETIC IMAGE SCHEMES)



**Abbildung 12: Vorstellungen zu Verdunstung (links), Kondensation (Mitte) und Niederschlagsbildung (links) (eigene schematische Darstellung auf der Grundlage von HÄCKEL 2012, 94ff.; STRAHLER & STRAHLER 2009, 135ff.; WEISCHET & ENDLICHER 2008, 160ff.).**

Die Wissenschaftler begreifen Vorgänge von Verdunstung und Kondensation u.a. über das Behälter-, das Start-Weg-Ziel und das Teil-Ganzes-Schema (Abbildung 12). Wasserdampf ist unsichtbares, gasförmiges Wasser ( $H_2O$ ). Im täglichen Sprachgebrauch bezeichnet Dampf ein Kondensationsprodukt, also Wasser in flüssiger Phase (winzige Tröpfchen), was jedoch kein Wasserdampf in diesem Sinne ist. Durch den Vorgang der Verdunstung wechselt Wasser vom flüssigen in den gasförmigen Zustand. Dies kann mit Hilfe der kinetischen Gastheorie veranschaulicht werden (Abbildung 12 links): Wie im Gas befinden sich die Moleküle im flüssigen Wasser in unregelmäßiger Bewegung, lediglich die molekulare Dichte ist höher. Erhöht sich die Temperatur der Flüssigkeit, schaffen es Moleküle mit der Bewegungsrichtung nach außen die Wasseroberfläche zu überwinden. Hierzu muss die kinetische Bewegungsenergie stärker als die Anziehungskräfte der Moleküle, die sog. Waalschen Molekularkräfte, untereinander sein. Die basale Logik Inneres-Grenze-Äußeres spielt hier also eine entscheidende Rolle. Im Inneren der Flüssigkeit, wo jedes Molekül ringsum von anderen umgeben ist, heben sich die Anziehungskräfte gegenseitig auf. An der Oberfläche jedoch wirken diese Kräfte zum Inneren hin und verursachen hierdurch die sog. Oberflächenspannung. Überwindet ein Molekül die Oberfläche, ist die Flüssigkeit an energiereichen Molekülen verarmt und kühlt daher ab. Die Geschwindigkeit des Moleküls verringert sich beim Überwinden der Oberflächenspannung – daher verringert sich auch die Temperatur des Wasserdampfs und sog. Verdunstungskälte entsteht. Umso wärmer Luft ist, desto mehr Wasserdampf kann sie enthalten, denn mit der Temperatur steigt die Bewegungsenergie der Moleküle, die der Anziehungskraft der Moleküle untereinander entgegen wirkt. Geringere Temperatur bedeutet geringere Bewegungsenergie und relativ hierzu höhere van der Waalsche Molekularkräfte (HÄCKEL 2012, 94ff.; STRAHLER & STRAHLER 2009, 135ff.; WEISCHET & ENDLICHER 2008, 160ff.).

In der Atmosphäre beginnt Kondensation (Abbildung 12 Mitte) mit Hilfe von Aersolen, den sog. Kondensationskernen. Diese winzigen Schwebepartikel (Staub, ozeanische Salze) besitzen „Geburtshelfereigenschaften“ (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 206f.): Aufgrund ihrer im Vergleich zu den

gasförmigen Wassermolekülen hohen Anziehungskraft lagern sich die Wassermoleküle bei entsprechender Temperatur bzw. Konzentration an, was häufig eine Lösung der Partikel zur Folge hat. Die so wachsenden Kondensationskerne erscheinen ab einer bestimmten Größe zunächst diesig und schließlich dunstig und milchig. Ursache ist, dass die Dunstpartikel alle Wellenlängen des sichtbaren Lichts gleichmäßig diffus reflektieren, was in der Ansammlung weiß erscheint. Aufgrund der Waalschen Molekularkräfte kommt es bei sinkender Temperatur oder steigendem Wasserdampfgehalt der Luft zur Kondensation an den Aerosolen: Die Bewegungsenergie der Wassermoleküle erhöht sich beim Übertritt von der gasförmigen in die flüssige Phase aufgrund der stärkeren Anziehungskräfte der dichter gepackten Moleküle, die an der Oberfläche nach innen wirken und ein übertretendes Molekül beschleunigen. Die größere Bewegungsenergie äußert sich in Form einer höheren Temperatur der Flüssigkeit, welche wiederum mehr fühlbare Wärme ausstrahlt. Es entsteht sog. Kondensationswärme. In der Atmosphäre ist unterkühltes Wasser in flüssiger Phase mit bis zu  $-30^{\circ}\text{C}$  keine Seltenheit. Das Gefrieren wird aufgrund der geringeren Dichte von Eis gegenüber Wasser in flüssiger Form und der damit verbundenen geringeren Waalschen Molekularkräfte häufig verhindert (HÄCKEL 2012, 87ff.; STRAHLER & STRAHLER 2009, 141ff.; WEISCHET & ENDLICHER 2008, 204ff.).

Die Entstehung von Niederschlag wird v.a. über Ziehen- und Drücken-Schemata (Abbildung 12 rechts) verstanden. In den feuchten Tropen erfolgt Niederschlagsbildung häufig durch wiederholtes Zusammenfließen, sog. Koagulieren als Folge von Zusammenstößen einzelner Tröpfchen in der Wolke. Erreichen die Tröpfchen eine bestimmte Größe, ist die auf sie wirkende Schwerkraft stärker als die in der tropischen Wolke wirkende Auftriebskraft sowie der (geringe) atmosphärische Reibungswiderstand. Als Niederschlag fallen die Tropfen auf die Erdoberfläche, sofern sie nicht auf der Fallstrecke verdunsten. Aufgrund der starken Aufwinde hält der Koagulationsvorgang in den Tropen jedoch sehr lange an, bis die oberen Teile der Wolke mit extrem großen Tropfen (bis max. 5mm Durchmesser) angereichert sind, aus denen schließlich bei Nachlassen des Aufwindes ein konzentrierter Regen als sog. Platzregen oder Starkregen fällt. Typische Wolkenformen in den feuchten Tropen sind sog. Cumuluswolken, auch Haufen- oder Quellwolken genannt. Merkmale sind „1. eine relativ große Vertikalerstreckung bei begrenzter Grundfläche, 2. eine lockere (horizontale) Verteilung mit wolkenfreien Zwischenräumen, 3. Quellformen („Blumenkohloberfläche“) nach oben, und 4. flache, deutlich markierte einheitliche Begrenzungen nach unten“ (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 213). In den Tropen erreichen die Cumuluswolken mächtige Ausdehnungen als Schauer- und Gewitterwolken (Cumulonimbus) mit einer vertikalen Erstreckung von bis zu 12 Kilometern (HÄCKEL 2012, 124ff.; STRAHLER & STRAHLER 2009, 147ff.; WEISCHET & ENDLICHER 2008, 212ff.).

### **METAPHERN UND METAPHORISCHE KONZEPTE**

Um das Verhalten von Wassermolekülen während des Verdunstungs- oder Kondensationsvorganges zu veranschaulichen, verwenden die Autoren das metaphorische Konzept 'Moleküle sind Personen': Moleküle fangen andere Moleküle ein. Das Überwinden der Oberflächenspannung bereitet den Molekülen Schwierigkeiten. Einige „entfliehen“ oder suchen Anlegestellen (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 163f.). Problematisch hierbei ist, dass es sich nicht tatsächlich um intendierte Handlungen mit Absichten oder Zwecken handelt.

Auch die Luft wird im Zusammenhang mit Wasserdampf als Person verstanden. Sie kann Wasserdampf mit sich führen (HÄCKEL 2012, 63). Wasserdampf wird von ihr aufgenommen, mitgeführt und in eine andere Phase überführt. Kondensiertes Wasser erscheint dabei als Ausscheidung, die sich außerhalb des Luftkörpers befindet (HÄCKEL 2012, 96; WEISCHET & ENDLICHER 2008, 171ff.). Nachvollziehbar werden hierdurch die Vorgänge beim Aggregatzustandswechsel und der Bewegung von Wasser in flüssiger bzw. gasförmiger Phase. Zum Beispiel ändert sich der Zustand von Luft (ihre Temperatur) nach Umwandlung (Kondensation). Jedoch wird auch hier die aus wissenschaftlicher Sicht nicht angemessene Vorstellung evoziert, dass es sich um intendierte Handlungen mit Absichten oder Zwecken handelt.

Wolken werden als wachsende, organische Körper verstanden. Die Autoren sprechen von „Kondensationskernen“ (STRAHLER & STRAHLER 2009, 143), „Gefrierkernen“ (HÄCKEL 2012, 117), „Wolkenkern(en)“ oder „Kristallisationskeime(n)“, „Kristallisationskerne(n)“ mit „Geburtshelfereigenschaften“ oder Wolken besitzen eine „Blumenkohloberfläche“ (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 204ff.). Es findet ein „Zusammenwachsen der Tröpfchen“ (STRAHLER & STRAHLER 2009, 147) statt. Veranschaulicht werden hierdurch Vorgänge der Entstehung und Entwicklung von Wolken bzw. deren Form. Problematisch ist jedoch, dass es im Gegensatz zu organischem Wachstum nicht einen Kern gibt, von dem das Wachstum ausgeht, sondern eine Vielzahl. Zudem sind Wolken keine Festkörper.

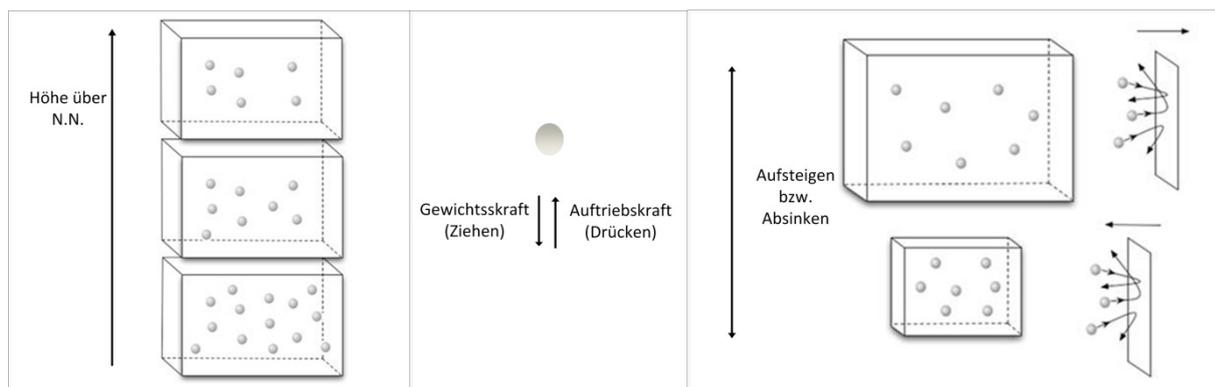
Letzteres kann ebenfalls als metaphorisches Konzept rekonstruiert werden: 'Wolken sind Festkörper'. Die Autoren sprechen von „wattebauschartige(n) Wolkenhaufen“ mit „unscharfen, faserigen Rändern“, von „Quelltürme(n)“ und „Cirren-Schirme(n)“ (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 219), von einer „Wolkenbank“ (HÄCKEL 2012, 116), einer „Wolkenwalze“ (HÄCKEL 2012, 119), einer „Föhnmauer“ (HÄCKEL 2012, 124). Es kann zu einem „Wolkenbruch“ (STRAHLER & STRAHLER 2009, 152) kommen. Veranschaulicht wird damit die äußere Form von Wolken. Sie bestehen jedoch nicht aus einer kohärenten Substanz, sondern aus einer Vielzahl winziger Wassertröpfchen, bei denen Gewichtskraft und Auftriebskraft ausgeglichen sind.

## HISTORISCHER ENTSTEHUNGSPROZESS

Die Vorstellungen der Autoren von Wasserdampf basieren u. a. auf der Forschung von John Dalton, der 1803 seine Arbeit zum Dampfdruck des Wassers in Abhängigkeit seiner Menge und Temperatur veröffentlicht (WIEDERKEHR 1999b, 111f. sowie FREUDIG ET AL. 1996, 103). Die kinetische Gastheorie wird, wie bereits erwähnt, gegen Ende des 19. Jahrhunderts entwickelt. Der schottische Naturforscher James Hutton veröffentlicht 1793 eine noch heute gültige Theorie zur Niederschlagsbildung, in der Prozesse der Verdunstung und Kondensation erläutert werden (FREUDIG ET AL. 1996, 227). Die betreffende Mikrophysik der Wolken, ihre Strukturen und die Größe von Wassertröpfchen, die genaueren Vorgänge bei der Kondensation und die Bedeutung von Staubpartikeln als Kondensationskernen werden erstmals Ende des 19. Jahrhunderts erforscht (SCHNEIDER-CARIUS 1955, 271ff.; EMEIS 1998, 215f. sowie BRUTSAERT 1991, 48ff.).

### 5.2.2.4 Aussagen zum Aufbau der Atmosphäre und zu vertikalen Luftbewegungen

#### WICHTIGE SCHEMATA (KINESTHETIC IMAGE SCHEMES)



**Abbildung 13:** Vorstellungen zum Aufbau der Atmosphäre (links), zu auf Luft wirkende Kräfte (Mitte) und zu den Ursachen vertikaler Luftbewegungen und zu adiabatischen Prozessen (rechts) (eigene schematische Darstellung auf der Grundlage von HÄCKEL 2012, 37ff. sowie 252ff.; STRAHLER & STRAHLER 2009, 141ff.; WEISCHET & ENDLICHER 2008, 39ff. sowie 182ff.).

Die Wissenschaftler erfassen den vertikalen Aufbau der Atmosphäre sowie entsprechende Luftbewegungen vor allem über das Behälter-Schema. Bei letzteren spielt, wie bei allen Bewegungen, auch das Start-Weg-Ziel-Schema eine wichtige Rolle (siehe Abbildung 13).

Luft weist als Gasgemisch die Eigenschaft der Kompressibilität auf (siehe Abbildung 13 links). Die Dichte der Luft nimmt daher aufgrund des Eigengewichtes der über ihr befindlichen Luftmassen zur Erdoberfläche hin zu. Oder anders formuliert: Luftdichte und mit ihr korrelierender Luftdruck nehmen mit der Höhe exponentiell ab (HÄCKEL 2012, 37ff.; STRAHLER & STRAHLER 2009, 170; WEISCHET & ENDLICHER 2008, 39ff.).

Vertikale Luftbewegungen haben u. a. thermische Ursachen. Die Wissenschaftler sprechen von thermischer Konvektion: In Anhängigkeit von der solaren Strahlungsintensität und der Beschaffenheit der Erdoberfläche erwärmen sich bodennahe Luftmassen unterschiedlich stark und schnell. Die

Erwärmung eines Luftvolumens bedeutet eine Zunahme der molekularen Bewegungsenergie, die wiederum eine Zunahme des Luftdrucks zur Folge hat. Der höhere Gasdruck bewirkt eine Ausdehnung des Luftvolumens auf Kosten der umgebenden Luftschichten. Luft wird also als Behälter betrachtet (siehe Abbildung 13 rechts). Die erwärmte Luft wird aufgrund ihrer geringeren Dichte von der umliegenden Luft verdrängt und steigt auf. Die Auftriebskraft, die über das Drücken-Schema verstanden werden kann (siehe Abbildung 13 Mitte), ergibt sich aus der Differenz der Gewichtskraft der umgebenden und der aufsteigenden Luft und bewirkt eine Beschleunigung. Da aufsteigende „Luftblasen“ sich durch „ruhende Luftschichten hindurchzwängen“ müssen, werden diese an den Seiten abgebremst, so dass die aufsteigende Luft die Form eines „Schlauch(s)“ annehmen kann (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 181). Die Aufwärtsbewegung dauert so lange an, bis die Gewichtskraft der umgebenden Luft, die über das Ziehen-Schema verstanden wird, der Auftriebskraft der aufgestiegenen Luft entspricht. In der Umgebung eines solchen „Thermikschlauch(es)“ kommt es zu „Abwindfelder(n)“ (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 181) als Kompensationsströmen. Abwinde entstehen aufgrund einer, im Vergleich zur Gewichtskraft geringeren Auftriebskraft, was beispielsweise bei Abkühlung von Luft (Verringerung des Volumens, höhere Dichte) der Fall ist (HÄCKEL 2012, 252ff.; STRAHLER & STRAHLER 2009, 170ff.; WEISCHET & ENDLICHER 2008, 178ff.).

Luft verändert bei vertikalen Bewegungen Volumina und Temperatur, ohne dass Energie „von außen zu- oder (...) nach außen abgeführt“ wird (siehe oben: geringe Wärmeleitfähigkeit der Luft). Diese sog. adiabatische Zustandsänderung, abgeleitet vom griechischen Begriff für „nicht hindurchschreiten“ (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 183), kann ebenfalls mit Hilfe der kinetischen Gastheorie veranschaulicht und über das Behälter-Schema verstanden werden (siehe Abbildung 12 rechts). In einem ruhenden Luftvolumen befinden sich die Moleküle in ständiger, ungeordneter Bewegung. Der Luftdruck ist das Resultat der auf die Volumenbegrenzung auftreffenden Moleküle (siehe oben). Das Zurückwerfen erfolgt nach den Gesetzen des elastischen Stoßes, d.h. „die Geschwindigkeit des Moleküls (...) [ist] auf dem Rückweg nach dem Stoß genauso groß wie vor dem Auftreffen“ (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 182). Steigt dieses Luftvolumen auf, wird der konstant bleibende innere Druck höher sein als der der umgebenden Luft, da dieser mit der Höhe abnimmt (siehe oben). Die Folge wäre eine Volumenausdehnung, eine sog. adiabatische Dilatation, da die Moleküle im Inneren eine größere Kraft auf die Begrenzung ausüben als die äußeren Moleküle. Da die Moleküle von innen auf eine sich nach außen bewegende Wand stoßen, werden sie nicht mit unveränderter Geschwindigkeit zurückgeworfen, sondern ein Teil der Bewegungsenergie wird von der zurückweichenden Begrenzung aufgenommen. Die geringere Rückfluggeschwindigkeit bedeutet für das Luftvolumen eine Verminderung der inneren Energie, seine Temperatur nimmt ab. Bei absinkenden Luftvolumen findet entsprechend der umgekehrte Vorgang, sog. adiabatische Kompression statt. Da der Maximale Wasserdampfgehalt eines Luftvolumens abhängig von seiner Temperatur ist (siehe oben), führt

adiabatische Dilatation häufig zu Kondensation. Bei solchen sog. feuchtadiabatischen Prozessen beträgt der Temperaturverlust durch das Freisetzen von Kondensationswärme (siehe oben) nur etwa 0,5 bis 0,7°Celsius pro 100m, bei sog. trockenadiabatischen Prozessen liegt die Temperaturveränderung bei etwa 1°Celsius pro 100m. Die Temperatur eines feuchtadiabatisch aufsteigenden Luftkörpers sinkt langsamer, entsprechend ist die Temperaturdifferenz zwischen aufsteigender und umgebender Luft größer und der Aufstieg erfolgt schneller und weitreichender. Dies ist beispielsweise im Bereich der ITCZ der Fall (HÄCKEL 2012, 252ff.; STRAHLER & STRAHLER 2009, 141ff.; WEISCHET & ENDLICHER 2008, 182ff.).

### **METAPHERN UND METAPHORISCHE KONZEPTE**

Die Wissenschaftler nutzen zur Veranschaulichung des abstrakten Zielbereiches `Atmosphäre` die Quellbereiche `Gebäude` bzw. `aufeinanderliegende Bestandteile`: Die Atmosphäre besitzt eine „Stockwerksgliederung“ (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 42). Troposphäre und Stratosphäre „bauen den unteren Teil der Atmosphäre auf“ (STRAHLER & STRAHLER 2009, 112). Es gibt „Grenzschicht(en)“ (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 42) bzw. verschiedene, aufeinander liegende Schichtungen (HÄCKEL 2012, 58, 60). Begrenzt wird die Atmosphäre durch eine „Luft-“ oder „Gashülle“ (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 41, 237). Einerseits veranschaulicht dieses metaphorische Konzept, dass es sich bei der Atmosphäre nicht um eine homogene Masse handelt. Andererseits besteht die Gefahr, dass Lerner die Metapher wörtlich verstehen und davon ausgehen, dass Gegenstände oder Luftteilchen Grenzen nicht passieren könnten, dass diese fest seien.

Um den abstrakten Zielbereich `vertikale Luftbewegungen` zugänglich zu machen, greifen die Wissenschaftler, wie oben beschrieben, auf das metaphorische Konzept `Luft ist ein Behälter` zurück. Einerseits können hierdurch relevante Aspekte wie Luftdichte oder –volumen sowie ihre Veränderungen verständlich gemacht werden, andererseits besteht auch hier die Gefahr, dass Lerner dieses metaphorische Konzept zu wörtlich verstehen und Luftbehältern Eigenschaften von Festkörpern zuordnen, beispielsweise dass diese sich in ihrer äußeren Form nicht verändern.

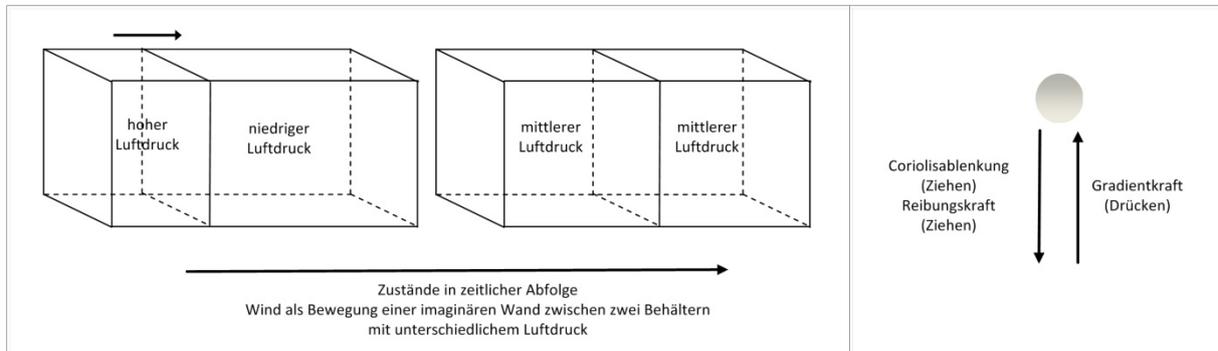
### **HISTORISCHER ENTSTEHUNGSPROZESS**

Das Prinzip der Auftriebskraft von Körpern in Fluiden wurde erstmals von Archimedes im 3. Jahrhundert vor Christus beschrieben (KRAFFT 1999a, 20ff. sowie FREUDIG ET AL. 1996, 11). Die Vorstellung einer auf die Luft wirkenden Gewichtskraft geht auf die Arbeit des englischen Physikers und Mathematikers Sir Isaac Newton „Philosophiae naturalis principia mathematica“ aus dem Jahr 1687 zurück (SCRIBA 1999, 312f. sowie FREUDIG ET AL. 1996, 308f.). Die Ausführungen der Autoren zu adiabatischen Prozessen basieren v. a. auf den Arbeiten von Julius von Hann. Der österreichische Meteorologe und Klimatologe untersuchte in der 2.Hälfte des 19. Jahrhunderts u. a. das Phänomen

des Steigungsregens und des Föhneffekts und übertrug seine Erkenntnisse erstmals auf den Passatkreislauf (SCHNEIDER-CARIUS 1955, 255f. und FREUDIG ET AL. 1996, 195).

### 5.2.2.5 Aussagen zu horizontalen Luftbewegungen und zur Coriolisablenkung

#### WICHTIGE SCHEMATA (KINESTHETIC IMAGE SCHEMES)



**Abbildung 14: Vorstellungen zu Windentstehung (links) und zu beteiligten Kräften (rechts) (eigene schematische Darstellung auf der Grundlage von HÄCKEL 2012, 252ff.; STRAHLER & STRAHLER 2009, 170ff.; WEISCHET & ENDLICHER 134ff. sowie 235ff.).**

Horizontale Luftbewegungen werden durch Luftdruckunterschiede initiiert. Die basale Logik Inneres-Grenze-Äußeres spielt hier eine wichtige Rolle. Zudem werden Drücken- und Ziehen-Schemata verwendet. Wind entsteht durch die sog. Gradientkraft: Die Wissenschaftler stellen sich eine imaginäre Wand zwischen zwei Behältern vor, die sich durch die Stöße der sich frei bewegenden Luftmoleküle verschiebt (siehe Abbildung 14 links). Der Gasdruck eines Luftvolumens kann unter Berücksichtigung seiner Masse als Kraft pro Masseneinheit angegeben werden (vgl. Luftdruck = Kraft pro Fläche). Bei unterschiedlichem Gasdruck zweier Luftvolumina wirkt also eine Kraft, die Gradientkraft, in Richtung des niedrigeren Drucks. Entsprechend verschiebt sich die imaginäre Wand zu Ungunsten des Luftvolumens mit dem niedrigeren Luftdruck. Die Gradientkraft ergibt sich aus der Differenz der Kraft pro Masseneinheit des Luftvolumens mit dem hohem und des mit dem niedrigen Luftdruck. Sie ist zudem abhängig von der räumlichen Distanz und bewirkt eine Beschleunigung des Luftvolumens mit dem höheren Druck in Richtung des Luftvolumens mit dem niedrigen Druck. (siehe Abbildung 14 links; HÄCKEL 2012, 252ff.; STRAHLER & STRAHLER 2009, 170ff.; WEISCHET & ENDLICHER 134ff.).

Der Gradientkraft, die auch als Drücken verstanden werden kann, entgegen wirkt die sog. Reibungskraft (siehe Abbildung 14 rechts). Sie kann über das Ziehen-Schema verstanden werden, denn sie bremst den Wind ab, insbesondere in der Nähe der Erdoberfläche je nach Beschaffenheit und Form und führt u.a. zu dynamischen Effekten, die bis zu 2000m hoch reichen. Aufgrund der Rotation der Erde und ihrer Kugelform wirkt auf sich bewegende Luft eine ablenkende Kraft, die sog. Coriolisablenkung, die ebenfalls über das Ziehen-Schema verstanden werden kann. Sie ist umso

stärker, je näher sich die bewegende Luft am Rotationszentrum, also der Erdachse, befindet und je schneller sich die Luft bewegt. Ursächlich sind unterschiedliche Rotationsgeschwindigkeiten verschiedener Breitenkreise. Während sich die Erdoberfläche am Äquator mit etwa 1674km/h bewegt, liegt die Geschwindigkeit bei 60° Breite bei etwa 835km/h und am Pol bei 0km/h. Beispielsweise würde Luft oberhalb des Äquators bei polwärtiger Bewegung trägheitsbedingt eine höhere Mitführungsgeschwindigkeit beibehalten, was auf der Südhalbkugel eine Ablenkung in Bewegungsrichtung nach links, auf der Nordhalbkugel in Bewegungsrichtung nach rechts zur Folge hätte. Bei einer breitenkreisparallelen Bewegung erfolgt ebenfalls eine entsprechende Ablenkung: Da sich Westwinde mit der Drehrichtung der Erde bewegen, wirken stärkere Fliehkräfte in Richtung der sich schneller drehenden Breiten, also zum Äquator. Eine geringere Fliehkraft als Folge eines Ostwindes entgegen der Drehrichtung der Erde bewirkt eine Ablenkung polwärts. Da sich Luft polwärts dem Rotationszentrum nähert, der Abstand zur Erdachse bei einem gedachten Querschnitt entlang eines Breitenkreises immer geringer wird und am Pol sogar gleich null ist, nimmt die Coriolisablenkung polwärts zu. Da sie nur auf bewegte Luft, die sich nicht am Äquator befindet, wirkt, wird sie auch als Scheinkraft bezeichnet (HÄCKEL 2012, 280ff.; STRAHLER & STRAHLER 2009, 174ff.; WEISCHET & ENDLICHER 137ff. sowie 235ff.).

### **METAPHERN UND METAPHORISCHE KONZEPTE**

Das metaphorische Konzept 'Wind ist fließendes Wasser' lässt sich rekonstruieren. Luft „strömt“ (HÄCKEL 2012, 256; WEISCHET & ENDLICHER 2008, 151) entlang eines „Gefälle(s)“ (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 134, 247) vom „Hoch“ zum „Tief“ (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 138f.), in eine „Tiefdruckrinne“ oder „Tiefdruckfurche“ (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 246,251,256). Sie kann sich durch Engstellen „hindurchzwängen“ (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 181), jedoch auch gestaut (STRAHLER & STRAHLER 2009, 149; WEISCHET & ENDLICHER 2008, 263) oder gesperrt (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 193) werden. Es gibt einen „Massenabfluss“ (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 269) oder eine „Ausgleichsströmung“ (STRAHLER & STRAHLER 2009, 172). Die Autoren sprechen von Luft, die „wegfließt“ (HÄCKEL 2012, 257) oder „abfließt“ (STRAHLER & STRAHLER 2009, 173). Einerseits werden durch das metaphorische Konzept Art und Bedingungen der Bewegung von Luft nachvollziehbar. Andererseits hat Wasser grundsätzlich andere Eigenschaften als Luft. Vorgänge der Kompression und Dilatation sowie die eigentliche Ursache der Gradientkraft können damit nicht verstanden werden.

Wind erscheint zudem als Person. Die Wissenschaftler sprechen vom „Erzwingen“ von Luftbewegungen (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 180, 198), vom Hindurchzwängen (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 181) oder „Einschlafen“ der Passate (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 257). Winde pflanzen sich fort (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 137), versuchen ihre Geschwindigkeit beizubehalten (HÄCKEL 2012, 264), reagieren auf etwas (STRAHLER & STRAHLER 2009, 172) oder halten etwas fest

(WEISCHET & ENDLICHER 2008, 39,41). Sie besitzen ein „unheimliches Wesen“ (HÄCKEL 2012, 252). Veranschaulichen lässt sich durch dieses metaphorische Konzept die Art der Bewegung von Luft, nicht jedoch die Ursache. Zudem erscheinen Luftbewegungen als intendierte Handlungen, was aus wissenschaftlicher Sicht nicht angemessen ist.

### **HISTORISCHER ENTSTEHUNGSPROZESS**

Die Vorstellung von Wind als bewegter Luft existiert schon seit der Antike – ein genaues Verständnis der auf die Luft wirkenden Kräfte und damit die Möglichkeit einer Prognose von Windrichtung und Geschwindigkeit basiert auf Erkenntnissen, die im Laufe darauffolgender Jahrhunderte sukzessive gewonnen wurden. Der niederländische Meteorologe Christophorus Buys-Ballot erforschte u. a. die Wirkungsweise der Gradientkraft und formulierte 1853 das barische Windgesetz: Die Stärke der Luftbewegung steht in Beziehung zur Neigung der Niveauflächen des Luftdrucks oder der Richtung des Ansteigens dieser Flächen. Er untersuchte auch den bodennahen Reibungseinfluss auf den Wind (SCHNEIDER-CARIUS 1955, 220ff.; FREUDIG ET AL. 1996, 73f. sowie BERNHARDT 1997, 249ff. und PAULUS 1995, 129ff.). Die Corioliskraft ist nach ihrem Entdecker, dem französischen Mathematiker und Physiker Gaspard Gustave de Coriolis, benannt, der im Jahr 1835 eine Arbeit zur Trägheit bewegter Körper in einem rotierenden System veröffentlichte. Das Prinzip einer rotationsbedingten Ablenkung sich polwärts bewegender Luft wurde bereits von George Hadley postuliert (KÖRBER 1987, 168 und PERSSON 2005, 1-24).

## **5.2.3 Strukturierung der Wissenschaftleraussagen**

### **5.2.3.1 Aufwinde im Bereich der ITCZ**

Im Bereich der Innertropischen Konvergenzzone (ITCZ) findet aus vier Gründen hochreichende thermische Konvektion statt: 1. sehr starke Erwärmung bodennaher Luft, 2. hoher Wasserdampfanteil und geringeres spezifisches Gewicht von Wasserdampf, 3. feuchtadiabatische Aufstieg, 4. Wechselwirkung Konvergenz-Konvektion-Divergenz.

(1) Die Tropen sind im Jahresmittel strahlungsintensivste Zone, da hier, bedingt durch die Schiefe der Ekliptik, der Einstrahlungswinkel der Sonne am steilsten ist. Eine Zone größter Strahlungsintensität, bedingt durch den Zenitstand der Sonne, bewegt sich im jahreszeitlichen Verlauf zwischen 23,5°N und 23,5°S. Diese himmelsmechanischen Zusammenhänge werden vor allem mittels Teil-Ganzes- und Start-Weg-Ziel-Schema verstanden. Die Erwärmung bodennaher Luft erfolgt vor allem über Absorption terrestrischer Wärmestrahlung. Diese Vorgänge werden über das Person-Schema verstanden. Höhere Luftschichten erwärmen sich aufgrund ihrer geringeren Dichte und der geringen Wärmeleitfähigkeit der Luft nicht so stark.

(2) Der Wasserdampfanteil der Luft ist im Bereich der ITCZ sehr hoch, da aufgrund der hohen Temperaturen viel Wasser verdunstet, welches mit den Passatwinden in die inneren Tropen gelangt. Kondensation findet aufgrund der Passatinversion auf dem Weg in die inneren Tropen nicht statt. Diese Vorgänge können über das Start-Weg-Ziel-, das Behälter- und das Teil-Ganzes-Schema verstanden werden: Das spezifisch geringere Gewicht von Wasserdampf wird vorstellbar, wenn Wassermoleküle und Luftmoleküle analysiert werden und ihre Bestandteile miteinander verglichen werden. Um die Vorgänge der Verdunstung und Kondensation zu verstehen, stellen sich die Wissenschaftler Wassermoleküle in weitem Abstand zueinander in ständiger, unregelmäßiger Bewegung zwischen den Luftmolekülen vor. Zwischen den Wassermolekülen besteht eine molekulare Anziehungskraft. Ist diese größer als die kinetische Energie, die die Wasserteilchen in Bewegung hält, kommt es zur Kondensation. Wärme wird freigesetzt, weil die Wasserteilchen beim Übertritt in die flüssige Phase beschleunigt werden. Die Bewegungsenergie der Wasserteilchen wirkt der Anziehungskraft entgegen. In einer Flüssigkeit befinden sich Wasserteilchen in unregelmäßiger, ständiger Bewegung, sind jedoch dichter beieinander als im gasförmigen Zustand. Erhöht sich die Temperatur des flüssigen Wassers, erhöht sich die Bewegungsenergie der Teilchen. Diese können ab einer bestimmten Temperatur die molekulare Anziehung überwinden. Die Flüssigkeit verarmt an energiereichen Teilchen und kühlt ab. Mehr Wasserteilchen in der Luft bedeuten höhere Anziehungskraft und damit Kondensation. Höhere Lufttemperaturen, wie sie im Bereich der inneren Tropen vorherrschen, haben eine größere Bewegungsenergie und damit mehr potentielle Wasserteilchen in der Luft zur Folge.

(3) Wissenschaftler stellen sich aufsteigende Luft als Behälter mit einer geringeren Dichte im Inneren vor. Umgebende Luft außerhalb des Behälters hat eine größere Dichte. Auftriebskraft- und Gewichtskraft spielen eine wichtige Rolle: erstere wird über das Drücken-, letztere über das Ziehen-Schema verstanden. Die Ursache für unterschiedliche Luftdichten wird dabei wie folgt dargestellt: Luftteilchen nehmen Wärmestrahlung auf und ihre Bewegungsenergie erhöht sich. Diese Bewegungsenergie kann nicht von Teilchen zu Teilchen übertragen werden aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit der Luft. Höhere Bewegungsenergie führt zu größerer Kraft bei Zusammenstößen mit langsameren Teilchen und damit zur Ausdehnung des Luftvolumens. Eine Ausdehnung des Luftvolumens bei gleichbleibender Teilchenanzahl führt zu geringerer Luftdichte. Geringe Luftdichte bedeutet geringe Gewichtskraft. Auf umgebende Luft wirkt eine stärkere Gewichtskraft als auf die erwärmte Luft, so dass diese verdrängt wird und aufsteigt. Da der Luftdruck der umgebenden Luft mit zunehmender Höhe geringer wird, dehnt sich der aufsteigende Luftkörper aus. Luftteilchen im Inneren und außerhalb des Behälters stoßen mit unterschiedlicher Geschwindigkeit aufeinander. Die ungleichen Kräfte beim Auftreffen bewirken, dass sich die Teilchen in die Herkunftsrichtung des Teilchens mit der geringeren Geschwindigkeit bewegen, bevor der elastische Rückstoß erfolgt.

Hierbei reduziert sich die Bewegungsenergie der schnelleren Teilchen, was sich als Temperaturabnahme bemerkbar macht. Diese ist geringer, wenn es beim Aufstieg zu Kondensation und damit zur Freisetzung von Kondensationswärme kommt. Wolken bilden sich, da Staubpartikel in der Atmosphäre Wasserteilchen anziehen. Es kommt zur Kondensation um diese Kondensationkerne. Die Wolke besteht also aus winzigen Wassertröpfchen, die sich aufgrund verschiedener Kräfte (Gewichtskraft, Auftriebskraft, gegenseitige Anziehung) bewegen. Die Tröpfchen fließen zusammen. Überwiegt die Gewichtskraft, fallen die Tröpfchen als Niederschlag zu Boden.

(4) Der Aufstieg der Luft im Bereich der ITCZ, Divergenz in der Höhe und Konvergenz am Boden bedingen sich wechselseitig, was über das Start-Weg-Ziel-, Drücken- und Ziehen-Schemata verstanden werden kann. Das Divergieren der aufgestiegenen Luft in der Höhe führt zur Verstärkung des bodennahen Tiefdruckgebietes im Bereich der ITCZ, da das Eigengewicht der auflastenden Luft geringer wird. Aus dynamischen Gründen bedingen die Antipassate in ihrer Intensität die Passate, was wiederum die Konvergenz im Bereich der ITCZ beeinflusst.

### 5.2.3.2 Antipassate

In der oberen Troposphäre divergiert die aufsteigende Luft schließlich aufgrund des geringeren Druckes horizontal umgebender Luft. Die Winde werden als Antipassate bezeichnet. Die Entstehung horizontaler Luftbewegungen kann über das Start-Weg-Ziel-, das Behälter- sowie Ziehen- und Drücken-Schemata verstanden werden. Die Luftmoleküle befinden sich in ständiger, unregelmäßiger Bewegung. Luftdruck wird verstanden als Folge der Stöße von Luftmolekülen gegen eine imaginäre Wand, die der Grenze des Behälters entspricht. Die Wissenschaftler verstehen horizontale Luftbewegung als Bewegung von Luftteilchen mit einem hohen Druck in Richtung der Luftteilchen mit dem niedrigen Druck. Imaginativ kann dies als Verschiebung der Wand zwischen zwei Behältern erfasst werden. Entsprechend wird die Gradientkraft auch über das Drücken-Schema verstanden. Die Coriolisablenkung hat folgende Ursache: Die Kugelgestalt der Erde und Erdrotation haben zur Folge, dass sich Breitenkreise vom Pol zum Äquator mit zunehmender Geschwindigkeit bewegen. Luft unterliegt der Erdanziehung und damit bewegt sie sich mit den Breitenkreisen. Trägheitsbedingt behält Luft bei meridionaler Bewegung die ursprüngliche Rotationsgeschwindigkeit für eine bestimmte Zeit bei. Die ablenkende Wirkung ist abhängig von der Lage zum Rotationszentrum – sie ist an den Polen am größten und am Äquator gleich null. Auch bei breitenkreisparallelen Luftbewegungen bewirkt die schnellere Umdrehungsgeschwindigkeit der äquatornahen Breitenkreise eine Ablenkung. Die Antipassate werden also nach Osten ablenkt, was über das Ziehen-Schema verstanden werden kann. Hierdurch entsteht der Subtropenjetstream.

### 5.2.3.3 Urpassate

Als Urpassate werden die absinkenden Luftmassen der Antipassate bezeichnet. Sie entstehen aus drei Gründen: 1. thermisch bedingtes Überwiegen der Gewichtskraft, 2. dynamisch bedingtes Ansaugen von unten aufgrund der Kugelgestalt der Erde, 3. Konvergenzen im Subtropenjetstream.

(1) Die sich horizontal in der Höhe polwärts bewegende Luft kühlt durch Wärmeausstrahlung ab. Die Wissenschaftler verstehen dies über das Behälter-, das Person- und das Start-Weg-Ziel-Schema. Nach der kinetischen Gastheorie befinden sich die Luftteilchen in ständiger, unregelmäßiger Bewegung. Durch Abgabe von Wärmestrahlung verringert sich die Bewegungsenergie der Luftteilchen und die Dichte des Luftbehälters nimmt zu. Ist die Dichte im Inneren des Behälters größer als im Außenbereich, sinkt der Luftkörper ab. Imaginativ kann dies auch über Ziehen- und Drücken-Schemata verstanden werden: Die Gewichtskraft zieht die Luft abwärts und ist stärker als die Auftriebskraft, die die Luft in der Höhe hält.

(2) Die Antipassate bewegen sich aufgrund der Kugelgestalt der Erde über eine polwärts kleiner werdende Fläche. Sie werden gestaucht und sinken in der Folge ab. Eine Rolle spielt hierbei die Gewichtskraft, die imaginativ über das Ziehen-Schema verstanden wird.

(3) Konvergenzen im Subtropenjetstream bewirken ebenfalls eine Stauchung und damit ein dynamisches bedingtes Absinken. Auch auf die absinkende Luft wirkt die Coriolisablenkung. In der Folge entsteht der subtropische Hochdruckgürtel mit einer Drehbewegung auf der Nordhalbkugel im Uhrzeigersinn und auf der Südhalbkugel gegen den Uhrzeigersinn. Im Zentrum dieser Hochdruckgebiete herrscht Windstille. Sie werden auch als Rossbreiten bezeichnet.

### 5.2.3.4 Passate

Die Urpassate erwärmen sich trockenadiabatisch und damit schneller als sie sich beim Aufstieg im Bereich der ITCZ abgekühlt haben. Die adiabatische Kompression kann als Umkehrung der adiabatischen Dilatation verstanden werden. Das Behälter- und das Start-Weg-Ziel-Schema spielen eine wichtige Rolle. Da aufsteigende Luft in den äußeren Tropen eine geringere Temperatur hat als die absinkende, kann diese nicht über eine bestimmte Höhe zwischen 1500m und 500m hinaus aufsteigen. Wasserdampf reichert sich aufgrund von Verdunstung an, Kondensation in Folge thermischer Konvektion findet jedoch nicht statt. Es bildet sich eine Inversionsschicht, die sogenannte Passatinversion aus, die in Richtung ITCZ zunehmend niedriger verläuft, instabil wird und sich schließlich auflöst. Als Passatwind wird die sich am Boden horizontal bewegende Luft bezeichnet. Die Ursache der Bewegung kann, wie beim Antipassat, einerseits über das Behälter-Schema als sich bewegende, imaginative Wand zwischen zwei Behältern als auch über das Drücken-Schema verstanden werden. Reibungskraft und Coriolisablenkung, die über das Ziehen-Schema zugänglich sind, beeinflussen ebenfalls den Passatwind. Dieser verläuft als Nordost- bzw. Südostwind

in Richtung ITCZ, da zwischen äußeren und inneren Tropen aufgrund der Passatzirkulation ein stetiger Luftdruckunterschied am Boden vorherrscht. Witterungsbedingt kann es zu einem Auslaufen der Passatwinde im Bereich der inneren Tropen, zu sog. Doldrums, kommen, da Luftdruckunterschiede hier geringer sein können.

#### **5.2.3.5 Trockene, wechselfeuchte und immerfeuchte Tropen**

Der Verlauf der ITCZ ändert sich mit zeitlichem Abstand mit den jahreszeitlichen Zenitständen der Sonne, wobei die Lage in Abhängigkeit der Kontinent-Meer-Verteilung zum Teil stark variiert. Im Bereich der ITCZ wehen häufig schwache Ostwinde, bedingt durch die Coriolis-Ablenkung außerhalb des Äquators. Die immerfeuchten Tropen, etwa zwischen 10°N und 10°S, sind durch einen ganzjährigen Einfluss der ITCZ gekennzeichnet und damit hohe Niederschläge im gesamten Jahr. Regenzeiten entstehen in den wechselfeuchten Tropen, etwa zwischen 10°N und 25°N bzw. 10°S und 25°S, durch Verschiebung der ITCZ. In den äußeren Bereichen erreicht diese die tropischen Regionen nur in den Sommermonaten der jeweiligen Halbkugeln mit ihren nördlichsten bzw. südlichsten Ausläufern. Die inneren wechselfeuchten Tropen werden hingegen zwei Mal von der ITCZ überquert, entsprechend gibt es zwei Regenzeiten. Trockenheit in den äußeren Tropen, etwa zwischen 25°N und 35°N bzw. 25°S und 35°S, als auch in den wechselfeuchten Tropen wird durch die Passatinversion bedingt. Diese verhindert ein Aufsteigen von Luft und damit Kondensation, Wolkenbildung und Niederschlag.

### **5.3 Zusammenfassung**

Historische wissenschaftliche Vorstellungen ähneln häufig Alltagsvorstellungen. Daher werden Aussagen in vier historischen Dokumenten untersucht, die zur Zeit Ihrer Publikation kontroverse Diskussionen auslösten und die gängige Lehrmeinung zur Passatzirkulation prägten. Insgesamt liegen fünf historische Vorstellungen zu den Ursachen der Passatwinde vor.

1. Francis Bacon liefert im Jahr 1622 zwei alternative Erklärungen: Passatwinde könnten durch die mitreißende Wirkung sich nach Westen drehender Himmelssphären entstehen. Diese Vorstellung basiert auf dem Ptolemäischen Weltbild. Aufgrund der Kugelgestalt der Erde erscheint die mitreißende Wirkung im Bereich der Tropen am stärksten.
2. Der Passatwind entsteht aufgrund einer Art Dominoeffekt. Luft reagiert bei Francis Bacon wie ein mechanisches Uhrwerk, das einen Impuls nach dem Tagesgang der Sonne von Ost nach West weitergibt. Die Ausdehnung der Luft wird durch eine Art Wärmestoff erklärt, der in diese eindringt. In beiden Fällen erscheint der Passatwind bei Francis Bacon als reiner Ostwind.
3. Galilei betrachtet Luft als leichtes Element, das nicht der Erdanziehungskraft unterliegt. Dieses Konzept entwickelt erst Newton knapp 50 Jahre später. In dem 1632 erschienenen Dokument erklärt

Galilei den Passatwind als trägheitsbedingtes Zurückbleiben der Atmosphäre gegenüber einer sich rotationsbedingt bewegenden Erdoberfläche. Er erkennt, dass der Effekt aufgrund der Kugelgestalt der Erde im Bereich der Tropen am größten sein muss und vermutet, dass sich dies als Passatwind äußert.

4. Edmond Halley beschreibt als erster im Jahr 1686 eine thermische Zirkulation. Initiiert würde diese durch den Tagesgang der Sonne. Im Bereich der Tropen gäbe es eine sich von Osten nach Westen bewegende Zone intensivster Sonneneinstrahlung, die eine Luftausdehnung, einen Aufstieg, Höhenwinde polwärts, ein thermisch bedingtes Absinken und schließlich die Passatwinde zur Folge habe. Auch Halley postuliert eine Art Wärmestoff, der die Luftausdehnung erklärt. Im Gegensatz zu Francis Bacons erklärt seine Theorie auch die Nord- bzw. Südkomponente der Passatwinde.

5. Im Jahr 1735 erklärt George Hadley die Nordwest- bzw. Südwest-Ausrichtung der Passatwinde aufgrund der unterschiedlichen Rotationsgeschwindigkeiten der verschiedenen Breitenkreise. Dieser Ansatz wird später von Gustave Gaspard Coriolis mathematisch bestätigt.

Die Analyse aktueller wissenschaftlicher Vorstellungen zur Passatzirkulation erfolgt unter Berücksichtigung dreier Perspektiven: der Meteorologie, der Klimatologie und der Klimageographie. Aktuelle wissenschaftliche Vorstellungen betrachten die Passatzirkulation als komplexes, nicht lineares System. Die Aufwinde im Bereich der ITCZ werden auf 4 Ursachen zurückgeführt, die zum Teil rückgekoppelt sind und in Wechselwirkung mit anderen Systemelementen stehen: 1. eine sehr starke Erwärmung bodennaher Luft aus himmelsmechanischen Gründen, 2. ein hoher Wasserdampfanteil und geringes spezifisches Gewicht von Wasserdampf, 3. feuchtadiabatische Prozesse und 4. eine Wechselwirkung von Konvergenz, Konvektion und Divergenz. Die Antipassate als Höhenwinde werden durch Luftdruckunterschiede in der Horizontalen initiiert, die letztlich thermisch durch die im Bereich der ITCZ aufsteigenden Luftmassen bedingt sind. Die Coriolisablenkung bewirkt, dass diese Winde eine Nordost- bzw. Südostausrichtung haben und zur Ausbildung eines Subtropenjetstream im Bereich von etwa 30°N bzw. 30°S führen. Die absinkenden Luftmassen werden als Urpassate bezeichnet. Für ihre Entstehung gibt es drei Ursachen: 1. durch Abkühlung überwiegt die Gewichtskraft der Auftriebskraft, 2. die Luft in der Höhe wird von unten angesaugt, da die Fläche aufgrund der Kugelgestalt der Erde größer wird, 3. Konvergenzen im Subtropenjetstream. Da sich die Urpassate trockenadiabatisch erwärmen, kommt es zur Ausbildung der Passatinversion, die sich zu den inneren Tropen hin allmählich auflöst, jedoch im Bereich der äußeren Tropen den Aufstieg von Luft, Kondensation und damit Niederschlagsbildung verhindert. Eine Folge der Passatinversion ist die Anreicherung der Passatwinde mit Wasserdampf, was wiederum thermische Konvektion im Bereich der ITCZ verstärkt. Die Nordwest- bzw. Südwest-Ausrichtung der Passatwinde wird durch Luftdruckunterschiede bzw. die Wirkung der Coriolisablenkung bedingt.

Die Wissenschaftler begreifen diese komplexen Vorgänge mit Hilfe bestimmter verkörperter Schemata. Himmelsmechanik und elektromagnetische Strahlung werden über das Teil-Ganzes-, das Start-Weg-Ziel- und das Person-Schema verstanden: Erde und Sonne sind Teile eines Sonnensystems. Erde und elektromagnetische Strahlung befinden sich auf einem Weg. Elektromagnetische Strahlung kann aufgenommen und ausgeschieden werden. Sie verändert den Zustand des aufnehmenden Körpers. Zugänglich werden diese abstrakten Prozesse zudem durch Metaphern, anhand derer metaphorische Konzepte rekonstruiert werden können. Sonne und Erde erscheinen als Personen mit bestimmten Absichten und Aufgaben. Strahlung und Energie als fluide Körper, was einerseits Bewegungsvorgänge nachvollziehbar macht, andererseits Vorstellungen von einer Masse und einem Gewicht elektromagnetischer Strahlung evoziert. Das metaphorische Konzept 'Strahlung/Energie ist Nahrung' könnte ebenfalls diese aus wissenschaftlicher Sicht nicht angemessene Vorstellung hervorrufen. Strahlung erscheint zudem als Transportmittel, Energie und Wärme als Ressource. Abstrakte Zielbereiche werden über konkrete Quellbereiche veranschaulicht und zugänglich gemacht. Die Phänomene Luftdichte, -temperatur und -druck werden mit Hilfe des Behälter-, des Teil-Ganzes-, des Person- und des Start-Weg-Ziel-Schemas verstanden. Die Wissenschaftler machen das Konzept Luftdichte nachvollziehbar, indem sie Behälter mit unterschiedlichem Inneren imaginieren. Eine veränderte Lufttemperatur ist das Resultat einer Aufnahme elektromagnetischer Strahlung. Die kinetische Gastheorie betrachtet Luftdruck und -temperatur als Resultat einer Bewegung der Teilchen. Auf der sprachlichen Ebene äußern sich diese Vorstellungen in Form des metaphorischen Konzeptes 'Luft ist ein Körper'. Die Metaphern suggerieren, dass es sich hierbei um eine Art Festkörper handelt, was problematisch ist, da sich bewegende Luft grundsätzlich andere Eigenschaften aufweist. Luft erscheint auch als Person und könnte damit teleologische Vorstellungen evozieren. Vorgänge der Verdunstung, Kondensation und Niederschlagsbildung werden vor allem über das Behälter-Schema, das Teil-Ganzes-Schema sowie Ziehen- und Drücken-Schema verstanden. Verdunstet Wasser, verlässt es die Flüssigkeit im Inneren des Behälters. Kondensiert Wasser, tritt es vom Äußeren ins Innere über. Auf Tröpfchen in einer Wolke wirken die ziehende Gewichtskraft und die drückende Auftriebskraft. Metaphorisch erscheinen Moleküle ebenso wie wasserdampfaufnehmende Luft als Personen. Problematisch ist, dass dies teleologische Vorstellungen evozieren könnte. Wolken werden durch die Quellbereiche 'wachsender organischer Körper' und 'Festkörper' veranschaulicht. Beide metaphorischen Konzepte können aus wissenschaftlicher Sicht nicht angemessene Vorstellungen erzeugen. Der Aufbau der Atmosphäre als auch vertikale Luftbewegungen werden vor allem über das Behälter- und das Person-Schema verstanden. Aufsteigende Luftkörper dehnen sich aufgrund des geringer werdenden Druckes der umgebenden Luft aus. Auf aufsteigende Luft wirkt die ziehende Gewichtskraft und die drückende Auftriebskraft. Die Atmosphäre wird metaphorisch als aus Stockwerken oder Schichten bestehend

dargestellt. Diese Schichten sind jedoch nicht als feste Grenzen zu verstehen. Horizontale Luftbewegungen werden ebenfalls vor allem über das Start-Weg-Ziel-, das Behälter- und das Ziehen- und Drücken-Schema verstanden. Luftteilchen bewegen sich aufgrund größerer Bewegungsenergie in Richtung der Teilchen mit der geringeren Eigenbewegung. Auf die sich bewegende Luft wirken die ziehende Coriolisablenkung und Reibungskraft sowie die drückende Gradientkraft. Wind wird metaphorisch als fließendes Wasser verstanden. Die eigentliche Ursache der Bewegung lässt sich hierüber jedoch nicht erfassen. Ein tatsächliches Gefälle liegt nicht vor. Ein weiteres metaphorisches Konzept betrachtet den Wind als Person. Hierdurch könnten teleologische Vorstellungen evoziert werden. Die verschiedenen metaphorischen Konzepte schaffen bei allen Gefahren jedoch auch Zugänge zu abstrakten Bereichen, die sonst nicht verstanden werden könnten. Das Begreifen der Zielbereiche basiert jedoch auf einer individuellen Interpretation des Lernalters und hängt stark von seinem Vorwissen ab.

Einige historische Vorstellungen tauchen interessanterweise als metaphorische Konzepte in den aktuellen Quellentexten auf. Der von Halley und Hadley postulierte Wärmestoff findet sich in den metaphorischen Konzepten 'Wärme ist Ressource' und 'Wärme ist fluider Körper' wieder. Die Vorstellung vom Göttlichen als Ursprung aller Prozesse und treibender Kraft erscheint in den zahlreichen metaphorischen Konzepten mit Personifikationen: 'Sonne ist Person', 'Moleküle sind Personen', 'Luft ist Person', 'Wolken sind wachsende, organische Körper' sowie 'Wind ist Person'. Einerseits können mithilfe dieser metaphorischen Konzepte bestimmte Aspekte betont und hervorgehoben werden, beispielsweise der Wärmeleitung bzw. des -transports oder der Verfügbarkeit oder Notwendigkeit von Wärme. Andererseits entstehen Widersprüche zu anderen Vorstellungen: So wirken Naturkräfte permanent und nicht nur phasenweise aufgrund einer Motivation. Wärme unterliegt eben nicht der Erdanziehungskraft.

In den historischen Texten finden sich einige Vorstellungen, die aufgrund lebensweltlicher Erfahrungen plausibel erscheinen: Das Ptolemäische Weltbild findet dadurch scheinbar Bestätigung, dass schwere Objekte zu Boden fallen und vermeintlich leichte Objekte wie Rauch oder Nebel aufsteigen. Die Vorstellung, dass Luft nicht der Schwerkraft unterliegt, wird dadurch bestätigt, dass sie sich erfahrbar überall befindet, beispielsweise im obersten Stockwerk eines Hauses genauso wie unten, auf einem Berg ebenso wie im Tal. Im Gegensatz zu fallenden Gegenständen, die man im Alltag häufig beobachten kann, entzieht sich dieser Vorgang bei Luft der Wahrnehmung. Auch die Vorstellung, dass Wärme ein fluider Stoff sei, erscheint plausibel. Hierdurch kann die Volumenausdehnung der erwärmten Luft erklärt werden. Lebensweltlich ist dieses Phänomen beispielsweise beim Vermischen von Flüssigkeiten erfahrbar. Hier vergrößert sich das Volumen aufgrund eines hinzugefügten fluiden Stoffes. Dagegen ist eine Zustandsänderung auf molekularer Ebene im Alltag nicht direkt zu beobachten. Auch die historische Vorstellung, dass sich aufsteigende

Luftmassen aufgrund der zunehmenden Entfernung zur Heizfläche, der Erdoberfläche, abkühlen würden, scheint sich im Alltag zu bestätigen. Erfahrungen mit Wärmequellen, beispielsweise einem Kamin, einem Herd oder einem Lagerfeuer, machen diese Erklärung nachvollziehbar. Dass beim Abkühlen aufsteigender Luftmassen jedoch auch Prozesse der adiabatischen Dilatation eine entscheidende Rolle spielen, kann aus Alltagsbeobachtungen nicht geschlossen werden. Es fällt auf, dass die historischen Texte jeweils eine Erklärung für ein Phänomen geben. Ursache des Ostwindes ist beispielsweise die Erdrotation, Ursache eines Nordost- bzw. Südostwindes ist einerseits die thermische Zirkulation, andererseits der Tagesgang der Sonne. Im Alltag lassen sich die meisten Phänomene ebenfalls auf eine Ursache zurückführen. Komplexe Wechselwirkungen und Multikausalität, wie sie in den aktuellen Vorstellungen zur Passatzirkulation zu finden sind, spielen im Alltag meist keine Rolle.

## 6 Untersuchung bisheriger empirischer Arbeiten zu Alltagsvorstellungen

Im Rahmen der Untersuchungsaufgabe 2 werden Vorstellungen von Lernern aus insgesamt 23 internationalen empirischen Arbeiten (siehe Tabellen 1 bis 3) zusammengefasst dargestellt und vor dem Hintergrund der Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens reanalysiert. Empirische Studien zu Vorstellungen zur Passatzirkulation liegen derzeit nicht vor. Ebenso wurden geschlechtsspezifische Besonderheiten bei Alltagsvorstellungen bisher kaum untersucht. Die Auswahl der Arbeiten begründet sich durch die im Rahmen der fachlichen Klärung (Untersuchungsaufgabe 1) als relevant herausgearbeiteten thematischen Bereiche, die einen Bezug zur Passatzirkulation haben. Während zu einzelnen Gebieten umfassende Forschung vorliegt (elektromagnetische Strahlung, Luft, Wasser in der Atmosphäre) und hier eine Auswahl nach dem Prinzip der Aktualität getroffen werden musste, sind andere Bereiche defizitär erforscht (Himmelsmechanik, adiabatische Prozesse, Windentstehung, Modellbildung und systemisches Denken).

Bereich	Studie	Gegenstand/ Ziel der Erhebung	Stichprobe	Erhebungsverfahren
Wärme und elektromagnetische Strahlung	HARRISON ET AL. 1999	Vorstellungen über Temperatur und Wärme und ihre Entwicklung; Vorbereitung einer Langzeitstudie	Schüler der Jahrgangsstufe 11 n=5 (Australien)	Fragenbogen mit offenen Items; Gruppendiskussion; Zeichnungen
	BASER ET AL. 2006	Vorstellungen über Temperatur und Wärme und ihre Entwicklung	Grundschul-Lehrramtsstudenten im 2. Studienjahr n= 82 (Türkei)	Tests mit geschlossenen Items
	PAIK ET AL. 2007	Vorstellungen über Wärme und Temperatur	Schüler, 4-11 Jahre n=154 (Südkorea)	leitfadengestützte Interviews
	REINFRIED ET AL. 2010	Vorstellungen zum Treibhauseffekt	Schüler der Sekundarstufe I n=289 (Schweiz)	Unterrichtsdokumentation; Fragebogen und Tests mit offenen Items (Bild-Text-Einheiten)
	SCHULER 2010	Vorstellungen zum Klimawandel	Schüler der Jahrgangsstufe 12 n=25 (Deutschland)	offene Leitfadenterviews
	NIEBERT 2010	Vorstellungen zum Klimawandel	Schüler der Jahrgangsstufen 11 und 12 n=35 (Deutschland)	Interviews und Interventionsstudie

**Tabelle 1:** Überblick über die untersuchten empirischen Arbeiten (Teil 1).

## Untersuchung bisheriger empirischer Arbeiten zu Alltagsvorstellungen

Bereich	Studie	Gegenstand/ Ziel der Erhebung	Stichprobe	Erhebungsverfahren
Himmelsmechanik	TSAI & CHANG 2005	Vorstellungen über die Ursache der Jahreszeiten	Schüler der Jahrgangsstufe 9 n=82 (Taiwan)	Interviews
	HSU ET AL. 2008	Vorstellungen über die Ursache der Jahreszeiten und Sonnenscheindauer	Schüler der Jahrgangsstufe 11 n=76 (Taiwan)	Zeichnungen; Fragebogen mit geschlossenen Items
Luft	ROLLNICK & RUTHERFORD 1993	Vorstellungen zum Luftdruck und ihre Entwicklung	Grundschüler n=141 (Zwasiland)	Tests mit offenen Items; Unterrichtsdokumentation
	TYTLER 1998	Vorstellungen zum Luftdruck und ihre Entwicklung	Schüler, 6-12 Jahre n=47 (Australien)	Fragebogen mit offenen Items; Interviews
	BESSON 2004	Vorstellungen zu Fluiden	Schüler der Sekundarstufen und Lehramtsstudenten n=944 (Belgien, Frankreich, Italien)	Interviews; Fragebögen mit geschlossenen Items
	TREAGUST ET AL. 2010	Vorstellungen hinsichtlich der kinetischen Gastheorie; Vorbereitung einer umfassenderen Studie	Schüler, 14-16 Jahre n=148 (Brunei, Australien, Singapur, Hong Kong)	Tests mit geschlossenen und offenen Items
	ARON ET AL 1994	Vorstellungen zum Wetter	Highschool- und Collegestudenten n=708 (USA)	Tests mit geschlossenen Items
Wasser in der Atmosphäre	GOPAL ET AL 2004	Vorstellungen zu Verdunstung, Kondensation und Dampfdruck	Studenten der Ingenieurwissenschaften im zweiten Jahr n=15 (Südafrika)	Leitfadengestützte Interviews
	ASSARF & ORION 2005a	Vorstellungen zum Wasserkreislauf	Schüler der Jahrgangsstufe 7 bis 9 n=1000 (Israel)	Fragebogen mit geschlossenen und offenen Items; Interviews; Zeichnungen
	CHANG 1999	Vorstellungen zu, Verdunstung, Kondensation und Sieden	Lehramtsstudenten n=364 (Taiwan)	Tests mit offenen Items; Interviews
Adiabatische Prozesse	LOVERUDE ET AL. 2002	Vorstellungen zu adiabatischen Prozessen	Universitätsstudenten der Physik im ersten und zweiten Jahr n=36 (USA)	Tests mit offenen Items; Interviews

**Tabelle 2:** Überblick über die untersuchten empirischen Arbeiten (Teil 2).

Bereich	Studie	Gegenstand/ Ziel der Erhebung	Stichprobe	Erhebungsverfahren
Wind-entstehung	BAYRAKTAR 2009	Vorstellungen zu Kraft und Bewegung	Lehramtsstudenten im ersten bis vierten Jahr n=79 (Türkei)	Tests mit geschlossenen Items
	ROTH ET AL. 2001	Vorstellungen zur Ursache und Wirkungsweise von Flieh- und Schwerkraft	Schüler der Jahrgangsstufe 12 n=24 (Australien)	Tests mit offenen Items; Interviews; Unterrichtsdokumentation
	KARIOTOGLU ET AL 2009	Vorstellungen zur Wirkung von Kräften	Lehramtsstudenten im ersten Jahr n=264 (Griechenland)	Tests mit geschlossenen Items
Modellbildung/ systemisches Denken	OSSIMITZ 2000	Systemische Denk- und Darstellungskompetenzen	Schüler der Jahrgangsstufen 10-13 n=126 (Deutschland)	Tests mit offenen und geschlossenen Items, Zeichnungen
	SOMMER 2005	Fähigkeiten systemischen Denkens und zur Modellbildung	Grundschüler der 3. und 4. Jahrgangsstufe n=363 (Deutschland)	Tests mit offenen und geschlossenen Items, Zeichnungen
	ASLARAF & ORION 2005b	Vorstellungen zu Geosystemen	Schüler der Jahrgangsstufe 8 n=50 (Israel)	Tests mit offenen und geschlossenen Items, Interviews und Zeichnungen

**Tabelle 3:** Überblick über die untersuchten empirischen Arbeiten (Teil 3).

## 6.1 Vorstellungen zu Wärme und elektromagnetischer Strahlung

Zwei internationale Studien erheben unabhängig voneinander die Vorstellung, dass Wärme etwas Stoffliches ist, bei Grundschullehramtsstudenten in der Türkei (BASER ET AL. 2006, 97) als auch bei Schülern zwischen 4 und 11 Jahren in Südkorea (PAIK ET AL. 2007, 295). Wärme scheint hier etwas Gasförmiges zu sein, eine Substanz wie Dampf. Die Vorstellung eines Wärmestoffes findet sich auch in historischen, wissenschaftlichen Arbeiten (siehe Kapitel 5, Abschnitt 5.1). Nach der Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens bilden sinnlich-körperliche Erfahrungen seit der frühen Kindheit die Grundlage von Vorstellungen. Etwas Nicht-Stoffliches kann lebensweltlich kaum erfahren werden. Entsprechend schwer fällt auch ein imaginatives Verstehen von Nicht-Stoffen. Unter Berücksichtigung des Kategorisierungs- und Rahmentheorieansatzes könnte auch von einer aus wissenschaftlicher Sicht (siehe Kapitel 5, Abschnitte 5.2.2.1 und 5.2.2.2) nicht angemessenen ontologischen Kategorisierung ausgegangen werden.

Bei Schülern der Jahrgangsstufe 11 in Australien findet sich die Vorstellung, dass bei Temperaturänderungen vor allem der Prozess der Wärmeleitung vorherrschend ist (HARRISON ET AL. 1999, 81). Im Alltag sind solche Fälle von Wärmeleitung in Festkörpern häufig zu beobachten, beispielsweise nimmt ein Löffel in einer heißen Suppe Wärme auf und leitet sie zum Griff. Dass Luft als Gasgemisch Wärme in nur sehr geringem Maße leitet, ist im Alltag hingegen nicht zu beobachten. Die Luft erwärmt sich hier durch Absorption elektromagnetischer Strahlung, im Beispiel von der

Wärmestrahlung, die von Suppe und Löffel ausgeht. Zwei Studien kommen zum Ergebnis, dass es aus lebensweltlicher Perspektive grundsätzlich schwierig ist, zwischen Wärme und Temperatur zu unterscheiden (BASER ET AL. 2006, 97 und HARRISON ET AL. 1999, 81), was eine Unterscheidung von Wärmeleitung und Wärmestrahlung erschwert.

Untersuchungen bei Schülern der Sekundarstufe I und II aus Deutschland und der Schweiz zum Thema Treibhauseffekt zeigen, dass elektromagnetische Strahlung mit Wärmestrahlung gleichgesetzt wird, d.h. eine Differenzierung in solare und terrestrische Strahlung findet nicht statt, ein Umwandlungs- oder Absorptionskonzept wird nicht angewendet (REINFRIED ET AL. 2010, 139; SCHULER 2010, 164f.; NIEBERT 2010, 107). Die Vorstellung von warmer Sonnenstrahlung findet im Alltag Bestätigung, da Umwandlungs- und Absorptionsprozesse nicht direkt zu beobachten sind.

## **6.2 Vorstellungen zur Himmelsmechanik**

Vorstellungen von der jahreszeitlichen Veränderung des Einstrahlungswinkels der Sonne in den verschiedenen geographischen Breiten sind grundlegend für ein Verständnis der Passatzirkulation sowie des jahreszeitlichen Verlaufs der ITCZ (siehe Kapitel 5, Abschnitt 5.2.2.1). Zwei Studien aus Taiwan zeigen, dass Schüler der Jahrgangsstufe 9 und 11 die Entstehung der Jahreszeiten auf einen sich verändernden Abstand von Erde und Sonne zurückführen: Der Abstand Erde-Sonne sei im Sommer bzw. aufgrund der Kugelgestalt der Erde und der Neigung der Erdachse geringer und damit die Sonnenstrahlung intensiver ( TSAI & CHANG 2005, 1099; HSU ET AL. 2008, 129). Grundsätzlich kann im Alltag die Erfahrung gemacht werden, dass die fühlbare Wärmestrahlung mit zunehmendem Abstand zur Wärmequelle, beispielsweise einem Kamin oder Lagerfeuer, geringer wird. Die erste erhobene Vorstellung steht jedoch im Widerspruch zu der Vorstellung, dass Sommer und Winter jeweils abwechselnd auf Nord- und Südhalbkugel stattfinden. Die zweite Vorstellung, dass der Abstand Erde-Sonne durch die Kugelgestalt bzw. die Neigung der Erdachse verändert wird, löst diesen Widerspruch auf. Aus wissenschaftlicher Sicht ist sie dennoch nicht angemessen (siehe Kapitel 5, Abschnitt 5.2.2.1). Die Untersuchung von Hsu et al. 2008 erhebt weitere Vorstellungen zur Entstehung der Jahreszeiten, die in Analogien lebensweltlich erfahrbar und damit nachvollziehbar sind: Wolken oder das planetarische Windsystem würden die Jahreszeiten verursachen; eine langsamere Rotationsgeschwindigkeit im Sommer führe zu größerer Erhitzung; die innerhalb eines Jahres um ihre Achse rotierende Sonne besitze eine strahlungsintensive- und eine weniger strahlungsintensive Seite (HSU ET AL. 2008, 129f.; vgl. auch DOVE 1998, 67).

### 6.3 Vorstellungen zu Luft

Eine Studie aus dem Jahr 2010 untersucht Vorstellungen zur kinetischen Gastheorie bei 148 Schülern zwischen 14 und 16 Jahren aus Brunei, Australien, Singapur und Honkong: Jugendliche stellen sich Gase als Kontinuum vor, d.h. zwischen ihren Bestandteilen gebe es keine Zwischenräume. Luft sei gewichtslos und grundsätzlich leichter als Flüssigkeiten oder Festkörper. Gase seien zudem weniger leicht zu komprimieren als Flüssigkeiten (TREAGUST ET AL. 2010, 143 und 159). Dass Flüssigkeiten und Gase auf molekularer Ebene aus Teilchen bestehen, die sich mit Abstand zueinander in ständiger unregelmäßiger Bewegung befinden, lässt sich im Alltag nicht erfahren, da der Mikrokosmos nicht direkt wahrnehmbar ist. Dass Luft ein Gas ist und eine Masse besitzt, entzieht sich ebenfalls der direkten Erfahrung: Sie ist unsichtbar und allgegenwärtig. Luft bewegt sich und steigt auf, was man zum Beispiel im Alltag durch Thermik nutzende Vögel oder Segelflieger erkennen könnte. Aufgrund dieses Umstands erscheint auch die lebensweltliche Vorstellung, dass Flüssigkeiten als etwas Sichtbares und Greifbares leichter komprimiert werden können als Gase, plausibel.

Vorstellungen zum Luftdruck sind Gegenstand mehrerer Untersuchungen, wobei Vorstellungen zur Ursache dieses Phänomens leider nicht erhoben werden. Die Wirkung von Luftdruck wird bei Rollnick & Rutherford 1993, Tytler 1998 und Besson 2004 mit Grundschulern in Swasiland, Sekundarstufenschülern in Australien und Sekundarstufenschülern sowie Lehramtsstudenten in Belgien, Italien und Frankreich thematisiert. Die erhobenen Vorstellungen ähneln sich: Luft übe keinen Druck aus (BESSON 2004, 1685) oder Luftdruck entstehe nur unter bestimmten Bedingungen (TYTLER 1998, 946). Der Luftdruck sei vom Volumen abhängig: In kleinen Räumen sei der Luftdruck größer als in größeren (BESSON 2004, 1691f.). Luft könne Flüssigkeiten aufgrund ihres Druckes verdrängen (ROLLNICK & RUTHERFORD 1993, 380 und TYTLER 1998, 940). Luftdruck wirke grundsätzlich nur nach unten (BESSON 2004, 1691f.). Zur Veränderung des Luftdrucks mit der Höhe wurden sich widersprechende Vorstellungen erhoben: In großen Höhen herrsche niedriger Luftdruck, der durch die dortigen geringen Temperaturen verursacht würde (ROLLNICK & RUTHERFORD 1993, 381). Eine Studie mit insgesamt 708 Highschool- und Collegestudenten aus dem Jahr 1994 erfasst die Vorstellung, dass der Luftdruck mit der Höhe zunehme (ARON 1994, 31).

Das Phänomen Luftdruck wird im Alltag nicht bewusst wahrgenommen. Allenfalls Luftdruckschwankungen verursachen bei wetterfühligen Menschen Beschwerden. Kopfschmerzen oder Schwindel kann man auch in größeren Höhen, beispielsweise bei Bergtouren erleben, ohne sich der Ursache, eines geringeren Luftdrucks, bewusst zu sein. Die vom Luftdruck ausgehende Kraft pro Fläche wird lebensweltlich als groß eingeschätzt: Erfahrungen mit unter Druck stehenden Gasflaschen oder Flüssigkeiten (Getränke mit Kohlensäure) machen diese Vorstellung plausibel. Festkörper üben aufgrund ihrer Gewichtskraft einen Druck nach unten aus. Im Alltag wird diese Erfahrung beim Heben von Gegenständen gemacht. In Analogie hierzu erscheint die Vorstellung, dass

Luft ebenfalls ausschließlich einen Druck nach unten auswirke, nachvollziehbar. Die Vorstellung, dass niedrige Temperaturen niedrigen Luftdruck verursachen, kann hingegen nicht auf Alltagserfahrungen begründet werden. Leider gehen Rollnick & Rutherford nicht weiter auf die Ursache dieser Vorstellung ein. Aron et al. vermuten, dass die Vorstellung eines zunehmenden Luftdrucks mit der Höhe sich auf Erfahrungen mit Passagierflügen gründet: So sei in der Kabine ein Druckausgleich aufgrund eines imaginären höheren Außendruckes nötig (ARON ET AL. 1994, 31). Genauso gut könnte man jedoch auch die gegenteilige Annahme erfahrungsbasiert begründen: die Abnahme des Luftdrucks mit der Höhe.

#### **6.4 Vorstellungen zu Wasser in der Atmosphäre**

In zwei Studien aus den Jahren 1999 und 2004 werden bei 15 Studenten der Ingenieurwissenschaften in Südafrika und 364 Lehramtsstudenten in Taiwan Vorstellungen über Wasserdampf erhoben: Dieser sei eine chemische Verbindung von Wasser und Luft, die bei der Verdunstung entstehe (GOPAL ET AL. 2004, 1598 und CHANG 1999, 516). Voraussetzung für die Verdunstung sei ein Temperaturgradient zwischen der Flüssigkeit und der umgebenden Luft (GOPAL ET AL. 2004, 1604). Wasserdampf besitze kein Gewicht, könne jedoch beobachtet werden, beispielsweise als weißer Rauch, der von einem Kochtopf aufsteigt (CHANG 1999, 511ff.). Zwei weitere Studien belegen die erhobene Alltagsvorstellung vom sichtbaren Wasserdampf: Assarf & Orion halten bei einer Befragung von insgesamt 1000 Schülern in Israel der Klasse 7 bis 9 eine Vorstellung fest, auf die auch eine frühere Studie stößt: Wolken bestünden aus Wasserdampf (ASSARF & ORION 2005a, 371 und ARON ET AL. 1994, 32). Bei der Kondensation in der Atmosphäre würde sich die Luft-Wasser-Verbindung wieder auflösen (GOPAL ET AL. 2004, 1598). Ursächlich für die Tröpfchenbildung sei der Luftdruck (CHANG 1999, 521). Aron et al. halten die lebensweltliche Vorstellung fest, dass Luft mit einem hohen Wasserdampfanteil schwerer sei als trockene (ARON ET AL. 1994, 31). Vorstellungen zur Ursache von Regen wurden leider nicht erhoben. Lebensweltlich würde die Schlussfolgerung naheliegen, dass die Tröpfchen unmittelbar nach ihrer Entstehung als Regen zu Boden fallen. Hierfür spricht auch die von Dove beschriebene Vorstellung vom Regen, der aus zu schwer gewordenen Wolken fällt (DOVE 1998, 66). Wasserdampf bzw. winzige Tröpfchen, die für Wasserdampf gehalten werden, und flüssiges Wasser besitzen grundlegend unterschiedliche Eigenschaften, so dass die Vorstellung einer chemischen Verbindung von Luft und Wasser durchaus plausibel erscheint. Nach aktuellen wissenschaftlichen Vorstellungen ist nicht der Temperaturgradient zwischen Flüssigkeit und Luft ursächlich für die Verdunstung, sondern der Dampfdruck, der aus dem Wasserdampfgehalt der Luft resultiert, sodass selbst bei hohen Temperaturen oder großem Temperaturgradienten bei Sättigung der Luft mit Wasserdampf keine Verdunstung erfolgen würde (siehe Kapitel 5, Abschnitt 5.2.2.3). Die Alltagsvorstellung lässt sich evt. auf Erfahrungen mit hoher relativer Luftfeuchtigkeit bei

hohen Temperaturen gründen, wie sie für die Tropen typisch sind. Dass Wolken aus Wasserdampf und nicht aus kondensierten Wassertröpfchen bestehen, findet im Alltag Bestätigung, da flüssiges Wasser aufgrund der Schwerkraft zu Boden bzw. entlang eines Gefälles strömt – Wolken folglich zu Boden fließen müssten. Kondensation aufgrund des Luftdrucks könnte in Analogiebildung zu Prozessen der Verflüssigung von Stoffen unter Druck ebenfalls nachvollziehbar sein, obgleich Beispiele aus dem Alltag fehlen. Im Widerspruch zu der Vorstellung, Wasserdampf besitze kein Gewicht, steht die Vorstellung, dass feuchte Luft schwerer sei als trockene. Lebensweltlich ist die Gewichtslosigkeit von Wasserdampf ebenso nachvollziehbar wie die von Luft, da Nebel oder Wolken beispielsweise aufsteigen bzw. nicht herunterfallen. Da beispielsweise nasse Kleidung schwerer ist als trockene, klingt auch letztere Vorstellung plausibel. Dass kondensierte Wassertröpfchen untermittelbar nach ihrer Entstehung als Regen zu Boden fallen, entspricht der Alltagserfahrung mit Flüssigkeiten. Eine Wechselwirkung von Aufwinden, Reibung und Gewichtskraft ist hingegen im Alltag nicht zu beobachten.

### **6.5 Vorstellungen zu adiabatischen Prozessen**

Adiabatische Prozesse spielen nach aktuellen wissenschaftlichen Vorstellungen eine entscheidende Rolle beim Passatkreislauf (siehe Kapitel 5, Abschnitt 5.2.2.4). Leider ist die Forschungslage in diesem Bereich defizitär. So konnte nur eine Studie ermittelt werden, die sich mit Vorstellungen zu adiabatischen Prozessen beschäftigt. Ursächlich hierfür ist sicherlich, dass adiabatische Prozesse lebensweltlich nicht erfahrbar sind. Vorgänge im Mikrokosmos lassen sich nicht direkt beobachten. Loverude et al. gehen im Jahr 2002 daher vom Modell der kinetischen Gastheorie aus und befragen 36 Studenten der Physik im ersten und zweiten Studienjahr in den USA nach Wirkungen einer Änderung eines Gasvolumens im Mikrokosmos. Eine erhobene Vorstellung sieht als Folge einer Verkleinerung des Volumens ein häufigeres Gegeneinanderstoßen von Molekülen, wodurch Hitze erzeugt würde, sodass die Temperatur des Gases steige bzw. bei Vergrößerung des Volumens falle (LOVERUDE ET AL. 2002, 141). Im Widerspruch hierzu steht die Vorstellung, dass eine Volumenänderung keine Auswirkungen auf die Temperatur habe (LOVERUDE ET AL. 2002, 142). Dass durch Reibung Wärme erzeugt wird, ist eine Alltagserfahrung, die auf den Mikrokosmos und die Kollision von Molekülen projiziert wird. Auch wenn diese Vorstellung nicht mit aktuellen wissenschaftlichen Vorstellungen übereinstimmt - hier ist die Geschwindigkeit der Moleküle äquivalent für die Wärme und damit die Temperatur (siehe Kapitel 5, Abschnitt 5.2.2.2)-, beschreibt und erklärt sie Temperaturänderungen, die mit adiabatischer Kompression oder Dilatation einhergehen könnten. Die hierzu im Widerspruch stehende Vorstellung lässt sich auf die Alltagserfahrung zurückführen, dass Volumenänderungen, beispielsweise bei Luftballons oder Tüten, keine signifikante Temperaturänderung hervorrufen.

Offen bleiben wichtige Fragen im Hinblick auf den Passatkreislauf: Inwiefern finden Ausdehnung oder Kompression beim Aufsteigen und Absinken von Luftmassen in den Vorstellungen der Lerner Berücksichtigung. Differenzieren Lerner hierbei zwischen feuchtadiabatischen und trockenadiabatischen Prozessen?

## 6.6 Vorstellungen zur Windentstehung

Derzeit liegen keine aktuellen Forschungen über Alltagsvorstellungen zur Windentstehung vor. Ältere Arbeiten thematisieren dieses Phänomen am Rande und kommen zum Ergebnis, dass es 8- bis 16-Jährigen generell schwer fällt hierfür eine Erklärung zu finden, da ihre Vorstellungen recht diffus sind. So würden beispielsweise Wolken oder kalte Luft Winde hervorrufen (DOVE 1998, 67).

Da für die Windentstehung nach aktuellen wissenschaftlichen Vorstellungen u.a. Gradient-, Auftriebs-, Gewicht- und Corioliskräfte ursächlich sind (siehe Kapitel 5, Abschnitt 5.2.2.5), werden Studien zur Vorstellung von der Wirkungsweise von Kräften herangezogen. Zwei Erhebungen aus den Jahren 2009 kommen zu interessanten Ergebnissen: Eine Befragung von 79 Lehramtsstudenten im ersten bis vierten Jahr in der Türkei ergibt, dass einige Probanden glauben, auf unbewegte Objekte wirkten keine Kräfte (vgl. BAYRAKTAR 2009, 274). Kariotoglou et al. erheben ebenfalls diese Vorstellung bei einer Studie mit 264 Lehramtsstudenten im ersten Jahr in Griechenland (KARIOTOGLOU et al. 2009, 852). Übertragen auf die Windentstehung bedeutet dies, dass unbewegte Luft keinen Kräften ausgesetzt sei. Dies steht im Widerspruch zu aktuellen wissenschaftlichen Vorstellungen, wonach auf Luft beispielsweise stets Gewichtskraft und Auftriebskräfte wirkten und im Falle der unbewegten Luft diese Kräfte ausgeglichen seien. Eine Studie aus dem Jahr 2001 mit 24 Schülern der Jahrgangsstufe 12 in Australien thematisiert Ursache und Wirkungsweise von Flieh- und Schwerkraften. Dabei wird die Vorstellung erhoben, dass die auf ein Objekt wirkende Gewichtskraft abhängig von der Entfernung des Objektes zur Erdoberfläche sei (ROTH ET AL. 2001, 168). Auch Kariotoglou et al. identifizieren diese Vorstellung (KARIOTOGLOU ET AL. 2009, 856). Dies würde bedeuten, dass die auf Luft wirkende Gewichtskraft nicht von ihrer durch die Dichte bestimmten Masse, sondern von ihrer Höhe abhängig sei. Die erhobenen Vorstellungen sind grundsätzlich nachvollziehbar: Wenn im Alltag ein Objekt bewegt werden soll, beispielsweise ein Auto, ein Fahrrad oder der eigene Körper, muss hierfür Kraft aufgewendet werden - bleibt das Objekt unbewegt, dann nicht. Die Vorstellungen zur Gewichtskraft könnten auf Erfahrungen mit Magnetkräften beruhen: Je weiter zwei Magnetpole voneinander entfernt sind, umso geringer scheint ihre Anziehungskraft. Mit der Entfernung der Luft zur Erdoberfläche schwindet der Einfluss der Gravitationskraft und entsprechend geringer wird die Gewichtskraft. Verglichen mit aktuellen wissenschaftlichen Vorstellungen fällt auf, dass die Veränderung der Gravitationskraft lebensweltlich über- und der Einfluss der Masse unterschätzt werden. Für Luft im Bereich der Troposphäre kann der Einfluss einer

veränderten Gravitationskraft auf die Gewichtskraft vernachlässigt werden. Interessant hinsichtlich des Themas Passatzirkulation erscheinen Vorstellungen zur Ursache und Wirkungsweise der Gradientkraft und der Coriolisablenkung. Leider liegen keine Studien vor, die sich hiermit befassen, sodass wichtige Fragen unbeantwortet bleiben.

## 6.7 Modellbildung und systemisches Denken

Welche Rolle spielen Systeme im Alltag? Systeme zu erkennen, umfasst auch die Fähigkeit zur Modellbildung. Leider gibt es hierzu in der Geographiedidaktik kaum empirische Studien. Ossimitz untersucht die Fähigkeiten von Schülerinnen und Schülern der Jahrgangsstufen 10 bis 13 aus Deutschland zu systemischen Denken. Er kommt zum Ergebnis, dass Lerner unterschiedlichste Darstellungsformen von sich aus einsetzen, um systemisches Denken zu visualisieren. Hierzu zählen tabellarische Darstellungen, szenische Darstellungen, Stadienbilder (d.h. Bilder, die zeitliche oder logische Sequenzen enthalten, ähnlich den *idea units*), einfache Funktionsgraphen und lineare Wirkungsdiagramme, komplexe Wirkungsdiagramme sowie metaplanartige Darstellungen. Lerner, die auf nicht-lineare Wirkungsdiagramme zurückgreifen, können die komplexesten Systeme beschreiben. 29% der Schülerinnen und Schüler greifen auf dieses Visualisierungsmittel zurück, während szenische Darstellungen und Stadienbilder von zusammen 18% der Lerner eingesetzt werden. 15% der Schülerinnen und Schüler nutzen lineare Wirkungsdiagramme (OSSIMITZ 2000, 206ff.). In einer deutschen Studie aus dem Jahr 2005 werden u.a. Einflussfaktoren auf die Fähigkeiten von Grundschulern der Jahrgangsstufen 3 und 4 untersucht, Systemelemente zu identifizieren und entsprechende Modelle zu bilden (SOMMER 2005). Sommer kommt zum Ergebnis, dass bereichsspezifisches systemisches Vorwissen entscheidenden Einfluss auf die Komplexität der Modellbildung hat. Zudem dokumentiert sie geschlechtsspezifische Unterschiede: Die Mädchen sind den Jungen in der Fähigkeit, den Untersuchungsgegenstand systemisch zu betrachten, überlegen. Ebenfalls signifikanten Einfluss wird dem Interesse nachgewiesen, da mit ihm gegenstandsspezifisches Wissen einhergeht (SOMMER 2005, 215ff.). Bestätigt werden die Ergebnisse von Sommer durch eine Studie, die mit 50 Schülerinnen und Schüler der Jahrgangsstufe 8 in Israel durchgeführt wurde (ASSARF & ORION 2005b). Dabei wurde u.a. systemisches Denken im Zusammenhang mit dem Wasserkreislauf untersucht. Assarf & Orion identifizieren sowohl die individuellen kognitiven Fähigkeiten der Lerner als auch deren Engagement als die beiden entscheidenden Einflussfaktoren auf systemisches Denken (ASSARF & ORION 2005b, 535ff.).

## 6.8 Zusammenfassung

Vorstellungen von Lernern mit Bezug zur Passatzirkulation wurden aus 23 internationalen empirischen Studien herausgearbeitet und vor dem Hintergrund der Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens reanalysiert. Die dargestellten Alltagsvorstellungen haben Auswirkungen auf das Verständnis der Passatzirkulation. Wenn davon ausgegangen wird, dass Luft Wärme v. a. leitet wie ein Festkörper, wird es schwierig sein, Temperaturunterschiede zwischen Luftmassen zu erklären, da Wärmeleitung schnell zu einem Temperatúrausgleich führen müsste. Die Vorstellung von warmer Sonnenstrahlung hat Konsequenzen für den Temperaturverlauf der unbewegten Luft im Bereich der Troposphäre: Dieser würde mit der Höhe konstant bleiben oder gar zunehmen, da Luft entweder ähnlich viel Wärme oder aufgrund der Nähe zur Sonne mit der Höhe mehr Wärme empfangen würde. Prozesse der thermischen Konvektion könnten in einer solchen Atmosphäre nicht stattfinden. Die Vorstellung, eine Veränderung des Abstands Erde-Sonne sei ursächlich für die Entstehung von Jahreszeiten, hat zunächst keine Konsequenzen für ein Verständnis der Passatzirkulation, sofern der Einstrahlungswinkel Berücksichtigung findet, dieser also beispielsweise im Bereich der Äquators das ganze Jahr über im Zenit stehen würde. Allerdings könnte aus dieser Vorstellung keine jahreszeitliche Veränderung des Verlaufs der ITCZ abgeleitet werden. Außerdem steht die Vorstellung im Widerspruch zu der Erfahrung, dass auf den Halbkugeln jeweils abwechselnd Sommer und Winter ist. Stellt man sich Luft als Kontinuum vor und nicht als aus kleinsten Teilchen in unregelmäßiger Bewegung bestehend, wird es schwer sein, Phänomene wie Luftdichte oder Luftdruck zu verstehen. Dass sich die Luftdichte nicht verändern könne, führt dazu, dass zahlreiche Prozesse wie beispielsweise die thermische Konvektion nicht stattfinden können oder andere Ursachen haben. Die Vorstellung von der Gewichtlosigkeit von Luft führt zu grundsätzlich anderen Ansichten über die Ursache von Auf- und Abwinden, da eine Gewichtskraft hier nicht existiert. Die vielfältigen Vorstellungen zum Luftdruck haben eine Konsequenz gemeinsam: Horizontale und vertikale Luftbewegungen scheinen nicht vom Luftdruck abhängig zu sein, da dieser entweder gar nicht existiert oder im Widerspruch zu denkbaren Winden steht. Entsprechend schwierig erscheint ein Verständnis der Wirkungsweise der Gradientkraft.

Das Phänomen der Verdunstungskälte bzw. Kondensationswärme könnte mit der Vorstellung einer chemischen Reaktion von Wasser und Luft bzw. des Einflusses des Luftdrucks – wenn auch diffus - erklärt werden, ohne zu einem grundlegend neuen Verständnis der Passatzirkulation zu kommen. Zwei Alltagsvorstellungen zu Wasserdampf haben jedoch weitreichende Konsequenzen: Wenn feuchte Luft schwerer ist als trockene, bedeutet dies, dass die thermische Konvektion im Bereich der ITCZ geringmächtiger sein müsste. Wolken, die aus Wasserdampf bestehen, lassen die Frage aufkommen, wie der Wasserdampf in die Höhe kommt, da dieser schon während seines Aufstiegs

sichtbar sein sollte. Ein Verständnis der Wasserdampf-Sättigung der Luft in Abhängigkeit von ihrer Temperatur erscheint aufgrund der Vorstellungen schwierig.

Wenn die Volumenänderung von Luft keine Auswirkungen auf deren Temperatur hat, bedeutet dies, dass aufsteigende oder absinkende Luftmassen sich weder abkühlen noch erwärmen, es sei denn, andere Faktoren führen hierzu. Dies hätte weitreichende Konsequenzen für die Passatzirkulation, da weder feuchtadiabatische Prozesse im Bereich der ITCZ noch das Phänomen der Passatinversion erfasst werden könnten.

Windentstehung ist grundsätzlich schwierig vorstellbar, da Prozesse im Mikrokosmos ursächlich sind und diese nicht direkt erfahren werden können. Zudem zeigt sich ein Phänomen, das auch bei den historischen wissenschaftlichen Vorstellungen zu finden ist: Monokausalität. Alltagsvorstellungen gehen jeweils von einer Ursache für ein bestimmtes Ereignis aus. Die dargestellten Vorstellungen lassen Rückschlüsse auf den Passatkreislauf zu: Wirken auf Luftmassen in großen Höhen geringere Gewichtskräfte, sinken diese seltener ab oder andere Kräfte verursachen dies. Interessant erscheint hier also die Frage, welche Wirkungsmechanismen in der Vorstellung der Lerner beispielsweise die Urpassate beeinflussen. Wenn auf unbewegte Objekte grundsätzlich keine Kraft wirkt, stellt sich die Frage, wann unbewegte Luft oder ein Tröpfchen in einer Wolke zu Boden fallen.

Die Fähigkeit, Systeme zu erkennen und Modelle zu bilden, hängt maßgeblich vom gegenstandsspezifischen Vorwissen ab. Es wurde herausgearbeitet, dass Jungen ein etwas größeres Interesse an der Physischen Geographie besitzen. Ob damit größeres Vorwissen einhergeht und entsprechende Fähigkeiten zu systemischen Denken, wird zu prüfen sein. Sommer kommt zum Ergebnis, dass Mädchen in Bezug auf die Fähigkeit den Untersuchungsgegenstand systemisch zu betrachten, den Jungen überlegen sind. Spannend erscheint auch die Frage, ob und für welche Darstellungsformen sich die Lerner bei der systemischen Betrachtung der Passatzirkulation entscheiden werden. Ossimitz stellt fest, dass 29% der Schülerinnen und Schüler aus den Jahrgangsstufen 10 bis 13 auf komplexe, nicht-lineare Wirkungsdiagramme zurückgreifen. Immerhin nutzen jedoch auch knapp ein Drittel der Lerner weniger geeignete Visualisierungsmittel wie szenische Darstellungen oder lineare Wirkungsdiagramme.

Anhand dieses Überblicks wird der defizitäre Stand der didaktischen Vorstellungsforschung in einigen Bereichen deutlich. Beispielsweise fehlen weitere Vorstellungen zur Windentstehung und insbesondere zur Ursache und Wirkungsweise von Gradientkraft und Coriolisablenkung.

## 7 Vorstellungen von Schülerinnen und Schülern zur Passatzirkulation

Die rekonstruierten Vorstellungen zur Passatzirkulation basieren auf Aussagen von insgesamt 30 Lernern (18w, 12m), die im Rahmen einer Interviewstudie mit je drei Schülerinnen oder Schülern der Jahrgangsstufe 10 an vier Landauer Gymnasien im Zeitraum Mai-Juni 2011 erhoben wurden (siehe Tabelle 4). Die Interviews dauerten jeweils zwischen 60 und 90 Minuten

Interview-Nr.	TeilnehmerInnen	Interview-Nr.	TeilnehmerInnen
1	Kerstin, Rita, Verena	6	Annika, Lara, Nele
2	Julian, Björn, Tim	7	Hannah, Jana, Alina
3	Judith, Katja, Katrin	8	Paul, Stefan, Tobias
4	Amelie, Sophie, Anne	9	Fabian, Jonas, Simon
5	Lea, Emma, Elena	10	Bernd, Jan, Rainer

**Tabelle 4:** Übersicht über die TeilnehmerInnen der Interviewstudie (Namen geändert).

Kriterien zur Sicherung der Qualität der Daten betreffen die Auswahl der Probanden und die sorgfältige, lückenlose Dokumentation der Erhebung und ihrer Auswertungsschritte sowie Verfahren interner und kommunikativer Validierung. Ausführlich wird auf die Erhebungs- und Auswertungsmethodik sowie die Kriterien zur Qualitätssicherung in Kapitel 4 eingegangen. Die Ziele und Fragestellungen, die der Erhebung zugrunde liegen, werden in Kapitel 3 erläutert. Ergänzend dazu sollen an dieser Stelle die einzelnen, aufeinander folgenden Auswertungsschritte die Interviewstudie betreffend dargestellt werden:

1. Zunächst erfolgt die Transkription der videographisch dokumentierten Interviews mit Hilfe der Software F5 unter Berücksichtigung festgelegter Transkriptionsregeln, wie in Kapitel 4 (Abschnitt 4.2) beschrieben.
2. Die Interviews werden zunächst einzeln und nacheinander unter bestimmten Leitfragen (Auflistung und Begründung der Leitfragen: siehe unten) untersucht. Es werden so 30 geordnete Lernaussagen in Form eines kohärenten Textes zu je einer Leitfrage entwickelt. Die Ziele und Schritte des Redigierens und Ordnen der Lernaussagen im Rahmen der qualitativen Inhaltsanalyse werden ausführlich in Kapitel 4 (Abschnitt 4.3) dargestellt.
3. Diese geordneten Lernaussagen werden anschließend miteinander verglichen. Hierbei werden induktiv Typen<sup>11</sup> entwickelt, d.h. Lernaussagen, die gemeinsame Merkmale besitzen, werden zu einer Gruppe zusammengefasst. Beispielsweise betrachten einige Lerner aufsteigende Luft als etwas Relatives, anderes als etwas Absolutes. Entsprechend können zwei Typen gebildet werden. Es handelt sich hierbei jedoch nicht um ein Verfahren der Typenbildung, wie es im Rahmen qualitativer Sozialforschung verwendet wird (vgl. BOHNSACK & NENTWIG-GESEMANN 2011, 162-166). Vielmehr findet ein thematisches Ordnen der Aussagen verschiedener Lerner im Vorfeld der Explikation statt.

<sup>11</sup> Typ von gr. *týpos* bedeutet wörtlich u. a. 'Figur, Bild, Muster' (KLUGE 1999, 842). In diesem Sinne wird in dieser Arbeit auch von rekonstruierten Vorstellungstypen gesprochen.

4. Die Explikation bezieht sich also auf mehrere Aussagen verschiedener Lerner zu einem Aspekt, die gemeinsame Merkmale besitzen. In Fällen, in denen zu viele Lernaussagen vorliegen, wird aus Praktikabilitätsgründen exemplarisch vorgegangen. Eine vollständige Dokumentation der rekonstruierten Vorstellungen befindet sich im Anhang. Im Rahmen dieses Auswertungsschrittes werden verwendete Schemata, Metaphern, angesprochene oder mögliche Erfahrungshintergründe sowie sonstige Begründungen oder Verfahren des Schlussfolgerns reflektiert. Es macht Sinn, in diesem Zusammenhang auch auf Ähnlichkeiten mit den herausgearbeiteten historischen Vorstellungen einzugehen. Ausführlich wird hierauf wie auch auf das Verfahren der systematischen Metaphernanalyse in Kapitel 4 (Abschnitt 4.3) eingegangen.
5. Den letzten Schritt im Rahmen der qualitativen Inhaltsanalyse stellt die Strukturierung dar. Ziel ist es, die Lernaussagen nochmals zu glätten und zu paraphrasieren, um eine Gegenüberstellung mit den Wissenschaftleraussagen im Rahmen der didaktischen Strukturierung zu erleichtern.

Im Rahmen der Untersuchungsaufgabe 2 konnte herausgearbeitet werden, dass Vorstellungen zu bestimmten Bereichen bisher defizitär erforscht sind oder Lernern aufgrund fehlender lebensweltlicher Erfahrungsmöglichkeiten besondere Schwierigkeiten bereiten. Diese Ergebnisse wurden bei der Konzeption des Interviewleitfadens berücksichtigt. Horizontale und vertikale Luftbewegungen bilden einen Schwerpunkt der Erhebung, da Vorstellungen zu Windentstehung und adiabatischen Prozessen wenig erforscht und lebensweltlich nicht erfahrbar sind. Spannend ist also die Frage, wie die Lerner diese unsichtbaren Vorgänge gedanklich fassen und auf welche Schemata und Metaphern sie zurückgreifen, um diese abstrakten Zielbereiche zugänglich zu machen. Zudem werden Vorstellungen zur Passatzirkulation als System, himmelsmechanischen Einflüssen und der Entstehung von Regen- und Trockenzeiten in den wechselfeuchten Tropen erfasst. Der Interviewleitfaden setzt sich aus 6 Themenblöcken zusammen (siehe Tabelle 5). Zu Beginn eines Themenblockes werden die Lerner mit einer offenen Fragestellung konfrontiert, mit der Aufforderung, in der Gruppe über diese zu diskutieren und nach Möglichkeit Zeichnungen zur Veranschaulichung zu erstellen. Letztere dienen dazu, Vorstellungen in ihrer Bildhaftigkeit besser erfassen zu können (siehe Abschnitt 2.1). Je nach Diskussionsverlauf und Lernaussagen werden verschiedene Interventionen mit dem Hinweis eingereicht, dass es sich hierbei um Behauptungen handelt, die argumentativ be- oder widerlegt werden sollen. Ein Themenblock wird abgeschlossen mit der Bitte, zu begründen, inwiefern die Interventionen bei der Beantwortung der eingangs gestellten offenen Frage hilfreich waren. Hierdurch sollen die Lerner dazu angeregt werden, nochmals Zusammenhänge zwischen Interventionen und offener Fragestellung zu reflektieren. Alle Impulse und Interventionen werden schriftlich auf Kärtchen eingereicht. Es wird darauf bewusst von

Luft gesprochen, nicht etwa von Luftmasse oder Luftkörper, um die Schülerinnen und Schüler in der Wahl ihrer Schemata und Metaphern nicht zu beeinflussen.

Nr.	Thema	Offener Impuls	Interventionen
1	Aufwinde	Diskutiert in der Gruppe, unter welchen Bedingungen Luft aufsteigt, inwiefern sich Luft beim Aufsteigen verändert und wie weit Luft aufsteigt!	(1) 'Luft hat ein Gewicht.' (2) 'Luft besteht aus Molekülen, die sich frei bewegen.' (3) 'Die Temperatur von Luft spielt bei Aufwinden eine Rolle.' (4) 'Die Dichte von Luft spielt bei Aufwinden eine Rolle.' (5) 'Luft kühlt beim Aufsteigen ab.' (6) 'Die Dichte der Luft der Atmosphäre nimmt mit zunehmender Entfernung von der Erdoberfläche ab.' (7) 'Die Dichte von umgebener Luft ist für den Temperaturverlust der aufsteigenden Luft verantwortlich.'
2	Aufwinde in den Tropen	Diskutiert in der Gruppe, inwiefern sich Aufwinde in den Tropen von denen in den gemäßigten Breiten unterscheiden!	(8) 'Der Einstrahlungswinkel der Sonne spielt eine Rolle.' (9) 'Wasserdampf spielt eine Rolle.' (10) 'Tropische Luft kann mehr Wasserdampf enthalten als Luft bei uns.' (11) 'Wasserdampfhaltige Luft steigt schneller auf als nicht wasserdampfhaltige.' (12) 'Aufsteigende wasserdampfhaltige Luft kühlt langsamer ab als trockene.'
3	Windentstehung und Antipassat	Diskutiert in der Gruppe, was mit der Luft in den Tropen in der Nähe des Äquators nach dem Aufstieg passiert!	(13) 'Die Luft weht als Wind auf gleichbleibender Höhe.' (14) 'Windentstehung hat etwas mit unterschiedlichem Luftdruck zu tun.' (15) 'Windentstehung hat etwas mit der aufsteigenden Luft zu tun.' (16) 'Die sich bewegende Luft in der Höhe ändert mit zunehmender Entfernung vom Äquator ihre Richtung.'
4	Abwinde und Urpassat	Die aufgestiegene Luft in den Tropen, die polwärts weht und zunehmend nach Osten abgelenkt wird, sinkt irgendwann ab. Diskutiert in der Gruppe, unter welchen Bedingungen Luft absinkt, wovon die Geschwindigkeit absinkender Luft abhängig ist und wie weit Luft absinkt!	(17) 'Die Luft kühlt in der Höhe ab.' (18) 'Das Absinken hat etwas mit der Abkühlung zu tun.' (19) 'Das Absinken hat etwas mit der Luftdichte zu tun.' (20) 'Die Luft erwärmt sich beim Absinken.' (21) 'In den wechselfeuchten und trockenen Tropen sinkt die Luft unter Umständen nur bis zu einer bestimmten Höhe ab.' (22) 'In diesen Gegenden gibt es monatelang kaum Niederschläge.'
5	Passatzirkulation	Diskutiert in der Gruppe, was ihr unter dem Begriff 'Passatzirkulation' versteht!	(23) 'Der Passatwind weht relativ beständig in den Tropen auf der Nordhalbkugel aus nordöstlicher Richtung und auf der Südhalbkugel aus südöstlicher Richtung.' (24) 'Je näher der Passatwind an den Äquator kommt, desto stärker weht er nach Süden auf der Nordhalbkugel bzw. nach Norden auf der Südhalbkugel.' (25) 'Der Passatkreislauf besteht aus aufsteigender Luft, Höhenwind, absinkender Luft und Bodenwind.' (26) 'Aufsteigende Luft, Höhenwind und absinkende Luft haben Einfluss auf den Passatwind und umgekehrt.'
6	Regen- und Trockenzeiten	Diskutiert in der Gruppe, wie Regen- und Trockenzeiten in den wechselfeuchten Tropen entstehen!	(27) 'Die wechselfeuchten Tropen befinden sich zwischen den trockenen und den immerfeuchten Tropen.' (28) 'Das Modell des Passatkreislaufs hilft die Entstehung von Regen- und Trockenzeiten zu verstehen.' (29) 'Die Veränderung des Einstrahlungswinkels der Sonne spielt eine Rolle.'

**Tabelle 5:** Themenblöcke, offene Impulse und Interventionen (=Aussagen, die argumentativ be- oder widerlegt werden sollen) des Leitfadens im Überblick.

Im Sinne einer internen Validierung werden Vorstellungen zu vertikalen Luftbewegungen in den Themenblöcken 1, 2, 4 und 5 in verschiedenen Kontexten erhoben. Lernerassagen zu horizontalen Luftbewegungen werden in den Themenblöcken 3 und 5 erfasst und miteinander verglichen. Ein systemisches Verständnis von atmosphärischen Prozessen in den Tropen wird im Rahmen der Themenblöcke 2, 3, 4, 5 und 6 ermittelt.

Die Interventionen 1 und 2 für den Themenblock 1 'Aufwinde' orientieren sich an den wissenschaftlichen Aussagen zu Luftdichte, -druck und -temperatur (siehe Abschnitt 5.2.2.2). Bisherige Untersuchungen haben Alltagsvorstellungen von Luft als Kontinuum bzw. einer Gewicht-

oder Masselosigkeit von Luft erhoben (siehe Abschnitt 6.3). Die Interventionen 3-7 beziehen sich auf Temperatur- und Dichteveränderungen und Ursachen sich vertikal bewegender Luft. Wissenschaftler stellen sich hier u. a. adiabatische Prozesse vor (siehe Abschnitt 5.2.2.4). Hierzu erhobene Alltagsvorstellungen sehen keine Auswirkungen einer Volumenveränderung der Luft auf ihre Temperatur oder gehen davon aus, dass eine Volumenverkleinerung zu einer Erwärmung führe, da Moleküle häufiger gegeneinander stoßen würden (siehe Abschnitt 6.5). Vorstellungen von Lernern zu vertikalen Luftbewegungen in der freien Atmosphäre wurden bisher nicht untersucht. Die Interventionen 6 und 7 sollen die Lerner dazu veranlassen, zu diskutieren, ob und inwiefern die sich mit der Höhe ändernde Dichte der Atmosphäre Einfluss auf die sich vertikal bewegende Luft ausübt. Für Themenblock 2 'Aufwinde in den Tropen' liegen folgende Interventionen bereit: Die Intervention 8 bezieht sich auf himmelsmechanische Ursachen größerer Erwärmung der Luft in den Tropen (siehe Abschnitt 5.2.2.1). Bisherige Untersuchungen dokumentieren, dass Lerner dem Abstand Erde zu Sonne große Bedeutung beimessen, um die Entstehung von Jahreszeiten zu erklären (siehe Abschnitt 6.2). Die herausgearbeiteten wissenschaftlichen Vorstellungen zu Wasser in der Atmosphäre und zu feuchtadiabatischen Prozessen (siehe Abschnitte 5.2.2.3 und 5.2.2.4) führen zur Entwicklung der Interventionen 9 bis 12. Bereits erhobene Alltagsvorstellungen gehen davon aus, dass Luft und Wasser eine chemische Verbindung eingehen oder Wolken aus Wasserdampf bestehen (siehe Abschnitt 6.4). Die Interventionen zur Themenblock 3 'Windentstehung und Antipassat' orientieren sich an wissenschaftlichen Vorstellungen zu Windentstehung und dem Einfluss der Coriolisablenkung (siehe Abschnitt 5.2.2.5 ). Lerner aussagen hierzu sind bisher kaum erfasst (siehe Abschnitt 6.6). Für Themenblock 4 'Abwinde und Urpassate' stehen folgende Interventionen bereit: Die Interventionen 17 bis 20 beschäftigen sich mit Ursachen sowie Dichte- und Temperaturveränderungen absinkender Luft. Im Sinne einer internen Validierung können die erhobenen Aussagen mit denen aus Themenblock 1 verglichen werden. Wissenschaftliche Vorstellungen zur Passatinversion (siehe Abschnitte 5.2.2.4 und 5.2.3) bilden den Anlass für die Gestaltung der Interventionen 20 und 21. Alltagsvorstellungen aus bisherigen Untersuchungen liegen hierzu nicht vor. Die Interventionen in Themenblock 5 'Passatzirkulation' dienen dazu, Vorstellungen zu Windentstehung im Sinne einer internen Validierung in diesem neuen Kontext zu erheben. Zudem sollen Aussagen zur Passatzirkulation als System (siehe Abschnitte 5.2.3 und 6.7) erfasst werden. Interventionen für Themenblock 6 'Regen- und Trockenzeiten' orientieren sich an wissenschaftlichen Vorstellungen zu Regen- und Trockenzeiten in den wechselfeuchten Tropen als Folge von Wechselwirkungen und Rückkopplungen im komplexen System Passatzirkulation. Die Passatinversion und die jahreszeitliche Verschiebung der ITCZ spielen hierbei eine entscheidende Rolle (siehe Abschnitt 5.2.3). Alltagsvorstellungen zur Ursache von Regen- und Trockenzeiten wurden bisher nicht erhoben (siehe Kapitel 6).

Der Auswertung der Interviews mittels qualitativer Inhaltsanalyse liegen Leitfragen zugrunde (siehe Abschnitt 4.3 und Tabelle 6 und 7). Diese resultieren aus den in Kapitel 6 herausgearbeiteten Forschungsdesiderata und orientieren sich an den wissenschaftlichen Vorstellungen.

Nr.	Thema	Leitfrage der Auswertung	Ergebnisse	Abschnitt
1	Aufwinde	Wie stellen sich die Lerner die Bedingungen vor, unter denen Luft aufsteigt?	Luft steigt unter der Bedingung auf, dass sie warm ist.	7.1.1.
			Luft steigt unter der Bedingung auf, dass sie wärmer oder leichter als etwas ist.	7.1.2
			Luft steigt unter der Bedingung auf, dass etwas anderes sie dazu bringt.	7.1.3
		Inwiefern stellen sich die Lerner vor, dass sich die Luft beim Aufsteigen verändert?	Aufsteigende Luft kühlt ab – Ursachen.	7.1.4
			Aufsteigende Luft wird schwerer – Ursachen.	7.1.5
			Aufsteigende Luft wird leichter – Ursachen.	7.1.6
		Welche Vorstellungen haben die Lerner darüber, wie weit Luft aufsteigt?	Luft steigt auf, solange bestimmte Bedingungen gegeben sind.	7.1.7
			Luft steigt bis zu den Wolken oder bis es regnet auf.	7.1.8
			Luft steigt bis zu sonstigen Grenzen auf oder bis sie Hindernisse überquert hat.	7.1.10
2	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.	7.2.1
			Die Luft in den Tropen ist wärmer – Folgen.	7.2.2
			Die Luft in den Tropen enthält mehr Wasserdampf – Ursachen.	7.2.3
			Die Luft in den Tropen enthält mehr Wasserdampf – Folgen.	7.2.4
3	Windentstehung und Antipassate	Welche Vorstellungen haben die Lerner zur Ursache horizontaler Luftbewegungen (Windentstehung)?	Wind entsteht durch ein Aufeinandertreffen.	7.3.1
			Wind entsteht als Folge eines Ausgleichs.	7.3.2
			Wind entsteht aufgrund eines Drückens oder aufgrund von Stößen.	7.3.3
		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.	7.4.1
			Die aufgestiegene Luft sinkt allmählich, nach polwärtiger Bewegung wieder ab.	7.4.2
			Die aufgestiegene Luft weht als Wind auf gleichbleibender Höhe.	7.4.3
			Die sich in der Höhe bewegende Luft ändert ihre Richtung, weil sie auf etwas stößt oder von etwas angezogen wird.	7.4.4
			Die sich in der Höhe bewegende Luft ändert ihre Richtung aufgrund der Erdrotation.	7.4.5

**Tabelle 6:** Themenblöcke, Leitfragen der Auswertung und Ergebnisse im Überblick (Teil 1 von 2).

Nr.	Thema	Leitfrage der Auswertung	Ergebnisse	Abschnitt
4	Abwinde und Urpassate	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.	7.5.1
			Luft sinkt ab unter der Bedingung, dass sie schwerer oder kälter als etwas ist.	7.5.2
			Luft sinkt aus sonstigen Gründen ab.	7.5.3
		Inwiefern stellen sich die Lerner vor, dass sich die Luft beim Absinken verändert?	Die absinkende Luft erwärmt sich – Ursachen.	7.5.4
			Die absinkende Luft erwärmt sich – Folgen.	7.5.5
			Die absinkende Luft erwärmt sich nicht – Ursachen.	7.5.6
		Welche Vorstellungen haben die Lerner darüber, wie weit Luft absinkt?	Die Luft sinkt bis zum Boden ab.	7.5.7
			Luft sinkt nur bis zu einer bestimmten Höhe ab.	7.5.8
5	Passatzirkulation	Welche Vorstellungen haben die Lerner zur Passatzirkulation?	Ursachen und Folgen ohne Wechselwirkungen.	7.6.1
			Die Passatzirkulation als lineares System.	7.6.2
			Die Passatzirkulation als komplexes System mit Wechselwirkungen.	7.6.3
			Der Passatwind ändert seine Richtung aufgrund der Erdrotation.	7.6.4
			Der Passatwind ändert seine Richtung aufgrund von Zusammenstößen.	7.6.5
6	Regen- und Trockenzeiten	Welche Vorstellungen haben die Lerner zur Entstehung der Regenzeiten in den wechselfeuchten Tropen?	Regenzeiten entstehen durch einen Wechsel der Windrichtung.	7.7.1
			Regenzeiten entstehen aufgrund eines sich ändernden Abstands zwischen Erde und Sonne.	7.7.2
			Regenzeiten entstehen aufgrund eines sich ändernden Einstrahlungswinkels der Sonne.	7.7.3
			Regenzeiten entstehen, weil sich etwas füllt oder anstaut.	7.7.4

**Tabelle 7:** Themenblöcke, Leitfragen der Auswertung und Ergebnisse im Überblick (Teil 2 von 2).

## 7.1 Aussagen zu Aufwinden

### 7.1.1 Luft steigt unter der Bedingung auf, dass sie warm ist

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Kerstin</b> (Interview 1: 3, 16, 40-42, 45, 54-57, 66-72, 107-109)	Luft steigt unter der Bedingung auf, dass sie warm ist. Je wärmer die Luft ist, desto enger sind die Moleküle aneinander, desto größer ist ihre Dichte, desto schwerer ist sie. Kalte Luft ist leicht.
<b>Verena</b> (Interview 1: 54-57, 66-72, 76-77, 86, 89, 107-109)	Die Temperatur spielt bei Aufwinden eine Rolle. Dichte hat etwas mit dem Abstand der Moleküle zueinander zu tun. Es macht keinen Sinn, dass warme Luft schwerer ist, wieso sollte sie dann beim Abkühlen runter kommen? Warme Luft steigt auf, sie muss leichter sein, sonst wäre es unlogisch. Luft ist leicht, wenn sie warm ist und deswegen steigt sie auf.
<b>Rita</b> (Interview 1: 2, 4, 40-42, 50, 54-57, 62, 66-72, 76-77, 107-109, 131)	Die Temperatur von Luft spielt eine Rolle, denn je wärmer die Luft ist, umso schneller steigt sie auf. Die Dichte von Luft spielt bei Aufwinden eine Rolle. Luft ist leicht, wenn sie warm ist.
<b>Sophie</b> (Interview 4: 1-11, 16-19, 28-38, 65-66, 77-79)	Luft steigt auf, wenn sie warm ist. Warme Luft ist leichter als kalte Luft. Ansonsten würde es ja nicht hoch gehen. Schwere Sachen gehen ja runter. Ich glaube jetzt weniger, dass die Dichte von Luft bei Aufwinden eine Rolle spielt. Weil die Dichte von Luft ist ja immer gleich. Warum sollte sie eine geringere Dichte haben, wenn sie wärmer wird?
<b>Hannah</b> (Interview 7: 1-18, 67-78)	Luft steigt auf, wenn sie warm ist, durch Wärme. Ja, wenn die Luft nicht warm ist, kann sie nicht aufsteigen. Wenn die Luft warm ist, steigt sie auf, weil sie leichter ist.
<b>Jan</b> (Interview 10: 1-8, 38-40, 42-49)	Ja, warme Luft steigt auf. Warme Luft hat eine höhere Dichte. Nein, eine geringere Dichte, weil es ja, die Teilchen sind ja weiter verteilt.

**Tabelle 8:** Luft steigt unter der Bedingung auf, dass sie warm ist (Beispiele von Lernaussagen).

Die geordneten Lernaussagen wurden im Rahmen der qualitativen Inhaltsanalyse unter der Leitfrage 'Wie stellen sich die Lerner die Bedingungen vor, unter denen Luft aufsteigt?' rekonstruiert. Es handelt sich bei diesen wie auch bei den folgenden geordneten Lernaussagen um Beispiele. Eine

vollständige Auflistung der geordneten Lernaussagen mit zugehörigem Typ findet sich im Anhang. Gemeinsam ist den Aussagen, dass sie aufsteigende Luft und ihre Temperatur nicht im Verhältnis zu der umgebenden Luft, sondern als etwas Absolutes betrachten: „Luft steigt auf unter der Bedingung, dass sie warm ist“ (Kerstin), „(w)arme Luft steigt auf, (...)“ (Verena), „Luft ist leicht, wenn sie warm ist“ (Rita), „(s)chwere Sachen gehen ja runter“ (Sophie), „(w)enn die Luft nicht warm ist, kann sie nicht aufsteigen“ (Hannah), „(j)a, warme Luft steigt auf“ (Jan). Die Temperaturdifferenz zur umgebenden Luft wird von den Lernern nicht explizit angesprochen. Ein Indiz dafür, dass diese bei den Überlegungen nicht berücksichtigt wird, ist die Äußerung, dass die Geschwindigkeit des Aufstiegs abhängig von der absoluten Temperatur der Luft sei: „(...) je wärmer Luft ist, umso schneller steigt sie auf“ (Rita). Die Bemerkungen „(...) sie muss leichter sein, (...)“ (Verena) und „(...), weil sie leichter ist“ (Hannah) beziehen sich nicht auf die umgebende Luft, sondern auf den zeitlich vorhergehenden Zustand der Luft. Die Aussagen erinnern an die historischen Vorstellungen von leichten und schweren Stoffen, die nach dem Ptolemäischen Weltbild ihrer natürlichen Sphäre entsprechend aufsteigen bzw. absinken. Um zu erklären, warum warme Luft leicht ist, greifen die Lerner auf das Konzept Dichte zurück: „Dichte hat etwas mit dem Abstand der Moleküle zueinander zu tun“ (Verena), „(...) die Teilchen sind ja weiter verteilt“ (Jan). Während also auf das Teil-Ganzes-Schema zurückgegriffen wird, bleibt das für das Verständnis der Luftdichte im Verhältnis zur umgebenden Luft wichtige Behälter-Schema unberücksichtigt. Sophie geht davon aus, dass die Dichte von Luft immer gleich ist und daher in Bezug auf die Ursache von Aufwinden nicht relevant. Lebensweltlich sind zwar unterschiedliche Dichten erfahrbar, beispielsweise dadurch, dass der eigene Körper im Wasser Auftrieb erhält, ein Stück Holz oder Eis auf dem Wasser schwimmt - sich ändernde Dichten von natürlichen Stoffen sind jedoch nicht erfahrbar. Außer bei Gasen bleibt die Dichte von Stoffen wie Wasser, Holz oder Steinen zudem konstant. Ähnliche Äußerungen wurden bereits in früheren Untersuchungen dokumentiert (siehe Kapitel 6). Kerstins Vorstellung enthält einen Widerspruch, den sie nicht bemerkt: Obgleich die Dichte immer gleich ist, kann Luft in Abhängigkeit von ihrer Temperatur schwer oder leicht sein. Kerstin geht davon aus, dass wärmere Luft eine höhere Dichte hat und damit schwerer ist. Möglicherweise liegt ihrer Vorstellung die lebensweltliche Erfahrung zugrunde, dass Reibung Wärme erzeugt. Sie könnte davon ausgehen, dass mehr Reibung entsteht durch Kontakt zwischen Molekülen, je enger diese einander sind. Auch die historische Vorstellung eines Wärmestoffes, der in die Luft eindringt und diese schwerer macht, könnte eine Rolle spielen. Verena erkennt diesen Widerspruch: Warum sollte etwas Schweres aufsteigen?

Interessanterweise greifen die Lerner von sich aus nicht auf metaphorische Konzepte zurück. Sie verwenden, wie der Interviewer, den Begriff `Luft`, ohne diesen zu variieren oder metaphorisch weiterzuentwickeln, beispielsweise zu einem `Luftkörper`, der aufgrund der inhärenten basalen Logik Inneres-Grenze-Äußeres eine höhere Aussagekraft hätte. Sie versuchen, dass wissenschaftliche

Konzept der Dichte heranzuziehen, um ihre Aussagen zu aufsteigender Luft zu untermauern, ohne jedoch das aus wissenschaftlicher Sicht grundlegende Behälter-Schema zu berücksichtigen. Lebensweltliche Erfahrungen werden leider nicht explizit genannt und müssen daher interpretativ erschlossen werden.

### 7.1.2 Luft steigt unter der Bedingung auf, dass sie wärmer oder leichter als etwas ist

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Julian</b> (Interview 2: 1-7, 10, 24--33, 35, 84-86)	Wenn Luft heißer als die umgebende Luft ist, dann steigt sie auf. Luft wird erwärmt, wenn sie sich über irgendetwas befindet, über dem sie gut Wärme aufnehmen kann, beispielsweise einem dunklen Untergrund. Die Sonnenstrahlen erwärmen dies. Ein Überdruck kommt durch die Temperaturunterschiede zustande. Warme Luft steigt auf, weil sie eine geringere Dichte hat und deswegen sozusagen vom Druck der kälteren Luft, die eine höhere Dichte hat, verdrängt wird.
<b>Judith</b> (Interview3: 1-14, 69-78, 80-89, 92-100, 182)	Luft steigt auf unter der Bedingung, dass sich darunter eine dunkle Fläche befindet. Dunkle Ackerböden, die brach liegen. Dunkle Flächen heizen ja mehr auf und deswegen heizt ja auch die Luft mehr auf. Warme Luft dehnt sich aus, wodurch sie leichter wird, da sich auf der gleichen Fläche nun weniger Sauerstoffmoleküle befinden. Sie steigt auf und legt sich über die kältere.
<b>Katja</b> (Interview3: 1-14, 69-78, 80-89, 92-100)	Luft steigt auf, wenn sich darunter dunkle Flächen befinden, die die Luft erwärmen. Wenn Luft sich erhitzt, dann dehnt sie sich aus. Das heißt, sie braucht mehr Fläche. Dadurch ist die warme Luft leichter als die kalte Luft und steigt nach oben. Ich würde den Unterschied zwischen heißer und kalter Luft auch irgendwie so beschreiben wie Wasser und Öl. Öl schwimmt ja auch immer auf der Wasseroberfläche. Und das Öl ist dann in dem Fall einfach die warme Luft und das Wasser die kalte. Es hat ja auch eine unterschiedliche Dichte.
<b>Bernd</b> (Interview 10: 1-8, 38-40, 42-49)	Luft steigt auf, wenn ein Unterschied zwischen kalter und warmer Luft vorhanden ist. (Stimmt Jan zu, dass wärmere Luft eine geringere Dichte hat als kältere). Deswegen steigt sie auf. Wie bei Wasser und Eis. (Stimmt Jan zu, dass unter Wolken Luft nicht aufsteigt.)

**Tabelle 9:** Luft steigt auf unter der Bedingung, dass sie wärmer oder leichter als etwas ist (Beispiele von Lerneraussagen).

Mit Hilfe der Leitfrage 'Wie stellen sich Lerner die Bedingungen vor, unter denen Luft aufsteigt?' konnten Lerneraussagen rekonstruiert werden, die aufsteigende Luft als etwas Relatives betrachten. Sie muss „heißer als die umgebende Luft“ (Julian) sein, sie steigt über die kältere Luft (Judith), ist „leichter als die kalte Luft“ (Katja), „ein Unterschied zwischen kalter und warmer Luft muss vorhanden sein“ (Bernd). Die Lerner greifen hierzu auf das Behälter-Schema bzw. die basale Logik Inneres-Grenze-Äußeres zurück: Im Inneren befindet sich warme Luft, außerhalb kältere Luft. Das Konzept der Dichte wird ebenfalls zur Erklärung herangezogen: Warme Luft hat eine geringere Dichte (Julian, Bernd), warme Luft dehnt sich aus (Judith, Katja), „braucht mehr Fläche“ (Katja), es befinden sich „auf der gleichen Fläche nun weniger Sauerstoffmoleküle“ (Judith). Judith und Katja verwenden den Begriff Fläche. Aufgrund des Kontextes ist jedoch davon auszugehen, dass sie darunter das Luftvolumen verstehen. Sie ziehen also das Teil-Ganzes- und das Behälter-Schema heran, um zu erklären, warum warme Luft eine geringere Dichte hat. Die Lerner nutzen zahlreiche Vergleiche und Metaphern. Luft erscheint als Person: Sie „verdrängt“ Luft (Julian), „legt sich“ über die kältere Luft (Judith) und „braucht“ mehr Fläche (Katja). Verglichen wird der Vorgang mit dem Aufsteigen von Öl oder Eis, das auf dem Wasser schwimmt (Katja, Bernd). Aus wissenschaftlicher Sicht erscheint dieser Vergleich problematisch, da sich die Dichte dieser Stoffe im Gegensatz zur Dichte sich vertikal bewegendender Luft nicht ändert. Er veranschaulicht zwar, warum Luft aufsteigt, jedoch nicht, welche Veränderungen beim Aufsteigen stattfinden. Julian zieht den Begriff Druck heran, um zu erklären, warum Luft aufsteigt. Er spricht von „Überdruck“ und „vom Druck der kälteren Luft“. Wissenschaftler

erachten nicht den Druck, sondern die Dichte als relevant für vertikale Luftbewegungen. Ursächlich erscheinen aus wissenschaftlicher Perspektive ein Dichteunterschied und eine daraus resultierende Verdrängung der leichteren Luft. Die Lerner artikulieren differenzierte Vorstellungen zur Erwärmung der Luft. So erwärmt die Sonne nicht direkt die Luft, sondern die Erdoberfläche, insbesondere „dunkle Flächen“ (Judith, Katja), „dunkle Ackerböden“ (Judith), einen „dunklen Untergrund“ (Julian). Voraussetzung ist, dass die Sonne scheint (Julian). Bei Bewölkung findet keine Erwärmung der Luft statt (Bernd). Es handelt sich also um wissenschaftsorientierte Vorstellungen zum Strahlungs- und Wärmehaushalt der Atmosphäre. Die Lerner äußern jedoch nicht, dass die Erdoberfläche und die Luft Wärmestrahlung auch bei Bewölkung oder bei Nacht abgeben. Ebenso differenzieren sie nicht zwischen solarer und terrestrischer, also kurz- und langwellige Strahlung. Warum die Sonnenstrahlung nicht direkt die Luft erwärmt und warum dunkle Oberflächen eine besondere Rolle spielen, wird nicht erläutert. Die Luft nimmt schließlich die Wärme der Erdoberfläche auf (Julian), ein Vorgang, der über das Person-Schema verstanden wird. Es fällt auf, dass die Lerner, die aufsteigende Luft als etwas Relatives betrachten, sowohl das Teil-Ganzes-, das Person- als auch das Behälter-Schema heranziehen. Sie führen lebensweltliche Vergleiche an und verfügen über differenzierte Vorstellungen zur Erwärmung der Luft. Eine metaphorische Weiterentwicklung des Begriffes `Luft`, wie sie in den wissenschaftlichen Texten zu finden ist, beispielsweise zu einem `Luftkörper`, einer `Luftsäule` oder `–blase`, erfolgt jedoch nicht. Die Lerner übernehmen den Begriff `Luft`, obgleich seine Aussagekraft gering ist.

### 7.1.3 Luft steigt unter der Bedingung auf, dass etwas anderes sie dazu bringt

Lerner	Geordnete Aussagen
Verena (Interview 1: 255-256)	Luft kann auch aufsteigen, wenn sie auf irgendwas trifft.
Jana (Interview 7: 1-18)	Luft steigt durch Winde auf (Gestik: Kreisbewegung mit Armen).
Simon (Interview 9: 21-22)	Wenn zwei Luftströme aufeinander kommen, geht Luft auch hoch.

**Tabelle 10:** Luft steigt unter der Bedingung auf, dass etwas anderes sie dazu bringt (Beispiele von Lerneraussagen).

Ein dritter Typ von Vorstellungen konnte aufgrund der Leitfrage `Wie stellen sich die Lerner die Bedingungen vor, unter denen Luft aufsteigt?` rekonstruiert werden. Diese Schülerinnen und Schüler gehen davon aus, dass etwas anderes Luft zum Aufsteigen veranlasst. Das Drücken-Schema spielt in diesem Zusammenhang eine wichtige Rolle. Sie begreifen Luft als eine Art Entität, die auf Objekte, beispielsweise andere Luftentitäten oder das Relief, treffen kann und dadurch einen Impuls erhält, vergleichbar mit den Reaktionen zweier Billardkugeln, die zusammenstoßen. Janas Gestik scheint zu bestätigen, dass Impulse oder ein Drücken für die Bewegung ausschlaggebend sind. Die Lerneraussagen ähneln der historischen Vorstellung Francis Bacons. Er hat ein mechanistisches Verständnis von Luftbewegungen und geht ebenfalls davon aus, dass Luft andere Luft anstoße. Das

von Wissenschaftlern verwendete metaphorische Konzept 'Luft ist ein Festkörper' mit Metaphern wie 'Luftsäule', '-körper' oder '-walze' wird hier also wörtlich verstanden. Aus wissenschaftlicher Sicht sind diese Vorstellungen bedingt angemessen. Sie beschreiben möglicherweise recht vage dynamische Ursachen für den Aufstieg von Luft. Simon entwickelt den vom Interviewer verwendeten Begriff 'Luft' weiter. Er verwendet, wie Wissenschaftler auch, das metaphorische Konzept 'Wind ist fluider Körper', wenn er von 'Luftströme(n)' spricht. Die Wissenschaftler verwenden dieses Konzept jedoch ausschließlich im Zusammenhang mit sich horizontal bewogender Luft, um Vorgänge der Bewegung zu veranschaulichen. In Bezug auf vertikale Luftbewegungen erscheint es aus wissenschaftlicher Sicht unangemessen, da es keinen Erklärungs- oder Veranschaulichungswert besitzt.

#### 7.1.4 Aufsteigende Luft kühlt ab – Ursachen

Die folgenden Aussagen, die unter der Leitfrage 'Inwiefern stellen sich Lerner vor, dass sich die Luft beim Aufsteigen verändert?' rekonstruiert werden konnten, haben die Gemeinsamkeit, dass sie von einer Abkühlung der aufsteigenden Luft ausgehen. Die Erklärungen zur Ursache dieser Abkühlung unterscheiden sich jedoch.

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Rita</b> (Interview 1: 6-133)	Kälter wird die aufsteigende Luft erst ab einer bestimmten Höhe, bei der es beginnt zu regnen. Dass Luft oben kalt ist, erfährt man beispielsweise, wenn man in einem Flugzeug sitzt und über die Außenbordtemperaturen informiert wird.
<b>Verena</b> (Interview 1: 6-133)	Luft wird während des Aufstiegs schwerer durch den Wasserdampf. Dadurch kommt es ab einem bestimmten Punkt zum Regen und dadurch kühlt die weiterhin aufsteigende Luft (um ein Grad pro hundert Meter) ab.

**Tabelle 11:** Aufsteigende Luft kühlt ab – Ursachen (Beispiele von Lernaussagen, Teil 1).

Rita und Verena gehen davon aus, dass Luft durch einsetzenden Regen abkühlt. Als Belege dafür, dass Luft in der Höhe kälter ist, führen Rita und Verena Erfahrungen beim Flugreisen bzw. wissenschaftsorientierte Zahlenwerte an. Im Alltag kann man häufig die Erfahrung machen, dass die Lufttemperatur in Bodennähe mit einsetzendem Regen, insbesondere bei Starkregen im Sommer, abkühlt. Hierfür gibt es aus wissenschaftlicher Sicht verschiedene Ursachen (siehe 5.2.2.2, 5.2.2.3 und 5.2.2.4): Die Tröpfchen fallen aus großen Höhen mit geringer Lufttemperatur, sind also relativ kühl. Bei anschließenden Verdunstungsvorgängen, insbesondere im Sommer, wird Kälte freigesetzt, sodass es zu einer Abkühlung kommt. Im Zusammenhang mit dem zyklonalen Wettergeschehen in den Mittleren Breiten ist zudem häufig der Durchzug von Kaltfronten zu erleben, was ebenfalls zur Ausbildung der Alltagsvorstellung 'Regen kühlt aufsteigende Luft ab' führen kann. Dass Kondensation jedoch zur Abkühlung umgebender Luft führt, ist aus wissenschaftlicher Sicht falsch. Das Gegenteil ist der Fall: Durch den Wechsel vom gasförmigen in den flüssigen Zustand wird Wärme freigesetzt. Diese Vorstellung ist wichtig für ein aus wissenschaftlicher Sicht angemessenes Verständnis der Passatzirkulation, denn ohne sie lässt sich nicht nachvollziehen, warum der Aufstieg der Luft im Bereich der ITCZ so weitreichend erfolgt und wie es zur Ausbildung der Passatinversion und damit

der trockenen Tropen und Regenzeiten kommt. Verena artikuliert zudem die Alltagsvorstellung, dass Wasserdampf Luft schwer macht und es durch zunehmende Schwere während des Aufstiegs irgendwann zum Einsetzen von Regen kommt. Genauer geht sie darauf leider nicht ein. Sie begreift Luft also in diesem Zusammenhang als Behälter. Ähnliche Äußerungen wurden im Rahmen früherer Untersuchungen dokumentiert (siehe Kapitel 6). Lebensweltlich erscheint die Vorstellung, dass Luft durch Wasserdampf schwerer wird, plausibel. So werden beispielsweise Kannen oder Gläser auch schwerer, wenn sie mit Wasser gefüllt werden. Es fällt auf, dass die beiden Schülerinnen die in diesem Zusammenhang hilfreichen und wichtigen Begriffe Verdunstung und Kondensation nicht verwenden. Wissenschaftliche Vorstellungen gehen davon aus, dass wasserdampfhaltige Luft leichter ist, da das Gewicht des gasförmigen Wassers geringer ist als das der Luftmoleküle.

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Julian</b> (Interview 2: 12-17, 36-57, 58-72, 73-76, 87-89)	Die Luft kühlt ab, weil sie ihre Energie als Wärmestrahlung in den Weltraum abgibt. In der Höhe ist die Luftdichte geringer, da hier die Erdanziehungskraft geringer ist. Dadurch, dass in der Höhe eine geringere Luftdichte vorherrscht, kann die umgebende Luft weniger Wärmestrahlung aufnehmen. Außerdem kann durch Wärmeleitung weniger Energie übertragen werden. Daher ist es hier kälter.
<b>Björn</b> (Interview 2: 12-17, 36-57, 58-72, 73-76, 87-89)	Luft wird während des Aufsteigens kühler. Da Kälte Abwesenheit von Wärme ist, muss die Luft irgendwie an Energie verlieren. Oben ist keine Masse, die Wärmeenergie speichert. Allerdings gibt die aufsteigende warme Luft die Wärme an die noch kälteren Luftmassen ab.
<b>Elena</b> (Interview 5: 61-76, 77-98)	Luft kühlt beim Aufsteigen ab, weil sie Energie verbraucht. Wenn es halt kälter wird, weil die Luft ja abkühlt, wenn sie ja nach oben steigt, setzt sie ja Energie frei.
<b>Jana</b> (Interview 7: 19-32, 33-45, 101-122, 123-129)	Die aufsteigende Luft kühlt ab, weil sie während des Aufsteigens Hitze ausstrahlt und damit Energie verbraucht.
<b>Simon</b> (Interview 9: 8, 11-20, 23-26, 33-44, 68-78):	Näher an der Erde sind eben mehr Teilchen und weiter weg von der Erde sind weniger Teilchen. Wenn jetzt in der Luft weniger Teilchen sind, gibt es weniger Zusammenstöße, das heißt, weniger Energie geht verloren und je mehr halt hier sind, desto mehr Zusammenstöße gibt es und desto mehr Energie würde verloren gehen.

**Tabelle 12:** Aufsteigende Luft kühlt ab – Ursachen (Beispiele von Lerneraussagen, Teil 2).

Andere Lerner gehen ebenfalls davon aus, dass aufsteigende Luft abkühlt, erklären dies aber mit einer Energieabgabe oder einem Energieverbrauch. Sie begreifen diese Vorgänge über das Person-Schema. Der Zustand der aufsteigenden Luft ändert sich, da sie etwas ausscheidet, dass sie zuvor in veränderte Form aufgenommen hat. Energie wird als Wärmestrahlung in den Weltraum abgegeben (Julian), Luft verliert Energie (Björn, Simon), Energie wird beim Aufsteigen „verbraucht“ (Jana, Elena), freigesetzt (Elena), da sie Hitze ausstrahlt (Jana). Einige Vorstellungen sind wissenschaftsorientiert. Simon greift beispielsweise auf das Teil-Ganzes-Schema zurück, um auf Aspekte der kinetischen Gastheorie eingehen zu können: So führt Simon die Abkühlung auf Zusammenstöße von Teilchen zurück, wobei der Energieverlust mit der Höhe abnimmt, da die Anzahl der Teilchen geringer wird. Ein wichtiges Schema, das die Wissenschaftler heranziehen, um adiabatische Prozesse zu beschreiben, verwendet Simon jedoch nicht: das Behälter-Schema. Die Teilchen im Inneren des Behälters stoßen gegen die außerhalb, wobei sich das Volumen aufsteigender Luft vergrößert und die Bewegungsenergie der Teilchen, äquivalent für die Temperatur, abnimmt. Insofern erscheint Simons Erklärung ungenau oder unvollständig. Es stellt sich die Frage, warum sich die Luft in der Höhe nicht

allmählich durch die Energieabgabe der aufsteigenden Luft erwärmt. Julian differenziert zwischen Wärmestrahlung und Wärmeleitung. Er begründet die niedrigen Lufttemperaturen in der Höhe schließlich mit der geringen Wärmeleitfähigkeit der Luft und der geringeren Luftdichte in der Höhe, eine Vorstellung, die aus wissenschaftlicher Sicht angemessen erscheint. Es stellt sich jedoch die Frage, was mit der abgegebenen Energie geschieht, wenn sie nicht von der Luft in der Höhe aufgenommen wird. Julian geht als einziger hierauf ein und erläutert, dass diese Energie in den Weltraum ausgestrahlt wird, eine Vorstellung, die aus wissenschaftlicher Sicht nicht falsch ist, jedoch ungenau. Die meiste Energie wird beim Prozess der Dilatation umgewandelt und kann schließlich bei Absinkvorgängen durch Kompression wieder in kinetische Bewegungsenergie rücküberführt werden.

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Tim</b> (Interview 2: 36-57, 58-72, 73-76, 87-89)	Luft kühlt beim Aufsteigen ab, weil sie mit den anderen kälteren Luftmolekülen in Kontakt kommt. Aber warum ist die Luft oben kälter? Eigentlich ist es ja näher an der Sonne.
<b>Judith</b> (Interview 3: 15-21, 121-136, 141-149, 150-174)	Luft kühlt beim Aufsteigen ab. Außerhalb eines Flugzeuges herrschen in großer Höhe sehr niedrige Temperaturen, Minusgrade. Heiße Luft steigt auf, wird von kalter Luft ummantelt, wodurch sich die Lufttemperaturen ausgleichen.
<b>Hannah</b> (Interview 7: 19-32, 33-45, 79, 101-122, 123-129)	Die aufsteigende Luft kühlt ab, weil es oben ja kälter ist. Die Luft oben ist kalt, weil sie einen geringen Wärmekoeffizienten hat. Die Wärme kommt von der Erde. Diese erwärmt dann die Luft, die aufsteigt. Das ist ja wie, wenn man warmes Wasser in kaltes Wasser schüttet, das vermischt sich dann irgendwann und wenn man es lang genug stehen lässt, wird es kalt.
<b>Simon</b> (Interview 9: 8, 11-20, 23-26, 33-44, 68-78)	Aufsteigende Luft kühlt ab, weil das Umfeld, also das was außen rum ist um die Luft, kühler ist, das sich das deswegen abkühlt.

**Tabelle 13:** Aufsteigende Luft kühlt ab – Ursachen (Beispiele von Lerneraussagen, Teil 3).

Ein anderer Typ von Vorstellungen geht davon aus, dass die Abkühlung der aufsteigenden Luft durch die kalte Luft in der Höhe bedingt wird. Sie würde „mit den anderen kälteren Luftmolekülen in Kontakt“ kommen (Tim), „wird von kalter Luft ummantelt“ (Judith), das „Umfeld“ ist kühler (Simon). Hannah stellt einen Vergleich mit zwei unterschiedlich temperierten Flüssigkeiten auf, die miteinander vermischt werden und deren Temperaturen sich schließlich angleichen. So würde die Wärmeleitung zwischen Erdoberfläche und bodennaher Luft erfolgen. Das Problem, dass es eben hierdurch auch zu einer Erwärmung der Luft in der Höhe kommen müsste, benennt sie als einzige und löst es, indem sie der Luft die Eigenschaft eines geringen Wärmekoeffizienten, also einer geringen Wärmeleitfähigkeit, zuschreibt. Die übrigen Lerner gehen hierauf nicht ein. Judith führt als Beleg für die niedrigeren Lufttemperaturen, wie Rita, Erfahrungen bei Flugreisen an. Tim stellt die Frage, ob Luft in der Höhe nicht aufgrund der größeren Nähe zur Sonne wärmer sein müsste. Er unterschätzt aus wissenschaftlicher Sicht die Entfernungsdimensionen Erde-Sonne und differenziert nicht zwischen solarer Strahlung und Wärmestrahlung. Diese Vorstellungen wurden bereits in früheren Untersuchungen erhoben (siehe Kapitel 6). Beides ist lebensweltlich auch nur schwer erfahrbar. Die Lerner nutzen das Behälter-Schema, um sich die aufsteigende Luft als Entität und in ihrer Relativität zur umgebenden Luft vorstellen zu können. Judith verwendet zudem die Metapher

des Ummantelns, um die Vorgänge außerhalb des Behälters zu verstehen. Hierdurch wird vorstellbar, wie sich die umgebende Luft um die aufsteigende Luft herum verteilt. Welche weiteren Implikationen diese Metapher enthält und welches metaphorische Konzept hier zugrunde liegt, kann leider nicht rekonstruiert werden, da Judith in anderen Kontexten nicht mehr hierauf zurückgreift. Interessant ist, dass die von der Schülerin gewählte Metapher in den untersuchten wissenschaftlichen Texten nicht verwendet wird, obgleich ihre Aussagen aus wissenschaftlicher Sicht angemessen erscheinen.

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Amelie</b> (Interview 4: 39-55, 56-64, 80-81)	Luft kühlt beim Aufsteigen ab, weil sie sich von der Erde und der Erdwärme entfernt. Erde erwärmt sich durch die Sonne, da sie eine größere Fläche hat und dort größere Lichtstrahlen auftreffen können als auf die kleinen Luftmoleküle.
<b>Stefan</b> (Interview 8: 11-21, 21-32, 39-46, 60-64, 211-217)	(In Bezug auf Pauls Bemerkung, dass die Luft mit zunehmender Höhe weniger Sauerstoff enthält:) Vielleicht macht Sauerstoff das Blut auch wärmer oder so, also wenn es denn auch so wäre. Ja, es ist doch so, wenn dann weniger Sauerstoff drin ist und es kälter wird, könnte man ja daraus schließen, dass Sauerstoff die Luft warm macht. Weil der Sauerstoff dann nicht mehr in der Luft vorhanden ist, wird es kälter.
<b>Bernd</b> (Interview 10: 9-11, 50-51, 56-112)	Luft kühlt beim Aufsteigen ab. Die Luft in der Nähe der Erdoberfläche erwärmt sich durch das Gewicht, das auf ihr lastet. Die Luft wird gestaucht und hat eine hohe Dichte und einen hohen Druck. Je höher der Druck ist, umso wärmer ist die Luft. Sie erwärmt sich auch durch die Sonnenstrahlen, die auf die Erdoberfläche treffen. Je höher die Luft aufsteigt, desto weniger Gewicht lastet auf ihr und umso weniger Druck hat sie und umso kälter wird sie.

**Tabelle 14:** Aufsteigende Luft kühlt ab – Ursachen (Beispiele von Lerneraussagen, Teil 4).

Drei weitere Erklärungen für die Abkühlung aufsteigender Luft konnten identifiziert werden. Amelie versteht Lichtstrahlen und Luftmoleküle sehr bildhaft. Sie betrachtet beide als Entitäten mit Hilfe des Start-Weg-Ziel-Schemas, die aufeinander treffen können. Hierbei werden Erfahrungen aus dem Mesokosmos, etwas Kleines ist schwer zu treffen, auf den Mikrokosmos übertragen. Sowohl die Vorstellung, dass die Intensität der Erwärmung von der Größe der Fläche abhängig ist, als auch die, dass Luftmoleküle eine kleine Fläche haben, ist aus wissenschaftlicher Sicht nicht angemessen. Mit Hilfe einer Analogiebildung versucht auch Stefan das Phänomen zu erklären. Er geht davon aus, dass Sauerstoff das Blut erwärmt - eine Äußerung, die aus wissenschaftlicher Sicht nicht falsch, jedoch ungenau formuliert ist. Er überträgt dieses Phänomen nun auf die aufsteigende Luft. Auch diese enthält Sauerstoff, welcher zur Erwärmung der Luft beiträgt. Da der Sauerstoffgehalt jedoch mit der Höhe abnimmt, nimmt auch die Lufttemperatur ab. Diese Erklärung ist aus wissenschaftlicher Sicht nicht angemessen, da in der Luft keine chemischen Reaktionen mit Sauerstoff stattfinden, bei denen Wärme freigesetzt wird. Bernd erklärt die Abnahme der Lufttemperatur mit der Höhe mit einem geringer werdenden Druck auflastender Luft. Er begreift das Phänomen unter Berücksichtigung der Konzepte Druck und Dichte über das Behälter-Schema, dessen Volumen sich je nach auflastender Luft verändern kann. Unter Druck versteht er die Gewichtskraft der auflastenden Luft. Zur Veranschaulichung verwendet er die Metapher des Stauchens, also Zusammenpressens eines Körpers. Interessanterweise verwenden die Wissenschaftler diese Metapher in ihren Arbeiten nicht, obgleich sie ebenfalls davon ausgehen, dass sich die Dichte der Atmosphäre aufgrund ihres Eigengewichts verändert. Dass dies zur Abkühlung aufsteigender Luft führt, ist aus wissenschaftlicher

Sicht indirekt richtig, jedoch unpräzise ausgedrückt: Wissenschaftler führen die Abkühlung auf das Entstauchen der aufsteigenden Luft, die adiabatische Dilatation, zurück.

### 7.1.5 Aufsteigende Luft wird schwerer – Ursachen

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Kerstin</b> (Interview 1: 6-133)	Luft müsste, je höher sie steigt, umso schwerer werden, weil sie unterwegs immer mehr Feuchtigkeit aufnimmt. Doch dies macht keinen Sinn, weil etwas Schweres nicht nach oben steigt. Irgendwann ist dann der Maximalpunkt oder so erreicht und dann fängt es an zu regnen.
<b>Rita</b> (Interview 1: 6-133)	Aufsteigende Luft wird außerdem schwerer, weil sie noch Flüssigkeit oder so aufnimmt. Dann, ab einer bestimmten Höhe, regnet es.
<b>Elena</b> (Interview 5: 61-76, 77-98)	Die aufsteigende Luft wird kühler und dadurch wieder schwerer. Umso mehr Dichte da drin ist, desto kühler wird die aufsteigende Luft und dann wird sie ja auch schwerer.
<b>Stefan</b> (Interview 8: 21-32)	Wenn die Luft dann aufsteigt, wird sie kälter und die Dichte dann schwerer.
<b>Jan</b> (Interview 10: 56-112)	Na gut, aber wir haben ja gesagt, warme Luft hat eine geringere Dichte und oben ist sie ja wieder abgekühlt. Also die kühlt ja immer ab. Also nimmt die Dichte zu.

**Tabelle 15:** Aufsteigende Luft wird schwerer – Ursachen (Beispiele von Lernaussagen).

Unter der Leitfrage 'Inwiefern stellen sich Lerner vor, dass sich die Luft beim Aufsteigen verändert?' konnte ein Typ von Vorstellungen rekonstruiert werden, bei dem von einem Schwererwerden aufsteigender Luft ausgegangen wird. Die Aussagen zu den Ursachen sind vielfältig: Kerstin und Rita gehen davon aus, dass Luft beim Aufsteigen Wasserdampf oder Feuchtigkeit aufnimmt. Sie verstehen Luft als einen sich füllenden Körper über das Person-Schema, bei dem etwas hinzukommt, der Feuchtigkeit oder Flüssigkeit „aufnimmt“ (Kerstin, Rita), wodurch sich sein Zustand verändert und er schwerer wird. Er füllt sich bis zu einem „Maximalpunkt“ (Kerstin), dann beginnt es zu regnen. Wichtige Begriffe wie Verdunstung oder Kondensation verwenden die beiden nicht. Schon Verena äußert diese Idee im Zusammenhang mit der Abkühlung aufsteigender Luft. Lebensweltlich erscheint eine solche Vorstellung, wie bereits erläutert, durchaus plausibel und nachvollziehbar. Die wissenschaftliche Vorstellung, dass Wasserteilchen leichter als Luftteilchen sind, ist im Alltag hingegen kaum erfahrbar. Elena, Stefan und Jan gehen davon aus, dass die Luft schwerer wird, weil sie abkühlt. Sie schlussfolgern dies deduktiv aufgrund der Regel, dass die Dichte der Luft mit ihrer Temperatur korreliert und kühlere Luft eine größere Dichte habe. Sie gehen hierbei monokausal vor. Aus wissenschaftlicher Sicht sollte jedoch noch eine zweite Gesetzmäßigkeit Berücksichtigung finden, nämlich die Ausdehnung der aufsteigenden Luft aufgrund der abnehmenden Dichte der umgebenden Luft. Hieraus folgt, das genau das Gegenteil der Fall ist: aufsteigende Luft wird leichter, ihre Dichte verringert sich.

### 7.1.6 Aufsteigende Luft wird leichter – Ursachen

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Tim</b> (Interview 2: 36-57, 58-72, 73-76, 87-89)	Außerdem nimmt ihre Dichte ab, weil mit zunehmender Höhe mehr Platz ist und die Moleküle dann in mehrere Richtungen weggehen.
<b>Katja</b> (Interview 3: 15-21, 121-136, 141-149, 150-174, 177)	Beim Aufsteigen wird die Luft dünner, weil oben weniger Sauerstoff da ist. Auch die Dichte der Luft der Atmosphäre nimmt mit zunehmender Entfernung von der Erdoberfläche ab, weil weniger Sauerstoff enthalten ist. Bergsteiger bekommen deswegen Probleme.
<b>Judith</b> (Interview 3: 15-21, 121-136, 141-149, 150-174)	Beim Aufsteigen wird Luft dünner. Die abnehmende Dichte kann man sich so vorstellen: Die Masse pro Volumen ist geringer. Wenn du ein Kilogramm auf einen Kubikmeter hast, ist es ja dann mehr, als wenn du plötzlich nur noch ein halbes Kilogramm hast. Beispielsweise haben Steine eine höhere Dichte als Wasser; sie sinken. Holz hat eine geringere Dichte und kann auf dem Wasser schwimmen.
<b>Lea</b> (Interview5: 13, 52-53, 61-76, 77-98)	Die Dichte der Luft nimmt ab, weil die Luft oben viel dünner ist.
<b>Annika</b> (Interview 6: 28-32, 58-66, 71-77, 78-99)	Die aufsteigende Luft wird dünner. Da ist nicht mehr so viel Sauerstoff drin, weil der Sauerstoff vielleicht verbraucht wird.
<b>Jana</b> (Interview 7: 19-32, 33-45, 101-122, 123-129)	In der Höhe ist die Luft dünner, weil dort weniger Luft hinkommt, was man beispielsweise auf einem Berg beim Atmen merkt.

**Tabelle 16:** Aufsteigende Luft wird leichter – Ursachen (Beispiele von Lernaussagen).

Einige Lerner gehen davon aus, dass aufsteigende Luft leichter wird. Diese Annahme, nicht jedoch die vielfältigen Erklärungen zur Ursache, erscheint aus wissenschaftlicher Sicht angemessen. Tim und Jana erläutern, dass die aufsteigende Luft leichter wird, da dort weniger Luft hinkommt (Jana) und sich die Luftmoleküle weiter verteilen können, da sie mehr Platz haben (Tim). Inwiefern die beiden hier das Konzept einer Dichteänderung aufgrund des Eigengewichtes der Luft heranziehen, ist unklar. Ob Tim davon ausgeht, dass aufgrund der Kugelgestalt der Erde in der Höhe ein größeres Platzangebot vorherrscht und Luft daher dünner wird oder ob er lediglich das Konzept geringerer Dichte auf molekularer Ebene beschreibt, kann leider ebenfalls nicht geklärt werden. Jana und Tim unterscheiden, wie auch die übrigen Lerner mit Ausnahme von Lea nicht zwischen der Dichte der umgebenden und der der aufsteigenden Luft. Jana belegt ihre Annahme mit Erfahrungen von Bergsteigern in großen Höhen. Auch Katja führt einen solchen Beleg an. Sie und Annika gehen davon aus, dass die Luft leichter wird, weil weniger Sauerstoff darin ist. Dieser würde „verbraucht“ (Annika) werden. Das Leichterwerden der Luft wird also über das Person-Schema begriffen. Lea nimmt an, dass die Abnahme der Dichte aufsteigender Luft als eine Art Anpassung an die Luft in der Höhe geschieht, „weil die Luft oben viel dünner ist“. Inwiefern der Luft jedoch tatsächlich Absichten und intendierte Handlungen unterstellt werden, kann aus dem Kontext heraus leider nicht erschlossen werden. Auch die Erklärungen von Katja, Annika und Lea erscheinen aus wissenschaftlicher Sicht nicht angemessen. Diese betrachten die Ausdehnung aufsteigender Luft als ursächlich für die Abnahme der Luftdichte. Judith veranschaulicht das Verhalten von Stoffen mit unterschiedlichen Dichten zunächst theoretisch mit Hilfe des Behälter- und des Teil-Ganzes-Schemas und schließlich über einen Vergleich mit Steinen und Holz im Medium Wasser. Leider erscheint dies wenig

aussagekräftig, da sich die Dichte des sinkenden Steines als auch die des auf der Wasseroberfläche schwimmenden Holzes nicht ändern. Die wissenschaftliche Vorstellung von adiabatischen Prozessen ist leider lebensweltlich nicht nachvollziehbar.

### 7.1.7 Luft steigt auf, solange bestimmte Bedingungen gegeben sind

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Kerstin</b> (Interview 1: 134-142, 144-147, 237-238)	Wenn Luft eine geringe Dichte hat, ist sie leicht und oben und steigt weiter auf. Wenn die Dichte schwer oder groß oder hoch ist, ist die Luft schwerer und dann steigt sie nicht weiter auf. Aber ab welchem Zeitpunkt, wann steigt die Luft nicht mehr auf, sondern fängt an abzufallen?
<b>Rita</b> (Interview 1: 228-238)	Luft steigt solange auf, bis sie nicht mehr abkühlen kann.
<b>Tim</b> (Interview 2: 35, 90-93)	Luft steigt solange auf, wie ihre Dichte gering ist, d.h. die Moleküle nicht nahe beieinander, sondern weit verteilt sind.
<b>Amelie</b> (Interview 4: 1-11, 82-85)	Luft steigt auf, bis sie abgekühlt ist.
<b>Elena</b> (Interview 5: 77-98)	Luft steigt, bis sie abgekühlt ist. Sie ist dann schwerer und hat mehr Dichte.
<b>Hannah</b> (Interview 7: 19-32, 33-45, 79, 101-122, 123-129)	Die aufsteigende Luft kühlt ab und kommt wieder runter, weil sie schwerer wird.

**Tabelle 17:** Luft steigt auf, solange bestimmte Bedingungen gegeben sind (Beispiele von Lernaussagen, Teil 1).

Unter der Leitfrage 'Welche Vorstellungen haben Lerner darüber, wie weit Luft aufsteigt?' konnte ein Typ von Lernaussagen rekonstruiert werden, der davon ausgeht, dass Luft aufsteigt, solange bestimmte Bedingungen gegeben sind. Interessanterweise betrachten einige Lerner auch in diesem Kontext aufsteigende Luft als etwas Absolutes. Sie fragen nicht nach einer Dichte- oder Temperaturdifferenz zwischen aufsteigender und umgebender Luft, sondern gehen von der Vorstellung aus, dass kalte Luft schwer ist und absinkt. Entsprechend steigt Luft auf, bis sie abgekühlt ist (Amelie) und damit ihre Dichte groß bzw. die Luft schwer ist (Kerstin, Tim, Elena). Formulierungen wie „(...)ist die Luft schwerer“ (Kerstin), „(...) ist dann schwerer und hat mehr Dichte“ (Elena) oder „weil sie schwerer wird“ (Hannah) beziehen sich auf den vorherigen Zustand der Luft. Mit dieser absoluten Betrachtungsweise kann der Zeitpunkt des Absinkens jedoch nicht genau beschrieben werden, ein Umstand, der Unzufriedenheit bei einer Schülerin (Kerstin) auslöst. Rita versucht daher eine präzisere Beschreibung, indem sie erklärt, dass Luft aufsteigt, „bis sie nicht mehr abkühlen kann“. Aus wissenschaftlicher Sicht erscheint diese Aussage jedoch nicht angemessen. Um zu verstehen, ab wann Luft nicht mehr aufsteigt, ziehen Wissenschaftler das Behälter-Schema sowie das Ziehen- und Drücken-Schema heran (Auftriebs- und Gewichtskraft). Ersteres ist die Voraussetzung, um aufsteigende Luft relativ zur umgebenden Luft betrachten und Dichte miteinander vergleichen zu können. Die Lerner nutzen keines dieser Schemata. Tim verwendet das Teil-Ganzes-Schema, um die Dichte auf molekularer Ebene verstehen zu können. Ohne hinzuziehen des Behälter-Schemas ist die

Aussagekraft dieses Ansatzes jedoch gering. Es fällt auf, dass die Schülerinnen und Schüler keine Metaphern verwenden, um zu veranschaulichen, wie weit Luft aufsteigt.

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Julian</b> (Interview 2: 18-23, 47-49, 90-93)	Luft steigt soweit auf, bis sie kühler ist als die Luft, die von unten nachströmt und absinkt.
<b>Tim</b> (Interview 2: 35, 90-93)	Luft steigt solange auf, wie der Wind andauert.
<b>Emma</b> (Interview 5: 77-98)	Luft steigt, bis sie genauso kalt wie die umgebende Luft ist. Dann sinkt sie wieder.
<b>Bernd</b> (Interview 10: 9-11, 50-51, 56-112)	Wie weit steigt Luft auf? Man kann, denke ich, keine bestimmte Höhe festlegen. Bis sie wieder so kalt ist, dass sie kälter ist als die Luft drunter. Und dann fällt sie wieder sozusagen.

**Tabelle 18:** Luft steigt auf, solange bestimmte Bedingungen gegeben sind (Beispiele von Lernaussagen, Teil 2).

Zwei weitere Arten von Erklärungen können unterschieden werden. Tim äußert auch die Vorstellung, dass Luft aufsteigt, solange „der Wind andauert“. Er begreift die vertikale Luftbewegung möglicherweise über das Ziehen- oder Drücken-Schema. Tim wird jedoch nicht präziser. Die Aussagekraft seiner Äußerung ist daher leider sehr gering. Bei einem anderen Ansatz betrachten die Lerner die aufsteigende Luft relativ zur umgebenden: Luft steigt nicht mehr auf, sobald sie „kühler ist als die Luft, die von unten nachströmt“ (Julian), „genauso kalt ist wie die umgebende Luft“ (Emma), „sie kälter ist als die Luft drunter“ (Bernd). Sie greifen also auf die basale Logik Inneres-Grenze-Äußeres zurück und beschreiben damit eine aus wissenschaftlicher Sicht angemessene Vorstellung. Julian verwendet die Metapher des `Nachströmens`. Wissenschaftler nutzen das metaphorische Konzept `Wind ist fließendes Wasser` im Zusammenhang mit horizontalen Luftbewegungen, nicht jedoch bei Aufwinden. Julian veranschaulicht die Luftbewegung als „von unten“ nachströmend. Dies erscheint schwer vorstellbar.

### 7.1.8 Luft steigt bis zu den Wolken oder bis es regnet auf

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Rita</b> (Interview 1: 84, 134--238, 322)	Luft steigt auf, bis es zum Niederschlag kommt.
<b>Björn</b> (Interview 2: 18-23, 47-49, 90-93)	Luft steigt bis zu einem Kondensationsniveau auf.
<b>Sophie</b> (Interview 4: 1-11, 82-85)	Luft steigt auf, bis sie zu kalt ist. Bis sie so kalt ist, dass Wasser zu Nebel, Dunst und dann zu Wassertröpfchen wird und dann als Wassertropfen wieder runter kommt.
<b>Emma</b> (Interview 5: 77-98)	Wenn Wolken da sind, dann wird die warme Luft abgehalten, damit sie nicht in die Atmosphäre dringt, glaube ich. Wenn zum Beispiel nachts Wolken da sind, dann wird es ja am nächsten Tag morgens auch wärmer. Weil die warme Luft halt nicht weggeht. Die Wolken halten die aufsteigende Luft halt. Am nächsten Morgen, wenn der Himmel ganz klar ist, dann ist es total kalt.
<b>Lara</b> (Interview 6: 20-27, 112-115)	Luft steigt bis zu den Wolken auf, also bis zum Himmel. Da bildet sich eine Wolke, dann regnet es und dann geht es wieder runter.
<b>Stefan</b> (Interview 8: 11-21, 21-32, 39-46, 60-64, 211-217)	Wie weit steigt Luft auf? Ich würde sagen, bis zu den Wolken. Vielleicht bildet sich ja dann, wenn dann die Luft kalt wird, und sich dann wieder neuer Regen bildet, dass dann ungefähr so die Grenze da oben ist, wo die Wolken sind. Weil vielleicht dann die Luft so schwer geworden ist, dass sie nicht mehr weiter aufsteigen kann.

**Tabelle 19:** Luft steigt bis zu den Wolken oder bis es regnet auf (Beispiele von Lernaussagen).

Ebenfalls unter der Leitfrage 'Welche Vorstellungen haben Lerner darüber, wie weit Luft aufsteigt?' konnten Vorstellungen rekonstruiert werden, die davon ausgehen, dass Luft bis zu den Wolken oder bis es regnet aufsteigt, also bis es „zum Niederschlag“ kommt (Rita), bis zu einem „Kondensationsniveau“ (Björn), bis „Wasser zu Nebel, Dunst, dann zu Wassertröpfchen wird“ (Sophie) oder bis zu den Wolken (Emma, Lara, Stefan). Die Äußerung von Rita ist alternativ zur Vorstellung 'Luft steigt auf, bis sie kühl und schwer ist' und im Kontext ihrer vorherigen Äußerungen zu betrachten, dass aufsteigende Luft durch zunehmenden Wasserdampfgehalt schwerer wird und daher der Regen einsetzt, der die Luft abkühlt. Emma begründet ihre Vorstellung als einzige ausführlicher: Wolken halten aufsteigende Luft davon ab, in die Atmosphäre, damit ist der Ort oberhalb der Wolken gemeint, zu dringen. Es handelt sich um eine teleologische Vorstellung, da den Wolken eine Zweckbestimmung zugeschrieben wird. Die Wolke wird hierzu personifiziert. Sie belegt ihre Erklärung mit der Alltagserfahrung, dass die nächtliche Abkühlung bei Bewölkung geringer ist. Wissenschaftler verwenden das metaphorische Konzept 'Wolken sind feste Körper', um die äußere Form der Wolken zu veranschaulichen. Emma versteht Wolken ebenfalls als eine Art Festkörper, jedoch wörtlich. Aufsteigende Luft kann diese Objekte nicht durchdringen. Stefan spricht von einer „Grenze“. Björn verwendet den Begriff „Kondensationsniveau“. Leider erläutert er diesen nicht weiter. Sophie geht auf den Vorgang der Regenbildung genauer ein. Ihre Äußerungen lassen den Schluss zu, dass sie Nebel und Dunst nicht als aus Wassertröpfchen bestehend ansieht. Woraus diese bestehen, ob aus Wasserdampf, bleibt jedoch unklar. Wissenschaftler betonen, dass Wasserdampf unsichtbar ist. Im Alltag wird das beispielsweise aus einem Kochtopf aufsteigende, bereits kondensierte und neblig sichtbare Wasser häufig als Wasserdampf bezeichnet. Es fällt auf, dass die Lerner Schwierigkeiten haben, das Verhalten von Wasser in der Atmosphäre zu verstehen.

Wissenschaftler stellen sich vor, dass Wasser im gasförmigen Zustand mit der Luft aufsteigt. Kondensiert das Wasser zu winzigen Tröpfchen, betrachten die Wissenschaftler Luft und Wasser getrennt. Luft kann weiterhin aufsteigen. Ob die Tröpfchen als Niederschlag zu Boden fallen, hängt von der auf sie wirkenden Auftriebs- und Gewichtskraft ab. Dieser Wechsel der Aggregatzustände wird über das Person-Schema verstanden. Im Alltag lässt sich dies jedoch kaum erfahren, da Wasserdampf und Luft unsichtbar sind. Kondensationsvorgänge, wie sie beispielsweise an einem beschlagenen Badezimmerspiegel oder an einem Kochtopfdeckel zu beobachten sind, lassen keine Rückschlüsse auf das Verhalten von Wasser in der Atmosphäre, insbesondere bei Aufwinden, zu.

### 7.1.9 Luft steigt bis zu sonstigen Grenzen auf oder bis sie Hindernisse überquert hat

Lerner	Geordnete Aussagen
Rita (Interview 1: 6,)	Luft steigt auf, bis sie über einen Berg drüber ist.
Verena (Interview 1: 134-142)	Luft steigt bis auf den Berg hoch.

**Tabelle 20:** Luft steigt bis zu sonstigen Grenzen auf oder bis sie Hindernisse überquert hat (Beispiele von Lernaussagen, Teil 1).

Einige Lerner erklären, dass Luft bis zu sonstigen Grenzen aufsteigt oder bis sie Hindernisse überquert hat. Rita und Verena gehen davon aus, dass Luft auch reliefbedingt aufsteigen kann. Da beide aufsteigende Luft absolut betrachten, bietet dieser Ansatz ihnen die Möglichkeit, die Dauer des Aufstiegs genauer zu beschreiben: „(...) bis sie über einen Berg drüber ist“ (Rita) bzw. „(...) bis auf den Berg hoch“ (Verena). Diese Vorstellung erscheint aus wissenschaftlicher Sicht angemessen.

Lerner	Geordnete Aussagen
Judith (Interview 3: 22-68, 184-190)	Luft steigt vielleicht 1500 oder 2000 Kilometer hoch auf? Da gibt es praktisch Luftschalen, die sich um die Erde legen und man teilt sie in Schichten ein, aber im Grunde sind das Übergänge. Es gibt ja verschiedene Luftschichten und je weiter man davon wegkommt, desto eher entweicht ja Luft auch in den Weltraum. Die Ozonschicht sorgt jedoch dafür, dass die Luft drin bleibt. Aber wenn die Löcher hat. Ich denke, die Dauer des Aufstiegs hängt auch mit der Luftdichte zusammen. Manche Gase aus der Luft, die so eine ganz geringe Dichte haben, die entfliehen einfach aus den Schichten, aus den Schalen. Zum Beispiel Wasserstoff. Also, dass die einfach nicht gehalten werden können von der Erde. Im Grunde gibt es ja schon irgendwo eine Schranke, also nicht eine feste Grenze, sondern irgendwo eine Schranke zwischen der Kraft, die im Weltraum herrscht und der, die auf unserer Erde herrscht. Und irgendwann, wenn die zu weit weg sind, diese leichten Moleküle, von der Erde, dann kann die Erde die nicht mehr halten und die entfliehen in den Weltraum. Und deswegen hat man ja nur so einen geringen Anteil im Grunde an diesen Gasen in der Luft.

**Tabelle 21:** Luft steigt bis zu sonstigen Grenzen auf oder bis sie Hindernisse überquert hat (Beispiele von Lernaussagen, Teil 2).

Judith geht von der Vorstellung aus, dass es bestimmte Grenzen in der Atmosphäre gibt, die den weiteren Aufstieg der Luft verhindern bzw. nur bestimmte Gase hindurch lassen. Sie spricht von „Luftschalen“, „Schichten“ und „Schranke(n)“. Sie ordnet diesen Grenzen eine bestimmte Aufgabe oder einen bestimmten Zweck zu. Diese sollen verhindern, dass die Luft in den Weltraum entweicht. Es handelt sich also um eine teleologische Vorstellung. Wissenschaftler begreifen die vertikale Struktur der Atmosphäre metaphorisch über das Konzept `aus übereinander liegenden Bestandteilen bestehend`. Judith versteht diese Schalen sehr wörtlich als Grenzen, da sie davon ausgeht, dass diese

„Löcher“ haben können und Gase hindurch gelangen könnten. In diesem Zusammenhang erwähnt sie die „Ozonschicht“. Welche Kraft im Weltraum herrscht, erläutert sie leider nicht. Judith nutzt Personifizierungen, um das Verhalten der Gase, der Erde und der Atmosphäre zu beschreiben: Leichte Elemente wie Wasserstoffe „entfliehen“ in den Weltraum. Sie können von der Erde „nicht gehalten“ werden, obgleich sich die Schalen schützend um die Erde „legen“. Judith entwickelt eine sehr differenzierte Vorstellung hinsichtlich der Frage, wie weit Luft aufsteigt. Ihre Ideen sind wissenschaftsorientiert. Judith greift die Vorstellung vom spezifischen Gewicht von Gasen auf und versucht ihre Behauptungen argumentativ zu belegen. Beispielsweise begründet sie den geringen Anteil leichter Gase in der Atmosphäre damit, dass diese in den Weltraum entweichen können. Andererseits verknüpft Judith diese wissenschaftsorientierten Ansätze mit teleologischen Ideen und versteht aus wissenschaftlicher Sicht metaphorische Konzepte sehr wörtlich. Ihre Angaben zur Höhe des Aufstiegs, „vielleicht 1500 oder 2000 Kilometer“, weichen deutlich von wissenschaftlichen Vorstellungen ab, die davon ausgehen, dass Luft Maximal bis zum Ende der Troposphäre aufsteigt, welche sich in Äquatornähe bis in Höhen von etwa 16 Kilometern erstreckt.

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Katja</b> (Interview 3: 22-68)	Wie weit steigt Luft auf? Ich würde sagen, bis zu einer Schicht, die wie ein Schutzmantel ist. Ich denke einfach, diese Schutzschicht, die besteht komplett nur aus Druck, also aus Druck von außen und von innen und dazwischen entsteht dann irgendwie was und das dient dann einfach als Schutz. Ich meine Steine oder so was aus dem Weltall kommen ja auch nicht so einfach hier her. Diese Schicht befindet sich in mehreren 1000 Kilometern Höhe. Die Schutzschicht sorgt dafür, dass die Luft nicht in den Weltraum entweicht. Vielleicht hängt es auch mit der Erdanziehungskraft zusammen. Außerhalb von der Erde und ihrer äußeren Schicht gibt es keine Schwerkraft.
<b>Lara</b> (Interview 6: 20-27, 112-115)	Vielleicht steigt Luft auch bis zum Ende der Atmosphäre auf. Das ist doch so eine Hülle, so eine Schicht um die Atmosphäre.
<b>Hannah</b> (Interview 7: 19-32, 33-45, 79, 101-122, 123-129)	Luft steigt bis zur Ozonschicht auf. (Später:) Luft steigt bis zur Atmosphäre auf, weil Luft ja überall ist.
<b>Tobias</b> (Interview 8: 11-21, 21-32, 39-46, 60-64, 211-217)	Ich denke, dass Luft nicht unendlich weit aufsteigen kann. Im Weltall hat man zum Beispiel nicht mehr so eine Atmosphäre.
<b>Rainer</b> (Interview 10: 56-112)	Luft steigt höchstens bis zum Ende der Atmosphäre auf.

**Tabelle 22:** Luft steigt bis zu sonstigen Grenzen auf oder bis sie Hindernisse überquert hat (Beispiele von Lernaussagen, Teil 3).

Auch andere Lerner gehen davon aus, dass Luft bis zu bestimmten Schichten aufsteigt. Katja artikuliert ebenfalls eine teleologische Vorstellung. Sie spricht von einem „Schutzmantel“ oder einer „Schutzschicht“, die „komplett nur aus Druck“ besteht und „als Schutz“ dient, denn sie verhindert, dass die Luft bis in den Weltraum aufsteigt. Judith belegt ihre Behauptung damit, dass „Steine oder so was aus dem Weltall“ ja auch nicht einfach auf die Erdoberfläche einschlagen, sondern eben von dieser Schicht irgendwie aufgehalten werden. Einen Einfluss der Erdanziehungskraft schließt sie nicht aus, geht jedoch nicht weiter darauf ein. Alle Lerner betrachten das aus wissenschaftlicher Sicht metaphorische Konzept `Die Atmosphäre besteht aus übereinander liegenden Bestandteilen´ sehr

wörtlich und gehen davon aus, dass die Grenzen zwischen diesen Teilen den weiteren Aufstieg der Luft verhindern. Sie sprechen von einer „Hülle“ oder „Schicht“ (Lara), der „Ozonschicht“ (Hannah) und vom „Ende der Atmosphäre“ (Rainer, Tobias). Hannah und Katrin deuten diese Grenzen in ihren Zeichnungen als Linien an (siehe Abbildung 15). Hannah betrachtet diese Schichten differenziert: Sie zeichnet auch eine geschlossene Wolkendecke, die ebenfalls verhindert, dass warme Luft weiter aufsteigt. Lebensweltlich erscheinen diese Vorstellungen plausibel und nachvollziehbar. Im Alltag kann man häufig die Erfahrung machen, dass feste Grenzen, beispielsweise Wände oder Schranken das weitere Fortbewegen in diese Richtung verhindern. Das wissenschaftliche Konzept von Auftriebs- und Gewichtskräften, die ausgeglichen sind, ist hingegen seltener nachvollziehbarer, allenfalls bei Heißluftballons, die die Höhe halten oder Fischen, die im Wasser schweben.

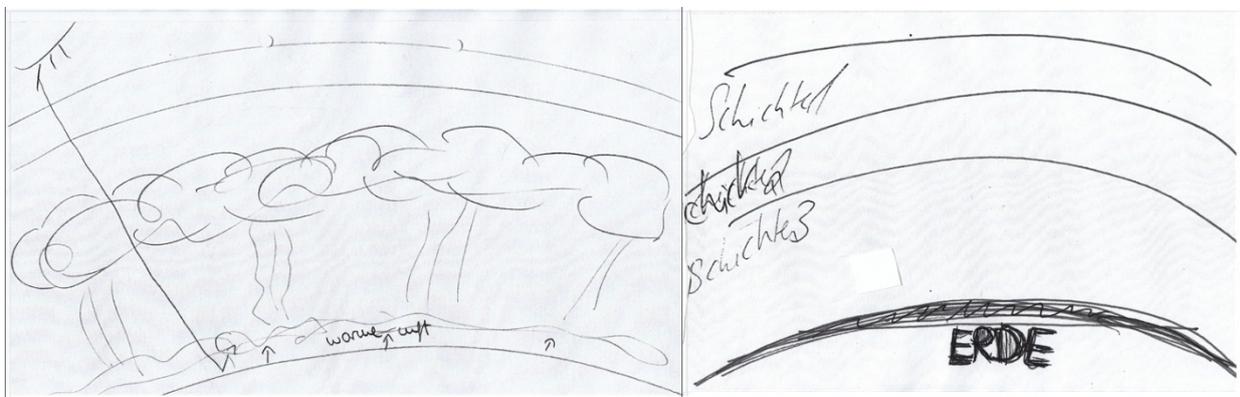


Abbildung 15: Vertikaler Aufbau der Atmosphäre (Zeichnungen von Hannah links und Katrin rechts).

### 7.1.10 Fazit: Strukturierte Aussagen zu Aufwinden

Unter der Leitfrage `Wie stellen sich die Lerner die Bedingungen vor, unter denen Luft aufsteigt?' konnten insgesamt drei Typen von Vorstellungen rekonstruiert werden: (1) Luft steigt unter der Bedingung auf, dass sie warm ist. (2) Luft steigt unter der Bedingung auf, dass sie wärmer als etwas ist. (3) Luft steigt unter der Bedingung auf, dass etwas anderes sie dazu bringt.

Typ (Nr.)	Lerner (Anmerkung)	Strukturierte Aussagen (verwendete Schema, sofern relevant)	Erfahrungen (e), Vergleiche (v), Metaphern (m)
Luft steigt unter der Bedingung auf, dass sie warm ist. (1)	Kerstin, Verena, Rita, Sophie, Hannah, Jan	Luft steigt auf unter der Bedingung, dass sie warm ist.	„schwere Sachen gehen runter“ (e,m), wie bei Heißluftballon (v)
	Verena, Jan	Warme Luft ist leicht und hat eine geringe Dichte. (Teil-Ganzes-Schema)	Atemschwierigkeiten im hohen Gebirge als Folge von weniger Luftmolekülen (e)
	Sophie	Die Dichte von Luft ist immer gleich.	
	Kerstin (widersprüchlich, s.o.)	Warme Luft ist schwer. Die Moleküle sind enger beieinander. (Teil-Ganzes-Schema)	

Tabelle 23: Luft steigt unter der Bedingung auf, dass sie warm ist (strukturierte Lernaussagen).

Lerner, die die Vorstellung vom Typ 1, artikulieren, betrachten aufsteigende Luft als etwas Absolutes. Die Aussage, dass warme Luft aufsteigt, weil sie leicht ist, erinnert an historische, ptolemäische Vorstellungen von leichten Elementen, die ihrer natürlichen Sphäre zustreben. Die Lerner verwenden

nicht das aus wissenschaftlicher Sicht angemessene Behälter-Schema, sondern beschreiben lediglich Moleküle als Teile eines Ganzen, nämlich der Luft. Sie entwickeln den Begriff 'Luft' nicht metaphorisch weiter und bringen nur wenige Vergleiche oder Belege für ihre Behauptungen.

Typ (Nr.)	Lerner (Anmerkung)	Strukturierte Aussagen (verwendete Schema, sofern relevant)	Erfahrungen (e), Vergleiche (v), Metaphern (m)
Luft steigt unter der Bedingung auf, dass sie wärmer oder leichter als etwas ist. (2)	Julian, Bernd	Damit Luft aufsteigen kann, muss die Sonne scheinen.	
	Julian, Judith, Katja	Luft erwärmt sich nicht direkt durch die Sonne, sondern über die Erdoberfläche. (Person-Schema)	
	Julian, Judith, Katja, Bernd	Luft steigt auf, wenn sie wärmer als die umgebende Luft ist. (Behälter-Schema)	Warme Luft wird „verdrängt“ (m), „legt sich über die kältere“ (m), wie Wasser und Öl (v), wie Wasser und Eis (v)
	Julian, Judith, Katja, Bernd	Warme Luft ist leicht. Sie enthält weniger Moleküle. (Behälter-Schema, Teil-Ganzes-Schema)	

**Tabelle 24:** Luft steigt unter Bedingung auf, dass sie wärmer oder leichter als etwas ist (strukturierte Lernaussagen).

Vorstellungen vom Typ 2 ziehen das Behälter-Schema heran, um Dichten und Temperaturen von aufsteigender und umgebender Luft vergleichen zu können. Sie verfügen zudem über differenzierte Vorstellungen zur Erwärmung der Luft, unterscheiden jedoch nicht explizit zwischen kurzweiliger und langweiliger Strahlung. Julian nutzt eine Personifizierung, um den Prozess des Aufsteigens der Luft zu veranschaulichen. Die von Katja und Bernd angeführten Vergleiche sind aus wissenschaftlicher Sicht nur bedingt aussagekräftig, da sich die Dichten der Stoffe nicht verändern, was bei Luft als Gas jedoch der Fall ist. Der vom Interviewer eingeführte Begriff 'Luft' wird nicht metaphorisch weiterentwickelt.

Typ (Nr.)	Lerner (Anmerkung)	Strukturierte Aussagen (verwendete Schema, sofern relevant)	Erfahrungen (e), Vergleiche (v), Metaphern (m)
Luft steigt unter der Bedingung auf, dass etwas anderes sie dazu bringt. (3)	Verena	Luft steigt auf, wenn sie auf etwas trifft. (Drücken-Schema)	
	Jana	Luft steigt durch Winde auf. (Start-Weg-Ziel-Schema, Behälter-Schema, Drücken-Schema)	
	Simon	Luft geht hoch, wenn zwei Luftströme aufeinander treffen. (Start-Weg-Ziel-Schema, Behälter-Schema, Drücken-Schema)	„Luftströme“ (m)

**Tabelle 25:** Luft steigt unter der Bedingung auf, dass etwas anderes sie dazu bringt (strukturierte Lernaussagen).

Bei Vorstellungen vom Typ 3 erscheint Luft als eine Art Entität, die auf andere Objekte wie ein Festkörper treffen kann. Die Aussagen erscheinen leider sehr undifferenziert und vage. Sie erinnern an die historische Vorstellung Francis Bacons, der davon ausgeht, dass der Passatwind durch Luftstöße initiiert wird. Die von Simon angeführte Metapher „Luftströme“ erscheint in diesem Kontext nicht sehr aussagekräftig.

Unter der Leitfrage 'Inwiefern stellen sich Lerner vor, dass sich die Luft beim Aufsteigen verändert?' konnten ebenfalls drei Typen von Vorstellungen rekonstruiert werden: (4) aufsteigende Luft kühlt ab, (5) aufsteigende Luft wird schwerer und (6) aufsteigende Luft wird leichter.

Typ (Nr.)	Lerner (Anmerkung)	Strukturierte Aussage (verwendete Schemata, sofern relevant)	Erfahrungen (e), Vergleiche (v), Metaphern (m)
Aufsteigende Luft kühlt ab. (4)	Rita, Verena	Aufsteigende Luft kühlt ab einer bestimmten Höhe durch den einsetzenden Regen ab.	Flugreisen (e)
	Julian, Björn, Elena, Jana, Simon	Aufsteigende Luft kühlt durch Energieabgabe oder -verbrauch ab. (Person-Schema)	
	Tim, Judith, Hannah, Simon	Aufsteigende Luft kühlt durch Kontakt mit kalter Luft in der Höhe ab. (Behälter-Schema)	heiße Luft wird von kalter Luft „ummantelt“ (m), wie wenn man warmes in kaltes Wasser schüttet (v)
	Julian, Amelie, Hannah	Luft in der Höhe hat eine geringere Wärmeaufnahmefähigkeit. (Person-Schema, Start-Weg-Ziel-Schema)	
	Stefan	Aufsteigende Luft kühlt ab, weil sie weniger Sauerstoff enthält.	Sauerstoff erwärmt das Blut (v)
	Bernd	Aufsteigende Luft kühlt ab, weil das Gewicht der auf ihr lastenden Luft geringer wird.	

**Tabelle 26:** Aufsteigende Luft kühlt ab (strukturierte Lernaussagen).

Hinsichtlich der Erklärungen für die Ursache der Abkühlung aufsteigender Luft sind die Vorstellungen vom Typ 4 vielfältig. Luft kühlt durch Regen ab, durch Energieabgabe oder -verbrauch, dadurch, dass sie weniger Sauerstoff enthält oder dadurch, dass das Gewicht der auflastenden Luft geringer wird. Der Widerspruch oder das Problem, dass sich die Luft in der Höhe durch aufsteigende warme Luft allmählich erwärmen müsste, wird über die Vorstellung gelöst, dass Luft eine geringe Wärmeleitfähigkeit hat. Ein Lerner geht davon aus, dass die Energie in den Weltraum ausgestrahlt wird.

Typ (Nr.)	Lerner (Anmerkung)	Strukturierte Aussage (verwendete Schemata, sofern relevant)	Erfahrungen (e), Vergleiche (v), Metaphern (m)
Aufsteigende Luft wird schwerer. (5)	Kerstin, Rita	Aufsteigende Luft wird schwerer, da sie Wasserdampf/ Feuchtigkeit aufnimmt. (Person-Schema)	
	Elena, Stefan, Jan	Aufsteigende Luft wird schwerer durch Abkühlung.	
Aufsteigende Luft wird leichter. (6)	Tim, Jana	Aufsteigende Luft wird leichter oder dünner, weil dort weniger Luft hinkommt oder diese mehr Platz hat.	
	Annika, Katja	Aufsteigende Luft wird leichter oder dünner, weil weniger Sauerstoff darin ist oder dieser verbraucht wird. (Person-Schema)	
	Lea, Judith	Aufsteigende Luft wird dünner, weil sie sich der Luft oben anpasst bzw. weil sie sonst nicht oben sein könnte.	Luft „passt sich an“ (m), wie Holz auf bzw. Steine im Wasser (v)

**Tabelle 27:** Aufsteigende Luft wird schwerer und aufsteigende Luft wird leichter (strukturierte Lernaussagen).

Vorstellungen vom Typ 5 lassen sich differenzieren in Aussagen, die davon ausgehen, dass aufsteigende Luft durch Aufnahme von Feuchtigkeit oder Wasserdampf schwerer wird und Aussagen, die abkühlender Luft die Eigenschaft zuordnen, schwerer zu werden. In beiden Fällen wird Luft als etwas Absolutes betrachtet. Vergleiche oder Metaphern nutzen die Lerner nicht. Aus wissenschaftlicher Sicht erscheint die Vorstellung vom Typ 6 angemessen: Aufsteigende Luft wird leichter. Die Erklärungen unterscheiden sich jedoch von den wissenschaftlichen Vorstellungen zu adiabatischen Prozessen.

Unter der Leitfrage 'Wie weit steigt Luft auf?' konnten drei Typen von Vorstellungen identifiziert werden: (7) Luft steigt auf, solange bestimmte Bedingungen gegeben sind, (8) Luft steigt bis zu den

Wolken oder bis es regnet auf, (9) Luft steigt bis zu sonstigen Grenzen auf oder bis sie Hindernisse überquert hat.

Typ (Nr.)	Lerner (Anmerkung)	Strukturierte Aussage (verwendete Schemata, sofern relevant)	Erfahrungen (e), Vergleiche (v), Metaphern (m)
Luft steigt auf, solange bestimmte Bedingungen gegeben sind. (7)	<b>Kerstin, Amelie, Elena, Hannah, Tim</b>	Warme Luft steigt auf, bis sie abgekühlt und schwer ist.	
	<b>Rita</b>	Luft steigt solange auf, bis sie nicht mehr abkühlen kann.	
	<b>Tim</b>	Luft steigt solange auf, wie der Wind andauert. (Drücken-Schema)	
	<b>Julian, Bernd, Emma</b>	Luft steigt auf, bis sie kälter ist als die Luft darunter bzw. die umgebende Luft. (Behälter-Schema)	

**Tabelle 28:** Luft steigt auf, solange bestimmte Bedingungen gegeben sind (strukturierte Lernaussagen).

Vorstellungen vom Typ 7 liefern insgesamt drei verschiedene Erklärungen dafür, wie lange Luft aufsteigt. Einmal wird die aufsteigende Luft absolut betrachtet: Wenn sie abkühlt, wird sie schwer und kann nicht mehr aufsteigen bzw. sie steigt auf, bis sie nicht mehr abkühlen kann. Andere Lerner betrachten die aufsteigende Luft relativ zur umgebenden Luft mit Hilfe des Behälter-Schemas, eine aus wissenschaftlicher Sicht angemessene Vorstellung. Ein Lerner greift auf das Drücken-Schema zurück und geht davon aus, dass Luft auch durch Wind aufsteigen kann, was leider nicht sehr aussagekräftig ist. Metaphern oder Vergleiche führen die Lerner nicht an.

Typ (Nr.)	Lerner (Anmerkung)	Strukturierte Aussage (aus Lernersicht wichtige Schemata)	Erfahrungen (e), Vergleiche (v), Metaphern (m)
Luft steigt bis zu den Wolken oder bis es regnet auf. (8)	<b>Rita, Björn, Sophie, Emma, Lara, Stefan</b>	Luft steigt bis zu den Wolken oder dem Kondensationsniveau auf bzw. bis es regnet. (Person-Schema)	
	<b>Emma</b>	Wolken halten die warme Luft vom weiteren Aufsteigen ab.	Wolken, damit die warme Luft nicht weggeht (teleologisch, m), geringere Wärmeausstrahlung bei nächtlicher Bewölkung (e)
	<b>Sophie, Lara</b>	Die aufgestiegene Luft sinkt mit dem Regen nach unten.	

**Tabelle 29:** Luft steigt bis zu Wolken oder bis es regnet auf (strukturierte Lernaussagen).

Vorstellungen vom Typ 8 verstehen Wolken oder einsetzenden Regen als relevant für den Aufstieg von Luft. Diese werden als eine Art Grenze oder etwas Zweckbestimmtes betrachtet. Ein aus wissenschaftlicher Sicht angemessenes Verständnis von Wasserdampf als Gas und Wasser als Flüssigkeit in der Atmosphäre liegt nicht vor. Es scheint einigen Lernern Schwierigkeiten zu bereiten, zwischen Wasserdampf bzw. Wasser und Luft zu unterscheiden.

Typ (Nr.)	Lerner (Anmerkung)	Strukturierte Aussage (verwendete Schemata, sofern relevant)	Erfahrungen (e), Vergleiche (v), Metaphern (m)
Luft steigt bis zu sonstigen Grenzen auf oder bis sie Hindernisse überquert hat. (9)	Rita, Verena	Luft steigt reliefbedingt bis zu einer bestimmten Höhe auf.	
	Judith, Katja, Lara, Hannah, Tobias, Rainer	Luft steigt bis zu einer bestimmten Grenze auf. (Behälter-Schema)	„Luftschiicht“ (m), „Ozonschiicht“ (m), „Schutzmantel“ (m), „Schutzschicht“ (m), „Hülle“ (m),
	Judith	Die Grenze ist durchlässig für leichte Gase. (Behälter-Schema)	„Ozonloch“ (m), „Schränke“ (m), „Übergänge“ (m), Gase „entfliehen“ in den Weltraum (m), andere werden „gehalten“ (m)
	Judith, Katja	Die Grenze schützt die Erde vor Steinen aus dem Weltall und sorgt dafür, dass die Luft nicht entweicht. (Behälter-Schema)	„Schutzschicht“ (m, teleologisch), „Schutzmantel“ (m, teleologisch), „Schale“, die sich um die Erde „legt“ (m, teleologisch)

**Tabelle 30:** Luft steigt bis zu sonstigen Grenzen auf oder bis sie Hindernisse überquert hat (strukturierte Lernaussagen).

Vorstellungen vom Typ 9 gehen von festen Grenzen oder Hindernissen aus, die das Aufsteigen der Luft beeinflussen. Rita und Verena betrachten aufsteigende Luft als etwas Absolutes. Der Bezug auf das Relief ermöglicht es ihnen, präziser zu beschreiben, ab wann Luft nicht mehr aufsteigt. Ihre Vorstellungen sind aus wissenschaftlicher Sicht angemessen. Die Vorstellungen von Schichten oder Schalen als Grenzen, bis zu denen Luft aufsteigt, basieren auf sehr bildhaften oder wörtlichen Auslegungen des metaphorischen Konzeptes, dass die Atmosphäre aus aufeinander liegenden Teilen besteht. Diese Ansätze sind zudem durch teleologische Ideen von einer Schutzfunktion dieser Grenzen geprägt und es werden Personifizierungen eingesetzt.

## 7.2 Aussagen zu Aufwinden in den Tropen

### 7.2.1 Die Luft in den Tropen ist wärmer – Ursachen

Lerner	Geordnete Aussagen
Rita (Interview 1: 149-189, 229-236, 388-408, 508)	In den Tropen sind dichte Sonnenstrahlen. Hier sind mehr Strahlen auf einer Fläche. Deswegen ist es dort heißer.
Kerstin (Interview 1: 150-157, 160, 164-179, 229-236, 388-393, 404-408, 470)	An den Äquator kommt immer viel Sonne hin. Die Sonne trifft direkt auf mit einer anderen Intensität als bei uns.
Julian (Interview 2: 94-162, 167-176)	Dadurch dass der Einstrahlungswinkel der Sonne steiler, rechtwinkliger ist, ist der Weg der Sonnenstrahlen durch die Atmosphäre geringer und damit der Energieverlust durch Kontakt mit Luftteilchen. Dadurch kommt mehr Energie auf die Erdoberfläche, die sich dadurch erwärmt und deren Wärme dann übertragen wird auf die Teilchen der Luft. Die direkte Erwärmung der Luft durch Sonnenstrahlung ist geringer, weil die aus so wenig Teilchen besteht. Je kleiner die Fläche ist, die beschienen wird, umso mehr erwärmt sich die Fläche dann.

**Tabelle 31:** Die Luft in den Tropen ist wärmer - Ursachen (Beispiele von Lernaussagen, Teil 1).

Mit Hilfe der Leitfrage 'Inwiefern stellen sich die Lerner vor, dass sich Aufwinde in den Tropen von denen in Deutschland unterscheiden?' konnten Vorstellungen identifiziert werden, die davon ausgehen, dass die Luft in den Tropen wärmer ist. Die Erklärungen zur Ursache dieser Wärme unterscheiden sich. Rita stellt sich Sonnenstrahlen sehr bildhaft als Entitäten vor: Diese seien in den Tropen „dichter“ und es gäbe „mehr Strahlen auf einer Fläche“. Abstrakter sind die Vorstellungen von Kerstin und Julian: Sie sprechen von „viel Sonne“ mit einer hohen „Intensität“ (Kerstin) und

„mehr Energie“ durch einen steileren „Einstrahlungswinkel“ (Julian). Letzteres begreift Julian vor allem über das Start-Weg-Ziel- und das Person-Schema: Sonnenstrahlen legen einen Weg durch die Atmosphäre zurück und verlieren dabei Energie durch Kontakt mit Luftteilchen. Umso kürzer der Weg ist, desto weniger Energie geht verloren. In den Tropen ist der Winkel sehr steil und damit der Weg der Sonnenstrahlen am kürzesten. Wissenschaftler gehen von Reflexion oder Absorption bestimmter Spektren solarer Strahlung in der Luft aus, beispielsweise der Absorption von UV-Strahlung in der Ozonschicht. Aus wissenschaftlicher Sicht ist die Einfluss des Einstrahlungswinkels auf die beschienene Fläche jedoch entscheidend für die stärkere Erwärmung in den Tropen. Julian geht hierauf nur kurz ein, erklärt jedoch nicht, warum sich eine kleinere Fläche mehr erwärmt. Eine Zeichnung hierzu fertigt er leider auch nicht an.

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Fabian</b> (Interview 9: 83-97, 100-191)	Es ist wärmer, weil die Sonne direkt von oben scheint. Wenn die Erde näher an der Sonne steht, ist es wärmer, oder nicht? Im Sommer.

**Tabelle 32:** Die Luft in den Tropen ist wärmer - Ursachen (Beispiele von Lerner aussagen, Teil 2).

Fabian geht davon aus, dass die Luft in den Tropen wärmer ist, wenn der Abstand Erde-Sonne geringer ist. Dies sei beispielsweise bei uns im Sommer der Fall. Lebensweltlich erscheint diese Vorstellung plausibel und nachvollziehbar, da man häufig die Erfahrung machen kann, dass die gefühlte Temperatur von der Entfernung zur Wärmequelle, beispielsweise einem Grill oder Ofen, abhängt. Bisherige Untersuchungen haben ähnliche Aussagen dokumentiert (siehe Kapitel 6).

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Judith</b> (Interview 3: 209-329, 563)	Am Äquator steht die Sonne meist im Zenit, in einem ganz schrägen Winkel und deswegen ist da einfach der Abstand zur Sonne geringer. Die Erde ist näher an der Sonne und das Licht muss nicht so lange wandern und Licht ist ja auch eine Form von Energie. Am Äquator ist der Abstand zur Sonne geringer als zum Beispiel in unseren Gegenden und deswegen heizt sich dort die Luft sehr schnell auf und wird sehr heiß.
<b>Tobias</b> (Interview 8: 65-140)	Am Äquator sind die Strahlen am kürzesten. Also die Sonne ist am nächsten dran. Und je weiter weg die Sonne ist, desto kälter ist es auch und dadurch ist die Temperatur geringer. Die Sonne ist halt einfach im Sommer näher an Deutschland wie im Winter. Und dadurch sind dann die Strahlen umso intensiver.
<b>Stefan</b> (Interview 8: 65-140)	Der Äquator liegt näher an der Sonne als Deutschland. Die Erde kreist um die Sonne und da die ja schräg ist, die bleibt ja so, die verändert sich ja nicht von ihrer Neigung her. Und wenn sie dann auf der anderen Seite ist, sind wir, wenn das hier die Sonne ist (Gestik: flache Hand deutet Erdachse an; Südhalbkugel unten zur Sonne geneigt), sind wir hier näher an der Sonne, aber wenn es so ist (Gestik: flache Hand deutet Erdachse an; Nordhalbkugel oben zur Sonne geneigt), sind wir ein bisschen weiter weg von der Sonne.

**Tabelle 33:** Die Luft in den Tropen ist wärmer - Ursachen (Beispiele von Lerner aussagen, Teil 3).

Differenzierter sind die Aussagen von Judith, Tobias und Stefan. Ihre Vorstellungen sind wissenschaftsorientiert, da sie versuchen das Konzept 'Einstrahlungswinkel' heranzuziehen, legen es allerdings ähnlich aus wie Julian, das heißt die Bedeutung des zurückzulegenden Weges wird überschätzt und die Rolle von Einstrahlungswinkel und beschienener Fläche nicht angemessen erfasst. Zudem gehen sie, wie Fabian, davon aus, dass die Entfernung zur Sonne als Wärmequelle eine Rolle spielt. Sie artikulieren jedoch eine differenziertere Vorstellung. So erscheint der Abstand Erde zu Sonne aufgrund der Kugelgestalt der Erde im Bereich der Tropen am geringsten (siehe Abbildung 16 links). Dies erklärt, warum die Luft in den Tropen ganzjährig erwärmt wird. Stefan geht

davon aus, dass sich der Abstand Erde zu Sonne durch die Neigung der Erdachse verändert, was ebenfalls eine Erwärmung verursacht. Die Lerner greifen auf Personifizierungen zurück, um Strahlungsvorgänge zu verstehen: So muss das Licht „nicht so lange wandern“ (Judith), kommt in „Kontakt mit Luftteilchen“ (Julian), erleidet einen „Energieverlust“ (Julian) und muss einen „Weg“ (Julian) zurücklegen. Die unterschiedliche Weglänge der Strahlen durch die Atmosphäre veranschaulicht Julian mit seiner Zeichnung (siehe Abbildung 16 rechts).

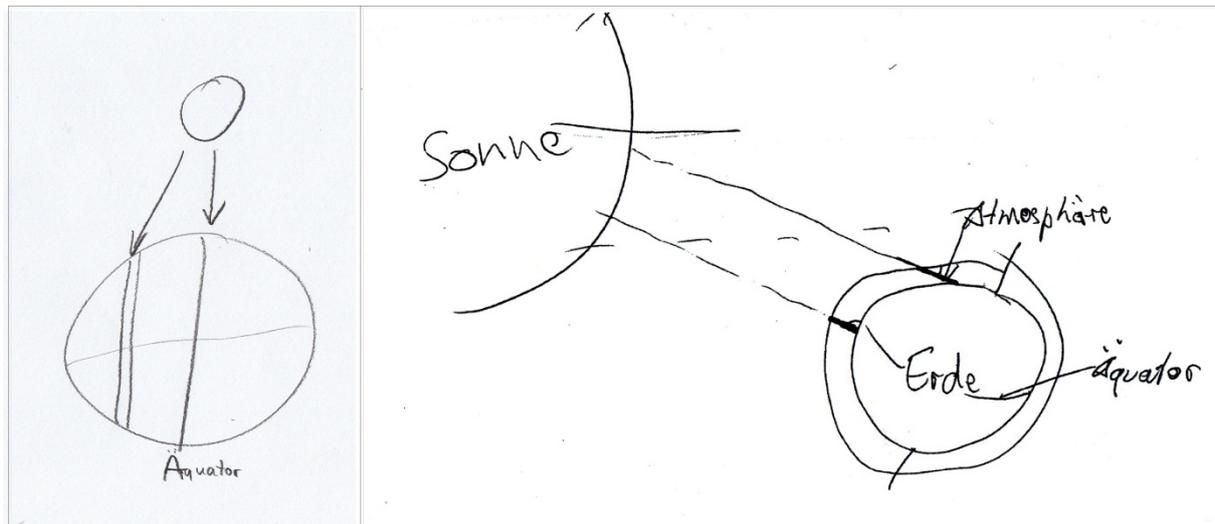


Abbildung 16: Sonne und Erde (Zeichnungen von Judith links und Julian rechts).

## 7.2.2 Die Luft in den Tropen ist wärmer – Folgen

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Verena</b> (Interview 1: 150-189, 229-236, 388-393, 404-408)	Luft steigt am Äquator höher auf als bei uns, weil sie wärmer und leichter ist. Sie steigt höher, da sie eine viel größere Ausgangstemperatur hat als Luft bei uns.
<b>Julian</b> (Interview 2: 94-162, 167-176)	Die Luft am Äquator steigt extrem hoch auf, weil sie extrem warm ist. Es dauert also viel länger, bis sie abgekühlt ist.
<b>Sophie</b> (Interview 4: 87-91, 92-102, 338-445)	Die Luft in der Nähe des Äquators steigt extrem hoch auf, weil sie halt extrem heiß ist.
<b>Annika</b> (Interview 6: 123-174)	Die Luft steigt extrem hoch auf, weil sie so warm ist.
<b>Jana</b> (Interview 7: 136-222)	Die Luft in den Tropen steigt höher auf, weil sie länger braucht, bis sie abgekühlt ist.
<b>Rainer</b> (Interview 10: 122-202)	Die tropische Luft hat eine höhere Dichte. Höhere Dichte ist wärmere Luft. Ja, aber ich bin mir sicher, dass ein Hoch warme Luft ist. Also Hoch ist warm. Und Tief ist kalte Luft. Die Luft in den Tropen steigt höher auf, weil sie wärmer ist.
<b>Bernd</b> (Interview 10: 122-202)	(Auf Rainer Bemerkung, dass höhere Dichte wärmere Luft bedeutet:) Da ist dann mehr Luft in einem Raum, die sich sozusagen aneinander reibt. (Zu Jan, der sagt, dass die Luftmoleküle weiter auseinander gehen, je wärmer es wird:) Ja, deswegen brauchen sie mehr Platz und sie wollen auseinander gehen, aber wo sollen sie hin? Die Welt kann ja nicht plötzlich noch eine Beule in der Atmosphäre haben. Verstehst du? Das staut sich einfach aus einem Raum.

Tabelle 34: Die Luft in den Tropen ist wärmer - Folgen (Beispiele von Lernaussagen, Teil 1).

Unter der Leitfrage 'Inwiefern stellen sich die Lerner vor, dass sich Aufwinde in den Tropen von denen in Deutschland unterscheiden?' konnten Vorstellungen rekonstruiert werden, die sich mit den Folgen einer größeren Erwärmung der Luft in den Tropen befassen. Einige Lerner sind der Ansicht,

dass die Luft sehr hoch aufsteigt und begründen dies mit der hohen Ausgangstemperatur (Verena, Julian, Sophie, Annika, Rainer) bzw. damit, dass sie „länger braucht, bis sie abgekühlt ist“ (Jana). Die Lerner betrachten die aufsteigende Luft dabei absolut und nicht relativ zur umgebenden Luft. Vorstellungen zur Dichte werden zwar artikuliert, jedoch nur über das Teil-Ganzes-Schema begriffen: Sie ist „dünn“ (Annika), hat eine „höhere Dichte“ (Rainer), „mehr Luft in einem Raum, die aneinander reibt“ (Bernd). Die Äußerungen bleiben wenig aussagekräftig, da die Lerner entweder gar nicht auf das Behälter-Schema zurückgreifen oder nicht das Äußere des Behälters in ihre Überlegungen miteinbeziehen, um Dichten von aufsteigender und umgebender Luft miteinander zu vergleichen. Die aus wissenschaftlicher Sicht nicht angemessenen Vorstellungen von Rainer und Bernd von einer hohen Dichte warmer Luft erscheinen aufgrund von Alltagserfahrungen plausibel. Bereits Kerstin hat eine solche Vorstellung geäußert. Bernd nennt explizit, dass Reibung Wärme erzeugt und in Analogie hierzu dichtere Luft mehr „aneinander reibt“. Rainer verbindet mit einem Hoch warme Luft. Im Hinblick auf das dynamische Wettergeschehen in den mittleren Breiten erscheint diese Äußerung aus wissenschaftlicher Sicht richtig, im Hinblick auf thermische Prozesse im Bereich der Tropen jedoch nicht. Es handelt sich also ebenfalls um eine Verallgemeinerung oder Analogiebildung, die aus wissenschaftlicher Sicht nicht zulässig ist.

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Lea</b> (Interview 5: 99-122)	In der Nähe des Äquators steigt viel mehr Luft auf als bei uns.
<b>Annika</b> (Interview 6: 123-174)	Umso schneller sich Luft erwärmt, umso schneller geht sie nach oben, weil die Dichte dünner ist.
<b>Hannah</b> (Interview 7: 136-222)	Dadurch dass es wärmer ist, steigt mehr Luft auf und kühlt langsamer ab.

**Tabelle 35:** Die Luft in den Tropen ist wärmer - Folgen (Beispiele von Lernaussagen, Teil 2).

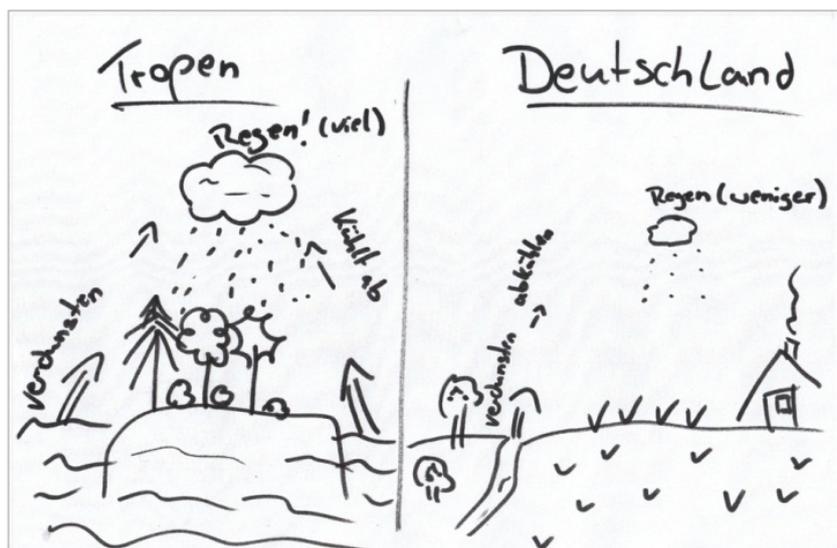
Lea und Hannah beschreiben eine weitere Folge wärmerer Luft in den Tropen: Es führt dazu, dass mehr Luft aufsteigt. Diese Äußerung könnte im Zusammenhang mit einer absoluten Betrachtungsweise aufsteigender Luft stehen: Luft steigt auf, wenn sie warm ist. In den Tropen ist mehr Luft warm, also steigt mehr Luft auf. Warum diese langsamer abkühlt, erläutert Hannah leider nicht. Annika geht davon aus, dass die Luft in den Tropen schneller aufsteigt, da sie sehr warm und ihre Dichte sehr dünn ist. Diese Äußerung ist ein Indiz für eine absolute Betrachtungsweise: Nicht das Dichte-Verhältnis zur umgebenden Luft ist relevant, sondern lediglich die Dichte der aufsteigenden Luft. Dass leichte Stoffe aufsteigen, da sie ihrer natürlichen Sphäre zustreben, ist eine ptmolemäische Vorstellung, die jedoch aufgrund zahlreicher Erfahrungen im Alltag plausibel erscheint: Schwere Objekte wie Steine fallen zu Boden, leichte Dinge wie Nebel oder Rauch steigen auf.

### 7.2.3 Die Luft in den Tropen enthält mehr Wasserdampf – Ursachen

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Rita</b> (Interview 1: 149-189, 229-236, 388-408, 508)	Die Luft in den Tropen kann mehr Wasser enthalten, da dort mehr Wasser durch den Ozean vorhanden ist. In Deutschland regnet es seltener, weil hier nur Flüsse, Nordsee und Ostsee vorhanden sind. Ursächlich für den hohen Wasserdampfgehalt der Luft ist das Verdampfen von Wasser über dem Ozean.
<b>Julian</b> (Interview 2: 94-162, 167-176)	Aufwinde in den Tropen sind feuchter, es regnet dort viel, der Boden ist nasser, dort gibt es mehr Wasser, weil die Luft wärmer ist, denn dadurch kann sie mehr Feuchtigkeit aufnehmen.
<b>Lea</b> (Interview 5: 99-122)	Wasserdampf ist ja das, was entsteht, wenn die Sonne auf den nassen Boden scheint, dann erhitzt es sich und dann geht der ganze Wasserdampf hoch. In den Tropen ist mehr Wasser überhaupt und auch mehr Sonne, also das ist ja beides viel mehr als bei uns. Also bei uns gibt es ja weniger Wasser und weniger Sonne.
<b>Elena</b> (Interview 5: 99-122, 123-180)	Es liegt daran, dass es dort wärmer ist und deswegen steigt auch mehr Wasserdampf hoch. Die tropische Luft kann mehr Wasserdampf enthalten, weil es mehr regnet, viel mehr regnet als bei uns.

**Tabelle 36:** Die Luft in den Tropen enthält mehr Wasserdampf - Ursachen (Beispiele von Lernaussagen, Teil 1).

Mit Hilfe der Leitfrage 'Inwiefern stellen sich Lerner vor, dass sich Aufwinde in den Tropen von denen in Deutschland unterscheiden?' konnten Vorstellungen rekonstruiert werden, die davon ausgehen, dass tropische Luft mehr Wasserdampf enthält. Hinsichtlich der Ursachen unterscheiden sich die Lernaussagen. Einige Lerner begründen den höheren Wasserdampfgehalt durch das Vorhandensein von mehr Wasser in Kombination mit höheren Temperaturen (Julian, Lea, Elena). Julian begreift die Fähigkeit der Luft, Wasser aufzunehmen, über das Person-Schema. Damit Wasser verdunstet, müssen ein nasser Boden (Julian, Lea) bzw. offene Wasserflächen (Rita) vorhanden sein. Rita geht davon aus, dass es in den Tropen mehr offene Wasserflächen gibt als in Deutschland. Verena veranschaulicht ihre ähnlichen Vorstellungen bildhaft und schematisch (siehe Abbildung 17): Die Tropen stellt sie inselhaft, umgeben von Wasserflächen dar, während Deutschland von einem Fließgewässer geprägt wird. Verdunstung und Niederschläge sind von der Größe der offenen Wasserflächen abhängig, was sie durch Kommentare und die Größe von Wolken in ihrer Zeichnung veranschaulicht.



**Abbildung 17:** Verdunstung, Abkühlung und Regen in den Tropen und in Deutschland (Zeichnung von Verena).

Die wissenschaftliche Modellvorstellung eines komplexen Wasserkreislaufes umfasst auch das im Boden und in der Vegetation vorhandene Wasser. Der tropischen Vegetation kommt eine wichtige Funktion in diesem System zu. Sie nimmt große Mengen an Wasser auf und gibt große Mengen durch Evaporation ab. Aus lebensweltlicher Perspektive erscheint es jedoch plausibel, ausschließlich von nassen Böden und offenen Wasserflächen auszugehen, da dieses im Gegensatz zum in der Vegetation gebundenen Wasser direkt beobachtet werden kann. Auch Elena stellt sich einen Wasserkreislauf vor, in dem mehr Wasser als in den gemäßigten Breiten im Umlauf ist.

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Sophie</b> (Interview 4: 87-91, 92-102, 338-445)	Die Aufwinde in den Tropen haben mehr Wasserdampf als bei uns, weil das Wasser, was runter regnet, ja mehr oder weniger sofort wieder verdampft und das heißt, dass dann wieder mehr Wasserdampf da ist. Und bei uns ist es ja so, dass das Wasser, was vom Regen runter fällt, nicht direkt wieder verdampft, sondern im Boden versickert oder sonst was und nicht direkt wieder in die Luft übergeht. Aber bei denen ist das so und deswegen ist da mehr Wasserdampf.
<b>Paul</b> (Interview 8: 65-140)	Die Luft in den Tropen enthält mehr Wasser, weil durch die stärkere Sonneneinstrahlung mehr Wasser verdunstet.
<b>Simon</b> (Interview 9: 83-97, 100-191)	Die tropische Luft kann mehr Wasserdampf enthalten, weil sie wärmer ist. Warme Luft trägt viel Wasser mit sich, kalte Luft eher weniger.

**Tabelle 37:** Die Luft in den Tropen enthält mehr Wasserdampf - Ursachen (Beispiele von Lernaussagen, Teil 2).

Sophie, Paul und Simon gehen davon aus, dass die Luft in den Tropen mehr Wasser enthält. Im Unterschied zu den vorherigen Lernern erwähnen sie jedoch nicht, dass es in den Tropen insgesamt mehr Wasser gibt. Den höheren Anteil des Wassers in der Atmosphäre begründen sie mit der stärkeren Sonneneinstrahlung bzw. größeren Wärme der Luft. Sophie stellt sich einen Kreislauf aus Verdunstung, Kondensation und Niederschlag vor, bei dem die Prozesse zeitlich sehr schnell ablaufen und es daher nicht zu einer Versickerung der Niederschläge im Boden kommt. Wie Elena geht sie nicht auf die Vegetation als Teil des Wasserkreislaufs ein. Paul und Simon verstehen Luft als Behälter, in dessen Inneren sich Wasserdampf befindet. Warme Luft wird zudem personifiziert, um das Verhältnis von Luft und Wasser zu veranschaulichen: Sie „trägt viel Wasser mit sich“ (Simon). Paul erwähnt den Begriff Verdunstung, Sophie spricht von Verdampfen von Wasser. Beide erläutern diese Vorgänge jedoch leider nicht weiter.

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Elena</b> (Interview 5: 99-122, 123-180)	Es könnte auch daran liegen, dass es dort ganz viele Tiefs gibt. Bei einem Tief regnet es.
<b>Katrin</b> (Interview 3: 226-235, 239-246, 266-274, 299-316)	Dort regnet es ziemlich oft und deswegen gibt es da ja auch die Feuchte irgendwie. Also ist die Luft da irgendwie anders. Weil sie mehr Wasser enthält oder weil sie auch mehr aufnehmen kann.
<b>Jan</b> (Interview 10: 122-202)	Tropische Luft kann mehr Wasserdampf enthalten als bei uns, weil sie eine geringere Dichte hat. Dadurch kann sie dann mehr Wasser aufnehmen. Je wärmer es wird, desto weiter gehen die Luftmoleküle doch auseinander. Je enger sie zusammen sind, desto kälter ist es ja. Das siehst du doch bei einem Feststoff und einem Gas. Ja vielleicht hat es dann mehr Platz für Wasserdampf zwischen den Molekülen.

**Tabelle 38:** Die Luft in den Tropen enthält mehr Wasserdampf - Ursachen (Beispiele von Lerner aussagen, Teil 3).

Lerner gehen zudem davon aus, dass die Luft in den Tropen irgendwie anders ist und daher mehr Wasserdampf enthält. Elena hält es für möglich, dass die Luft dort mehr Tiefs bildet. Mit einem Tief verbindet sie Regen. Aus wissenschaftlicher Sicht besteht hier allenfalls ein indirekter Zusammenhang. Im Bereich der ITCZ bildet sich ein thermisches Tiefdruckgebiet aus. Elenas Lebenswelt wird durch dynamische Tiefdruckgebiete mit Kalt- und Warmfronten geprägt. Katrin und Jan begreifen die Aufnahmefähigkeit der Luft mit Wasserdampf über das Person-Schema. Während Katrin die Ursache des erhöhten Wasserdampfgehaltes unter Anwendung des Behälter-Schemas, „weil sie mehr Wasser enthält“, nicht näher erfassen kann, greift Jan auf das Teil-Ganzes-Schema zurück und erklärt, dass Wassermoleküle bei hohen Temperaturen mehr Platz zwischen Luftmolekülen haben, warme Luft daher mehr Wasserdampf enthalten kann. Aus wissenschaftlicher Sicht ist diese Vorstellung, die Ideen der kinetischen Gastheorie aufgreift, unpräzise. Entscheidend ist nicht der Platz, sondern die Bewegungsenergie der Teilchen.

#### 7.2.4 Die Luft in den Tropen enthält mehr Wasserdampf – Folgen

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Julian</b> (Interview 2: 94-162, 167-176)	Wasserdampfhaltige Luft würde schneller aufsteigen, wenn sie wärmer wäre als nicht-wasserdampfhaltige. Sie ist nicht unbedingt schwerer. Es kommt auf das Gewicht von Wasserdampf im Verhältnis zum Gewicht der anderen Gase der Luft an. Wenn man Wasser verdampft, geht der Wasserdampf nach oben, also ist er schon mal leichter wie die andere Luft.

**Tabelle 39:** Die Luft in den Tropen enthält mehr Wasserdampf - Folgen (Beispiele von Lerner aussagen, Teil 1).

Julian geht davon aus, dass Wasserdampf leichter als Luft ist. Er begründet dies damit, dass dieser nach oben geht. Womöglich bezieht er sich hierbei auf Erfahrungen beim Kochen, bei denen man aufsteigenden Dunst beobachten kann. Dass es sich hierbei um bereits kondensiertes Wasser in Form von winzigen Tröpfchen handelt, könnte Julian nicht klar sein. Eine Folge von mehr Wasserdampf in der Luft sei, dass diese schneller aufsteige. Dies begründet er jedoch nicht mit dem Gewicht des Wasserdampfes, sondern ausschließlich mit der Temperatur der Luft. Es handelt sich also um eine monokausale Erklärung.

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Judith</b> (Interview 3: 209-329, 563)	Wasserdampfhaltige Luft ist schwerer als nicht-wasserdampfhaltige, weil doch mehr Wasser dabei ist. Nebel bleibt ja auch unten. Nebel ist schwer. Ich denke nicht, dass wasserdampfhaltige Luft schneller aufsteigt als nicht-wasserdampfhaltige.
<b>Katja</b> (Interview 3: 239-246, 247-265, 276-298, 299-316)	In den Tropen ist mehr Feuchtigkeitsgehalt in der Luft. Ich würde sagen, da ist irgendwie mehr Druck. Die Luft ist schwerer. Ich meine, man kann ja den Wasserdampf fast einatmen. Aber dass die wasserdampfhaltige Luft schneller aufsteigt, würde ich jetzt nicht sagen.
<b>Lea</b> (Interview 5: 99-122)	Wenn die Teilchen schwerer sind, dann brauchen sie ja auch viel länger, bis sie da hoch kommen.
<b>Lara</b> (Interview 6: 123-174)	Aufgrund der hohen Luftfeuchtigkeit ist es schwül. Wasserdampfhaltige Luft steigt jedoch langsamer auf, weil die Luft so schwerer ist als nicht-wasserdampfhaltige.
<b>Jan</b> (Interview 10: 122-202)	Durch das Wasser hat sie dann eine höhere Dichte.

**Tabelle 40:** Die Luft in den Tropen enthält mehr Wasserdampf - Folgen (Beispiele von Lernaussagen, Teil 2).

Andere Lerner gehen davon aus, dass Wasserdampf Luft schwer macht: „(...) weil doch mehr Wasser dabei ist“ (Judith), „mehr Feuchtigkeitsgehalt in der Luft“ (Katja), „die Teilchen schwerer sind“ (Lea). Diese Vorstellung wurde bereits in früheren Untersuchungen erhoben (siehe Kapitel 6). Judith, Katja und Lara begreifen wasserdampfhaltige Luft über das Behälter-Schema: Dieser füllt sich mit Wasser, wird dadurch schwerer und leert sich schließlich. Im Alltag lässt sich häufig die Erfahrung machen, dass Objekte wie Gießkannen beispielsweise schwerer werden, wenn sie mit Wasser gefüllt werden, während sie zuvor vermeintlich nichts enthalten haben. Dass auch Luft ein Gewicht hat, ist nur bedingt erfahrbar. Katja entwickelt zudem die Vorstellung, dass Wasserdampf einen Druck erzeuge und dies spürbar sei: „Ich meine, man kann ja den Wasserdampf fast einatmen“. Lea geht davon aus, dass die Wasserteilchen schwerer sind. Jan nimmt an, dass wasserdampfhaltige Luft eine höhere Dichte hat. Er schlussfolgert also deduktiv, ausgehend von der Regel, dass die Dichte bestimmt, wie schwer die Luft ist. Wissenschaftler gehen davon aus, dass die gasförmigen Wassermoleküle leichter als die sonstigen Moleküle der Luft sind. Die Lerner schlussfolgern, dass wasserdampfhaltige Luft langsamer aufsteigt und begründen dies mit dem höheren Gewicht dieser Luft (Judith, Katja, Lea, Lara). Judith belegt ihre Vorstellung mit Beobachtungen von Nebel, der schwer sei und nicht aufsteige.

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Sophie</b> (Interview 4: 87-91, 92-102, 338-445)	Die wasserdampfhaltige Luft steigt schneller auf, weil sie wärmer ist. Sie ist wärmer und an Wasserdampf kann man sich ja auch verbrennen. Wenn du zum Beispiel Nudeln kochst und du hast einen heißen Topf und dann hältst du deine Hand drüber und dann verbrennst du dich. Das habe ich schon miterlebt.
<b>Jan</b> (Interview 10: 122-202)	Durch das Wasser hat sie dann eine höhere Dichte. Aufgrund der hohen Luftfeuchtigkeit erwärmt sich die Luft besser. Wasser erwärmt sich besser als Luft. Dadurch steigt sie dann schneller auf. Außerdem steigt sie höher auf, weil sie langsamer abkühlt. Es sind ja nicht nur die Luftmoleküle da, sondern auch noch die Wassermoleküle, die Wärme aufnehmen können.

**Tabelle 41:** Die Luft in den Tropen enthält mehr Wasserdampf - Folgen (Beispiele von Lernaussagen, Teil 3).

Nicht alle Lerner, die davon ausgehen, dass Wasserdampf Luft schwer macht, schlussfolgern auch, dass diese langsamer aufsteigt. Sophie und Jan weisen darauf hin, dass wasserdampfhaltige Luft in den Tropen wärmer sei und daher schneller aufsteige. Begründet wird dies einmal mit lebensweltlichen Erfahrungen mit heißem Wasserdampf beim Nudelkochen, an dem man sich verbrennen kann (Sophie) und zum anderen mit der Vorstellung, dass es mehr Teilchen gibt, Luft-

und Wassermoleküle, die Wärme aufnehmen können (Jan). Letzteres begreift Jan u. a. über das Person-Schema.

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Julian</b> (Interview 2: 94-162, 167-176)	Der ganze Wasserdampf wird beim Aufstieg aus der Luft rausgeschwemmt. Die trockene Luft kühlt dann langsamer ab als die wasserdampfhaltige.
<b>Fabian</b> (Interview 9: 83-97, 100-191)	Die wasserdampfhaltige Luft kühlt jedoch auch schneller ab, denn wenn man schwitzt, kühlt man ja auch schneller ab, als wenn man trockene Haut hat.

**Tabelle 42:** Die Luft in den Tropen enthält mehr Wasserdampf - Folgen (Beispiele von Lernaussagen, Teil 4).

Julian und Fabian nehmen an, dass wasserdampfhaltige aufsteigende Luft schneller abkühlt als nicht-wasserdampfhaltige. Während Julian dies leider nicht begründet, belegt Fabian seine Behauptung mit der Alltagserfahrung, dass man beim Schwitzen eine Abkühlung auf der Haut verspürt. In Analogie hierzu nimmt er an, dass auch aufsteigende, wasserdampfhaltige Luft entsprechend abkühle. Aus wissenschaftlicher Sicht erklärt sich der abkühlende Effekt des Schwitzens durch Verdunstungskälte. Bei aufsteigender Luft hingegen finden feuchtadiabatische Prozesse statt. Wasser kondensiert also und es wird entsprechende Wärme freigesetzt. Julian nutzt die Metapher des 'Rauschwemmens'. Luft erscheint also als Schwamm, der Wasser enthält. Die Metapher veranschaulicht das Verhältnis von Luft und kondensiertem Wasser, besitzt jedoch keine Aussagekraft hinsichtlich des gasförmigen Wasserdampfs.

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Katja</b> (Interview 3: 239-246, 247-265, 276-316)	Aufsteigende wasserdampfhaltige Luft kühlt langsamer ab als trockene, weil Wasser länger braucht, um sich aufzuwärmen, dieses jedoch die Wärme auch länger speichert, was man zum Beispiel am Schwimmbad oder bei Wasser im Kochtopf erleben kann.
<b>Lea</b> (Interview 5: 99-122)	Die aufsteigende Luft kühlt langsamer ab, weil die Teilchen, die die Energie wegnehmen, die haben ja auch viel länger zu tun, wenn es mehr Energie gibt.
<b>Lara</b> (Interview 6: 123-174)	Trockene aufsteigende Luft kühlt schneller ab, weil da nicht noch der Wasserdampf weggehen muss. Weil so viel Wasserdampf in der Luft ist, kommt es zu heftigen, täglichen Niederschlägen. Wenn die aufsteigt und langsam abkühlt, bleibt der Wasserdampf in den Wolken hängen und wenn da zu viel Wasserdampf ist, dann regnet es.
<b>Tobias</b> (Interview 8: 65-140)	Weil der Wasserdampf sehr warm ist, dauert es länger, bis die aufsteigende, wasserdampfhaltige Luft abgekühlt ist. In den Tropen gibt es eine siebenstündige Sonnenzeit, in der total die Sonne scheint und sich die Regenwolken mit Wasser füllen. Darauf folgt eine dreistündige Regenzeit.
<b>Rainer</b> (Interview 10: 122-202)	Aufsteigende wasserdampfhaltige Luft kühlt langsamer ab als trockene, da Wasserdampf Wolken entstehen lässt und diese die Wärme wieder erhöhen.

**Tabelle 43:** Die Luft in den Tropen enthält mehr Wasserdampf - Folgen (Beispiele von Lernaussagen, Teil 5).

Einige Lerner gehen von der aus wissenschaftlicher Sicht angemessenen Vorstellung aus, dass wasserdampfhaltige Luft unter bestimmten Bedingungen langsamer abkühlt, argumentieren jedoch anders als die Wissenschaftler. Katja begründet ihre Behauptung damit, dass Wasser Wärme besser speichern kann. Ihre Vorstellung basiert auf einer Analogiebildung: Wasser in flüssiger Form, sie belegt dies an den Beispielen Schwimmbad und Kochtopf, speichert Wärme sehr gut. Die Schülerin überträgt diese Eigenschaften auf Wasser im gasförmigen Zustand. Lea versteht die Luft- oder Wasserteilchen über das Person-Schema, sie brauchen Energie, und das Behälter-Schema, sie sind

mit Energie gefüllt, die weggenommen werden muss. Wasserdampfhaltige Luft hat mehr Energie, sodass es länger dauert, bis diese entfernt ist. Letzteres geschieht durch andere Teilchen, die also personifiziert dargestellt werden. Lara artikuliert eine ähnliche Vorstellung wie Lea. Sie geht davon aus, dass wasserdampfhaltige Luft langsamer abkühlt, da vorher der Wasserdampf „weggehen muss“. Sie stellt sich diesen Prozess sehr bildlich vor: Er könne in den Wolken hängen bleiben. Regen setzt ein, „wenn da zu viel Wasserdampf ist“. Tobias artikuliert eine ähnliche Vorstellung von Regenwolken, die sich mit Wasser „füllen“. Die Äußerungen erinnern an einen überlaufenden Behälter und ähneln den bereits beschriebenen Vorstellungen zur Niederschlagsbildung. Er beschreibt zudem eine modellhafte Vorstellung von Zenitalregen. Inwiefern ihm klar ist, dass er eine schematische, vereinfachte Modellvorstellung beschreibt, lässt sich leider nicht rekonstruieren. Das von Wissenschaftlern verwendete metaphorische Konzept 'Wolken sind feste Körper' wird von Lara sehr wörtlich verstanden. Rainer begründet das langsamere Abkühlen wasserdampfhaltiger Luft damit, dass sich Wolken bilden. Im Alltag findet diese Vorstellung Bestätigung. So ist die nächtliche Abkühlung bei Bewölkung geringer. Aus wissenschaftlicher Sicht hat dies jedoch nichts mit dem eigentlichen Prozess der Abkühlung aufsteigender Luft zu tun.

### 7.2.5 Fazit: Strukturierte Aussagen zu Aufwinden in den Tropen

Typ (Nr.)	Lerner (Anmerkung)	Strukturierte Aussagen (verwendete Schema, sofern relevant)	Erfahrungen (e), Metaphern (m), Vergleiche (v)
Die Luft in den Tropen ist wärmer – Ursachen. (10)	Rita, Kerstin, Julian	Die Luft in den Tropen ist wärmer, weil dort dichtere Sonnenstrahlen, mehr Strahlen pro Fläche, mehr Energie oder viel Sonne mit einer hohen Intensität ist. (Start-Weg-Ziel)	
	Fabian	Ursächlich hierfür ist der geringere Abstand zwischen Erde und Sonne im Sommer. (Start-Weg-Ziel-Schema)	
	Judith, Jana, Tobias, Stefan	Ursächlich hierfür ist der geringere Abstand zwischen Äquator/Tropen und Sonne aufgrund der Kugelgestalt der Erde oder der Neigung der Erdachse. (Start-Weg-Ziel-Schema)	
	Julian, Judith, Tobias, Stefan	Durch einen steilen Einstrahlungswinkel ist der Weg der Strahlen durch die Atmosphäre kürzer und die Strahlung verliert weniger Energie. (Start-Weg-Ziel-Schema, Person-Schema)	Energie verlieren durch Kontakt mit Luftteilen (m), einen Weg gehen (m), Licht muss lange „wandern“ (m)

**Tabelle 44:** Die Luft in den Tropen ist wärmer - Ursachen (strukturierte Lernerassagen).

Mit Hilfe der Leitfrage 'Inwiefern stellen sich Lerner vor, dass sich Aufwinde in den Tropen von denen in Deutschland unterscheiden?' konnten Vorstellungen rekonstruiert werden, die davon ausgehen, dass die Luft in den Tropen wärmer ist. Hinsichtlich der Ursachen gibt es unterschiedliche Erklärungen: Der Abstand Erde zu Sonne ist zu bestimmten Zeitpunkten kürzer, aufgrund der Kugelgestalt der Erde im Bereich der Tropen geringer oder die Distanz verändert sich durch die Neigung der Erdachse. Insgesamt wird die Entfernung zur Wärmequelle als ausschlaggebend

betrachtet, eine Annahme, die sich lebensweltlich häufig bestätigen lässt. Einige Lerner gehen auf den Einstrahlungswinkel der Sonne ein, fokussieren jedoch den dadurch bedingten Weg der Strahlung durch die Atmosphäre. Das Start-Weg-Ziel-Schema spielt eine wichtige Rolle in den Vorstellungen der Lerner. Ein längerer Weg durch die Atmosphäre bedeutet Abschwächung der Strahlung der Sonne, was über das Person-Schema verstanden wird. Die Strahlung wird zudem über Personifizierungen veranschaulicht.

Typ (Nr.)	Lerner (Anmerkung)	Strukturierte Aussage (verwendete Schema, sofern relevant)	Erfahrungen (e), Metaphern (m), Vergleiche (v)
Die Luft in den Tropen ist wärmer – Folgen. (11)	<b>Verena, Julian, Sophie, Annika, Jana, Fabian, Bernd, Rainer</b>	Die Luft steigt höher auf. (Teil-Ganzes-Schema, Start-Weg-Ziel-Schema)	Hoch ist warm (e), Reibung erzeugt Wärme (v)
	<b>Lea, Hannah</b>	Es steigt mehr Luft auf. (Teil-Ganzes-Schema)	
	<b>Annika</b>	Die Luft steigt schneller auf. (Teil-Ganzes-Schema)	

**Tabelle 45:** Die Luft in den Tropen ist wärmer - Folgen (strukturierte Lernaussagen).

Vorstellungen vom Typ 11, ebenfalls mit Hilfe der Leitfrage 'Inwiefern stellen sich Lerner vor, dass sich Aufwinde in den Tropen von denen in Deutschland unterscheiden?' entwickelt, beschäftigen sich mit den Folgen wärmerer Luft in den Tropen. Einige Lerner gehen davon aus, dass die Luft höher aufsteigt. Sie begründen dies mit der geringeren Dichte oder höheren Ausgangstemperatur. Die Vorstellungen von Rainer und Bernd enthalten einen Widerspruch, den sie nicht erkennen: Sie gehen davon aus, dass die tropische, warme Luft eine hohe Dichte hat. Die Lerner verwenden nicht das Behälter-Schema, betrachten die aufsteigende Luft also nicht relativ zur umgebenden Luft, sondern absolut. Lediglich das Teil-Ganzes-Schema wird herangezogen. Rainer verbindet mit einem Hoch warme Luft. Bernd stellt einen Bezug zu durch Reibung erzeugter Wärme her. Lea geht davon aus, dass mehr Luft aufsteigt, da größere Luftmengen erwärmt werden. Annika verbindet die Geschwindigkeit des Aufstiegs mit der der Erwärmung.

Typ (Nr.)	Lerner (Anmerkung)	Strukturierte Aussage (verwendete Schema, sofern relevant)	Erfahrungen (e), Metaphern (m), Vergleiche (v)
Die Luft in den Tropen enthält mehr Wasserdampf – Ursachen. (12)	<b>Julian, Lea, Elena</b>	Es gibt mehr Wasser und mehr offene Wasserflächen.	
	<b>Sophie, Paul, Simon</b>	Es gibt mehr Wasser in der Atmosphäre, weil die Luft wärmer ist. (Person-Schema)	Warme Luft „trägt“ viel Wasser mit sich (m)
	<b>Jan</b>	Weil die Luft wärmer ist, hat sie mehr Platz zwischen den Molekülen für Wasserdampf. (Teil-Ganzes-Schema)	
	<b>Katrin</b>	Die Luft ist dort irgendwie anders.	
	<b>Sophie</b>	Aufgrund der starken Sonneneinstrahlung befindet sich Wasser in einem Kreislauf von Regnen und sofortigem Verdunsten.	
	<b>Elena</b>	Es gibt dort viele Tiefs, daher regnet es dort mehr.	

**Tabelle 46:** Die Luft in den Tropen enthält mehr Wasserdampf - Ursachen (strukturierte Lernaussagen).

Unter der Leitfrage 'Inwiefern stellen sich Lerner vor, dass sich Aufwinde in den Tropen von denen in Deutschland unterscheiden?' konnte ein Typ von Vorstellungen herausgearbeitet werden, der davon ausgeht, dass die Luft mehr Wasserdampf enthält und der sich mit den Ursachen beschäftigt. In

diesem Zusammenhang artikulieren einige Lerner ihre Vorstellungen zum Wasserkreislauf. So sei in den Tropen insgesamt mehr Wasser im Umlauf. Prozesse von Verdunstung, Kondensation und Niederschlag seien dort viel intensiver. Es sei mehr Wasser in der Atmosphäre aufgrund höherer Lufttemperaturen. Jan greift auf das Teil-Ganzes-Schema zurück und beschreibt so Ideen der kinetischen Gastheorie, jedoch unvollständig. Katrin geht davon aus, dass in den Tropen eine andere Art von Luft vorzufinden sei. Elena stellt in Analogie zum dynamischen Wettergeschehen, welches Gegenstand des alltäglichen Wetterberichtes ist, eine Verbindung von Tief und Regen her, ohne diese jedoch weiter zu erläutern.

Typ (Nr.)	Lerner (Anmerkung)	Strukturierte Aussagen (aus Lernersicht zentrale Schema)	Erfahrungen (e), Metaphern (m), Vergleiche (v)
Die Luft in den Tropen enthält mehr Wasserdampf – Folgen. (13)	Julian	Wasserdampf könnte leichter als Luft sein.	beim Kochen aufsteigender „Wasserdampf“ (e), „rausschwimmen“ von Wasser aus der Luft (m)
	Judith, Katja, Lea, Lara, Jan	Wasser macht Luft schwer. (Behälter-Schema, Person-Schema, Teil-Ganzes-Schema)	mehr Wasser dabei (m), schwere Teilchen (m)
	Lara, Tobias	Der Wasserdampf sammelt sich oben zu einer Wolke, aus der es regnet, wenn sie gefüllt bzw. zu schwer geworden ist. (Behälter-Schema)	„Wasserdampf bleibt in den Wolken hängen“ (m), „Regenwolken füllen sich mit Wasser“ (m)
	Judith, Katja, Lara	Wasserdampfhaltigere Luft steigt langsamer auf, weil sie schwerer ist.	
	Julian, Sophie, Jan	Wasserdampfhaltigere Luft steigt schneller auf, weil sie warm ist.	beim Kochen aufsteigender „Wasserdampf“ (m)
	Jan	Wasser erwärmt sich besser als Luft, weil es eine höhere Dichte hat. (Teil-Ganzes-Schema)	
	Katja, Jan	Wasserdampfhaltigere Luft kühlt beim Aufsteigen langsamer ab, weil die Wärme besser gespeichert wird. (Person-Schema)	Kochen (e), Schwimmbad (e), kann Wärme besser „speichern“ (m),
	Fabian	Wasserdampfhaltigere Luft kühlt beim Aufsteigen schneller ab, weil man schneller auskühlt, wenn man schwitzt.	kühlende Wirkung des Schwitzens (e)

**Tabelle 47:** Die Luft in den Tropen enthält mehr Wasserdampf - Folgen (strukturierte Lernaussagen).

Vorstellungen vom Typ 12, ebenfalls mit Hilfe der Leitfrage 'Inwiefern stellen sich Lerner vor, dass sich Aufwinde in den Tropen von denen in Deutschland unterscheiden?' entwickelt, beschäftigen sich mit den Folgen des höheren Wasserdampfgehaltes der Luft in den Tropen. Zwei gegensätzliche Positionen wurden herausgearbeitet: Wasserdampfhaltige Luft ist leichter als nicht-wasserdampfhaltige bzw. sie ist schwerer. Begründet wird letztere Vorstellung durch ein Mehr-an-etwas in der Luft bzw. durch schwerere Wasserteilchen. Judith, Katja und Lara schlussfolgern, dass diese Luft aufgrund ihrer Schwere langsamer aufsteige. Julian, Sophie und Jan gehen davon aus, dass sie schneller aufsteigt, da sie wärmer ist. Hinsichtlich der Frage, ob die aufsteigende Luft langsamer oder schneller abkühle, gibt es ebenfalls konträre Vorstellungen: Einige Lerner gehen davon aus, dass aufsteigende tropische Luft langsam abkühle, da sie dichter ist bzw. Wasser Wärme gut speichere. Fabian behauptet, dass die wasserdampfhaltige Luft schneller abkühle. Die Lerner verwenden zahlreiche Alltagserfahrungen als Belege für ihre Aussagen. Interessanterweise betrachten alle Schülerinnen und Schüler die aufsteigende Luft in diesem Kontext absolut und nicht relativ zur

umgebenden Luft, wie es aus wissenschaftlicher Sicht angemessen wäre. Lara und Tobias artikulieren in diesem Zusammenhang Vorstellungen zur Regentstehung unter Verwendung des Behälter-Schemas.

### 7.3 Aussagen zu Windentstehung

#### 7.3.1 Wind entsteht durch ein Aufeinandertreffen

Unter der Leitfrage 'Welche Vorstellungen haben die Lerner zur Ursache horizontaler Luftbewegungen?' konnten Vorstellungen identifiziert werden, die Windentstehung durch ein Aufeinandertreffen zweier Entitäten erklären.

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Verena</b> (Interview 1: 252, 254, 260-264, 296-308)	Wind entsteht dort, wo warme und kalte Luft aufeinander treffen. Oben ist die Luft kalt und unten wird sie immer wärmer und wenn die kalte Luft von da oben auf die warme Luft trifft, dann wird es halt windig. Oder wenn die warme auf die kalte Luft trifft. Da, wo die Luft aufeinander trifft, ist es windig
<b>Judith</b> (Interview 3: 213-215, 330-348, 349-365, 372-404, 433-437)	Wenn heiße auf kalte Luft trifft, findet ein großer Energieaustausch statt, was Wind erzeugt.
<b>Amelie</b> (Interview 4: 103-137, 138-161)	Wind entsteht durch warme Luft und kalte Luft, die aufeinander treffen. Dann gibt es eben eine Verwirbelung. Ich denke nicht, dass Windentstehung etwas mit unterschiedlichem Luftdruck zu tun hat.
<b>Annika</b> (Interview 6: 180-264)	Wind entsteht, wenn warme und kalte Luft zusammentreffen, wenn sie sich irgendwie berühren.
<b>Hannah</b> (Interview 7: 98, 223-298)	Wind entsteht durch aufsteigende und absteigende Luft, die aneinander prallen.
<b>Stefan</b> (Interview 8: 141-194)	Wind kann auch entstehen, wenn warme, aufsteigende Luft weggetragen wird und auf kalte Luft trifft.
<b>Paul</b> (Interview 8: 141-194)	Durch das Zusammentreffen von kühler und warmer Luft entstehen Turbulenzen und die Luft weht herum, aufsteigende warme Luft und abfallende kalte verbinden sich irgendwie.

**Tabelle 48:** Wind entsteht durch ein Aufeinandertreffen (Beispiele von Lerneraussagen, Teil 1).

Einige Lerner gehen davon aus, dass Wind durch kalte und warme Luft initiiert wird. Sie begreifen diese als Objekte, die „aufeinander treffen“, „aneinander prallen“ oder „zusammentreffen“ können (Verena, Amelie, Annika, Hannah, Paul). Inwiefern sich die Lerner hier eine Art Bewegungsimpuls vorstellen, der durch das Auftreffen von einem auf den anderen Körper übertragen wird, kann leider nicht rekonstruiert werden. Sie beschreiben den Vorgang als „Energieaustausch“ (Judith), „Verwirbelung“ (Amelie), „sich irgendwie berühren“ (Annika) oder sich irgendwie „verbinden“ (Paul). Verena, Annika und Stefan erwähnen als einzige explizit eine vertikale Luftbewegung, die die unterschiedlich temperierten Luftmassen zusammenführt und so horizontalen Wind initiiert. Die übrigen Aussagen sind insofern widersprüchlich, als das sie die Bewegung von Luft als Voraussetzung für die Windentstehung betrachten. Dies scheint den Lerner jedoch nicht aufzufallen. Amelie erwähnt explizit, dass sie den Luftdruck in diesem Zusammenhang für nicht relevant hält, begründet dies jedoch leider nicht. Annika und Stefan greifen auf Personifizierungen zurück, um das Phänomen Windentstehung zu veranschaulichen: Warme Luft wird „weggetragen“ (Stefan), warme und kalte

Luft „berühren sich irgendwie“ (Annika). Aus wissenschaftlicher Sicht sind diese Metaphern wenig aussagekräftig.

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Sophie</b> (Interview 4: 103-116, 117-137, 138-145, 146-161)	Windentstehung ist ja, wenn kalte und warme Luft aufeinander treffen. Und wenn kalte Luft jetzt einen tiefen Druck hat und warme Luft einen hohen Druck und wenn die dann zusammentreffen, dann entsteht ja Wind. Also hat das auch was mit dem Druck zu tun. Weil hoher und tiefer Druck aufeinander treffen.
<b>Lara</b> (Interview 6: 180-264)	Wind entsteht dann, wenn Hochdruck- und Tiefdruckgebiete aufeinander prallen.
<b>Paul</b> (Interview 8: 141-194)	Es gibt ja immer wärmere und kühlere Luft und wenn die zwei aufeinander treffen, entsteht der Luftdruck. Stefan hat von Topfkessel gesprochen, da ist ja Luftdruck dann drin, wenn zum Beispiel Wasser drin ist, der übt ja dann auch einen Druck aus und Luftdruck würde ich sogar irgendwie mit Wind gleichsetzen. Wind hat ja auch einen Druck, oder?
<b>Rainer</b> (Interview 10: 203-268)	Ich denke, dass jetzt, wenn zwei unterschiedliche Drücke aufeinander crashen, dass da vielleicht ein mittlerer Druck aus den beiden entsteht. Oder dass die sich unterwandern.

**Tabelle 49:** Wind entsteht durch ein Aufeinandertreffen (Beispiele von Lerneraussagen, Teil 2).

Sophie entwickelt die Idee vom Aufeinandertreffen weiter. Sie betont, dass warme und kalte Luft unterschiedliche Drücke haben und diese relevant seien. Wie genau aufgrund einer Druckdifferenz Wind entsteht, erläutert sie jedoch nicht. Auch Lara und Rainer betonen, dass der Luftdruck eine Rolle spielt. Die Lerner gehen jedoch von der Vorstellung aus, dass diese unterschiedlichen Drücke „aufeinander treffen“ (Sophie, Paul), „aufeinander prallen“ (Lara) oder „aufeinander crashen“ (Rainer). Die Wortwahl erinnert an Festkörper, die miteinander kollidieren und Bewegungsimpulse von einem auf den anderen übertragen. Rainer spekuliert, dass aus diesem Zusammenstoß ein mittlerer Luftdruck resultieren könnte. Er nutzt eine Personifizierung und spricht vom „(U)nterwandern“ des Druckes. Paul geht davon aus, dass durch das Aufeinandertreffen von kalter und warmer Luft erst Luftdruck entsteht. Diese Vorstellung wurde bereits in früheren Untersuchungen erhoben (siehe Kapitel 6). Er vergleicht das Phänomen mit der aufsteigenden Luft in einem Kochtopf. Diese würde eine Art Druck ausüben, der mit dem Wind gleichzusetzen ist. Warum unterschiedlich temperierte Luft einen Druck erzeugt, kann er jedoch nicht erklären. Insgesamt fällt auf, dass die Lerner Schwierigkeiten haben, die eigentliche Ursache der horizontalen Luftbewegung zu erfassen.

### 7.3.2 Wind entsteht als Folge eines Ausgleichs

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Julian</b> (Interview 2: 202-213, 214-252)	Die Luft strömt vom Hochdruck- zum Tiefdruckgebiet, wobei diese nicht auf gleicher Höhe sein müssen. Das Hochdruckgebiet kann ja auch schräg oben und das Tiefdruckgebiet schräg unten sein. Die Luft strömt oder fließt dann auch so schräg.
<b>Judith</b> (Interview 3: 213-215, 330-365, 372-404, 433-437)	Die aufgestiegene heiße Luft in der Höhe erzeugt einen Hochdruck, sofern sie schnell aufgestiegen ist. Sie weicht zu den Seiten aus, da sie durch Tiefdruckgebiete abgelenkt wird und diese ausgleichen möchte. Zwischen Tiefdruckluft und Hochdruckluft befindet sich ganz normaler Luftdruck.

**Tabelle 50:** Wind entsteht als Folge eines Ausgleichs (Beispiele von Lerneraussagen, Teil 1).

Einige Lerner betrachten Windentstehung als Folge eines Ausgleichs. Julian und Judith gehen davon aus, dass sich Luft von einem Hochdruckgebiet zu einem Tiefdruckgebiet bewegt. Julian verwendet das metaphorische Konzept 'Wind ist fließendes Wasser': Die Luft „strömt“ oder „fließt“. Er geht

davon aus, dass hierzu ein Gefälle im wörtlichen Sinne, also ein Höhenunterschied zwischen einem Hochdruckgebiet als Quelle und einem Tiefdruckgebiet als Ziel vorhanden sein muss. Er verortet als ersteres schräg oben, letzteres schräg unten. Wissenschaftler nutzen dieses metaphorische Konzept ebenfalls. Es ermöglicht, die Bewegung der Luft zu veranschaulichen. Die eigentliche Ursache der Bewegung, die durch die Gradientkraft bestimmt wird, lässt sich hiermit jedoch nicht erfassen. Julian versteht diese Metaphern also umfassender als die Wissenschaftler. Er versucht darüber auch die Ursache der Bewegung, ein Gefälle im wörtlichen Sinne, zu begreifen. Judith versucht die Bewegung über Personifizierungen zu veranschaulichen: Luft „weicht zu den Seiten aus“, sie wird „abgelenkt“. Die eigentliche Ursache der Bewegung lässt sich aus wissenschaftlicher Sicht hiermit jedoch ebenfalls nur unzureichend erfassen.

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Lea</b> (Interview 5: 199-236, 237-273)	Die Luft mit dem Hochdruck bewegt sich zu der Luft mit dem tieferen Druck, damit es sich ausgleicht.
<b>Emma</b> (Interview 5: 199-236, 237-273)	Wenn da (Gestik: rechte Hand) niedriger Luftdruck ist und da (Gestik: linke Hand) ein höherer Luftdruck, dann tauscht sich das ja aus (Gestik: linke und rechte Hand bewegen sich gleichzeitig aufeinander zu). Und dann entsteht Wind. (Später:) Die Luft bewegt sich zum Tief dann. Warum? Temperatur gleicht sich ja auch aus. Wenn mehr Luft da ist in der Höhe, dann ist der Druck ja höher. Ja, ist ja auch bei Luftballons. Wenn man da Luft reinbläst, ist der Druck ja höher. Und dann kommt ja Luft von da nach da, weil da ja nicht so viel Luft aufsteigt. Aber die Luft geht ja nicht vom Tief zum Hoch. Es geht ja nicht die ganze Luft vom Hoch zum Tief. Es geht ja nur so viel Luft vom Hoch zum Tief, bis es sich ausgleicht.

**Tabelle 51:** Wind entsteht als Folge eines Ausgleichs (Beispiele von Lerner aussagen, Teil 2).

Während Julian und Judith davon ausgehen, dass sich die Luft vom Hochdruck- zum Tiefdruckgebiet bewegt, äußern Lea und zunächst auch Emma die Vorstellung, dass die Druckgebiete ihre Positionen verändern: „Luft mit dem Hochdruck“ bewege sich in Richtung Tief (Lea) bzw. Emmas Gestik, die andeutet, dass sich niedriger und höherer Luftdruck aufeinander zu bewegen. Die Ursache dieser Bewegung beschreibt Lea sehr vage als eine Art Zweckbestimmung: „(...) damit es sich ausgleicht“. Emma erläutert zunächst ebenfalls nicht die Ursache der Bewegung, sondern nur den Prozess: „(...) dann tauscht sich das ja aus“. Später revidiert Emma ihre Vorstellung von sich aufeinander zu bewegendem Druckgebieten und beschreibt Wind, wie Julian und Judith, als eine Bewegung der Luft von einem Hoch zu einem Tief. Nun geht sie näher auf die Ursache ein: Druckunterschiede entstehen dadurch, dass Luft unterschiedlich verteilt ist. An einigen Stellen sei „mehr Luft da“. Den Effekt vergleicht sie mit dem eines aufgeblasenen Luftballons. Durch die in ihm befindliche Luft entstehe ebenfalls ein Druck. Sie nutzt also über diesen Vergleich, wie auch die Wissenschaftler, das Behälter-Schema. Dass Druckunterschiede sich ausgleichen, begründet sie mit der sehr vagen Bemerkung: „Temperatur gleicht sich ja auch aus“. Damit könnte sie unterschiedlich temperierte Objekte andeuten, deren Temperaturen sich angleichen.

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Simon</b> (Interview 9: 192-267)	Die Luftteilchen sind durch Auf- und Abwinde ungleich verteilt. Wind entsteht aufgrund dieser ungleichen Verteilung. Die Luftteilchen fließen von da, wo viele Luftteilchen sind, nach da, wo weniger Luftteilchen sind. Man kann das mit Wasser vergleichen, das durch ein Loch fließt von da, wo mehr Wasser ist, nach da, wo weniger Wasser ist.

**Tabelle 52:** Wind entsteht als Folge eines Ausgleichs (Beispiele von Lerneraussagen, Teil 3).

Die ungleiche Verteilung von Luft beschreibt Simon genauer. Er begreift diese über das Teil-Ganzes-Schema und spricht von „viele(n) (...) und weniger Luftteilchen“. Die eigentliche Bewegung versteht er ebenfalls über das metaphorische Konzept `Wind ist fließendes Wasser`: Die Luftteilchen „fließen von da (...) nach da“. Schließlich vergleicht er den Vorgang mit Wasser, wobei er diesmal nicht die Art der Bewegung, sondern die Ursache veranschaulichen möchte: Es sei wie Wasser, „das durch ein Loch fließt von da, wo mehr Wasser ist, nach da, wo weniger Wasser ist“. Die Ursache der Bewegung des Wassers ist jedoch die aufgrund eines Gefälles wirkende Gewichtskraft. Die Dichte des Wassers ist hingegen konstant, unabhängig davon, ob es sich um „mehr“ oder „weniger“ Wasser handelt. Ähnlich wie Julian versucht Simon die Ursache der Bewegung über aus wissenschaftlicher Sicht unangemessene Vergleiche mit sich bewegendem Wasser zu begreifen.

### 7.3.3 Wind entsteht aufgrund eines Drückens oder aufgrund von Stößen

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Alina</b> (Interview 7: 223-298)	Dass aufsteigende Luft bewirken kann, dass andere Luft absinkt, bezweifle ich, da dies längere Prozesse sind, es aber auch kurze Luftstöße gibt.
<b>Hannah</b> (Interview 7: 98, 223-298)	Oder Wind entsteht durch Luftdruck. Die Wirkungsweise lässt sich mit einer Spritze vergleichen, die zusammengedrückt wird.
<b>Rainer</b> (Interview 10: 203-268)	Die aufsteigende Luft ist so der Anstoß zum Wind.
<b>Bernd</b> (Interview 10: 203-268)	Dass der Aufwind, der die Luft dann hier sozusagen so drückt, dass die sich hier in die horizontale Richtung ausdehnt.

**Tabelle 53:** Wind entsteht aufgrund eines Drückens oder aufgrund von Stößen (Beispiele von Lerneraussagen, Teil 1).

Einige Lerner verstehen Windentstehung als Folge eines Drückens oder Stoßens. Im Unterschied zu den Schülerinnen und Schülern, die ein Aufeinandertreffen von etwas als Ursache von Wind betrachten, greifen diese Lerner vor allem auf das Drücken-Schema zurück, um diesen Prozess nachvollziehbar zu machen. Sie begreifen Luft als Entität, die im wörtlichen Sinne von etwas weggedrückt wird: Es gibt kurze „Luftstöße“ (Alina), einen „Anstoß (...) zum Wind“ (Rainer), „Aufwind, der die Luft (...) so drückt“ (Bernd). Hannah vergleicht den Vorgang mit einer Spritze, die zusammengedrückt wird. Die Luft bewegt sich, weil etwas, das Ende des Kolbens, sie wegdrückt. Was diesem Ende des Kolbens in der Natur entspricht, erläutert sie nicht. Die Aussagen erinnern stark an die historische Vorstellung Francis Bacons, die der Entstehung der Passatwinde mechanistisch als eine Art Kettenreaktion erklärt: Sich erwärmende Luft dehnt sich aus, stößt andere Luft an, die wiederum andere Luft in Bewegung setzt.

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Katja</b> (Interview 3: 193-197, 201, 330-365, 372-404, 433-437)	Wenn sich Luft schnell nach oben bewegt, ist zwischen der heißen aufsteigenden Luft und der kalten umgebenden ein bestimmter Platz, etwas ist zwischen heißer und kalter Luft. Es entsteht ein Druck, vergleichbar mit dem, der entsteht, wenn man einen Schirm auf einem Fahrrad in Fahrtrichtung hält.
<b>Jana</b> (Interview 7: 223-298)	Der Luftdruck könnte irgendwie so anschwellen, immer höher werden, dass es zu einer Art Explosion kommt (Gestik: Hände deuten Luftblase an, die explodiert). Und dann gibt es halt einen Wind. Dies ist vielleicht vergleichbar mit der Erfahrung, die man macht, wenn man eine kohlenstoffhaltige Flasche, die man vorher geschüttelt hat, aufmacht und an den Mund hält. Ich glaube, so etwas ist Luftdruck. Wenn es sich dann in deinem Mund sammelt und dann so bah (Mimik: Druck im Mund steigt, schließlich Mund auf).
<b>Stefan</b> (Interview 8: 141-194)	Wind entsteht, wenn ein Druckgebiet herrscht, dass sich irgendwann ausbreitet und vorstößt. (Stimmt Tobias zu, dass Luft entsteht, wenn zu viel Druck in der Luft ist, der Luftdruck zu hoch wird.) Man kann es mit einem Topfdeckel vergleichen, auf den der Wasserdampf Druck ausübt, da er unbedingt raus will.
<b>Jan</b> (Interview 10: 203-268)	(Stimmt Bernd zu, der sagt, dass die Luft in der Höhe vom Aufwind weggedrückt wird.) Wir haben ja gesagt, dass wärmere Luft einen höheren Druck hat und das hat ja auch was mit Wärme auf jeden Fall zu tun, was dann aufsteigt. Und Luft mit höherem Druck steigt dann auf und staut sich oben und wird verdrängt.

**Tabelle 54:** Wind entsteht aufgrund eines Drückens oder aufgrund von Stößen (Beispiele von Lernaussagen, Teil 2).

Einige Lerner gehen davon aus, dass die die Luft wegdrückende Kraft erst allmählich entsteht. Ab einem bestimmten Moment ist sie groß genug, um die Luft in Bewegung zu setzen: „Es entsteht ein Druck, vergleichbar mit dem, der entsteht, wenn man einen Schirm auf einem Fahrrad in Fahrtrichtung hält“ (Katja), ein „(A)nschwellen“ und eine Art „Explosion“ (Jana), ein Ausbreiten und Vorstoßen, wenn „zu viel Druck in der Luft“ ist (Stefan), ein Druck, der entsteht, da sich etwas aufstaut (Jan). Um zu erklären, wie dieser Druck entsteht, werden zahlreiche lebensweltliche Vergleiche aufgestellt: Katja beschreibt den Luftwiderstand beim Fahrradfahren. Jana erwähnt den Effekt, den eine kohlenstoffhaltige Flüssigkeit im Mund hat. Stefan vergleicht die Entstehung des Druckes in der Luft mit dem in einem mit Wasser gefüllten und erhitzten Kochtopf. Er verwendet zudem eine Personifizierung: Der Wasserdampf im Kochtopf möchte unbedingt raus. Jan versteht die Entstehung des Druckes über das metaphorische Konzept ‘Wind ist fließendes Wasser’: Die Luft „staut sich oben auf und wird verdrängt“. All diese Vergleiche und Metaphern erklären jedoch nicht, warum die die Luft wegdrückende Kraft letztlich entsteht. Zu dieser Ursache äußern sich die Lerner nicht.

### 7.3.4 Fazit: Strukturierte Aussagen zu Windentstehung

Typ (Nr.)	Lerner (Anmerkung)	Strukturierte Aussagen (verwendete Schema, sofern relevant)	Erfahrungen (e), Metaphern (m), Vergleiche (v)
Wind entsteht durch ein Aufeinandertreffen. (14)	<b>Verena, Judith, Amelie, Annika, Hannah, Stefan, Paul</b>	Wind entsteht durch ein Aufeinandertreffen von warmer und kalter Luft. (Start-Weg-Ziel-Schema, Drücken-Schema)	warme Luft wird „weggetragen“ (m), warme und kalte Luft „berühren sich irgendwie“ (m)
	<b>Sophie, Lara, Rainer</b>	Wind entsteht durch ein Aufeinandertreffen von tiefem und hohem Druck. (Start-Weg-Ziel-Schema, Drücken-Schema)	aufeinander „crashen“, „prallen“ (m), Drücke unterwandern sich (m),
	<b>Amelie, Paul, Judith</b>	Weitere Folgen des Aufeinandertreffens sind Verwirbelungen, Turbulenzen, Entstehung von Luftdruck und Energieaustausch. (Start-Weg-Ziel-Schema, Drücken-Schema)	Luftdruckentstehung wie Druck, der bei kochendem Wasser mit geschlossenem Topfkessel entsteht (v,e)

**Tabelle 55:** Wind entsteht durch ein Aufeinandertreffen (strukturierte Lernaussagen).

Unter der Leitfrage ‘Welche Vorstellungen haben Lerner zur Ursache horizontaler Luftbewegungen?’ konnten Vorstellungen rekonstruiert werden, die ein Aufeinandertreffen von Luft oder Druck als

ursächlich für die Windentstehung ansehen. Die Lerner verwenden einige Personifizierungen und einen Vergleich mit der Alltagssituation Kochen, um dieses Aufeinandertreffen zu veranschaulichen. Ob dieses jedoch im Sinne einer Übertragung eines Bewegungsimpulses von einem Objekt zum anderen gesehen wird, bleibt unklar. Die Ursache der horizontalen Luftbewegung wird aus wissenschaftlicher Perspektive nicht angemessen erfasst. Die Widersprüchlichkeit, eine Bewegung von Luft als Ursache der Windentstehung zu betrachten, wird von den Lernern nicht erkannt.

Typ (Nr.)	Lerner (Anmerkung)	Strukturierte Aussagen (verwendete Schemata, sofern relevant)	Erfahrungen (e), Metaphern (m), Vergleiche (v)
Wind entsteht als Folge eines Ausgleichs. (15)	Julian, Judith, Simon später auch Emma	Die Luft strömt/fließt vom Hoch zum Tief. (Start-Weg-Ziel-Schema)	Luft „strömt“ (m), „fließt“ (m), wird „abgelenkt“ (m), möchte etwas ausgleichen (m), wie durch Loch fließendes Wasser (v)
	Julian, Judith	Das Hoch befindet sich in größerer Höhe als das Tief.	
	Judith	Zwischen Hoch und Tief befindet sich normaler Luftdruck.	
	Simon, Emma	Die Luftteilchen zwischen Hoch und Tief sind ungleich verteilt. (Teil-Ganzes-Schema, Behälter-Schema)	wie ungleiche Verteilung von Luft in und außerhalb eines Luftballons (v)
	Emma	Hoch und Tief bewegen sich aufeinander zu. (Start-Weg-Ziel-Schema)	„tauschen sich aus“ (m), wie Temperatúrausgleich (v)
	Lea	Die Luft mit dem Hoch bewegt sich zur Luft mit dem Tief. (Start-Weg-Ziel-Schema)	

**Tabelle 56:** Wind entsteht als Folge eines Ausgleichs (strukturierte Lernaussagen).

Andere Lerner betrachten Windentstehung als Folge eines Ausgleichs. Entweder gehen sie davon aus, dass sich Luft von einem Hochdruck- zu einem Tiefdruckgebiet bewegt oder dass sich das Druckgebiet bewegt. Um die eigentliche Ursache der Bewegung zu erfassen, werden Vergleiche angestellt: wie die ungleiche Verteilung von Luft in einem Ballon oder wie ein Temperatúraustausch. Zudem werden Personifizierungen benutzt. Julian und Simon verwenden das metaphorische Konzept 'Wind ist fließendes Wasser' oder vergleichen den Prozess mit fließendem Wasser, um die Art und die Ursache der Bewegung zu erfassen. Aus wissenschaftlicher Sicht sind die von den Lernern verwendeten Metaphern und Vergleiche wenig aussagekräftig, um die Ursache der horizontalen Luftbewegung zu erfassen.

Typ (Nr.)	Lerner (Anmerkung)	Strukturierte Aussagen (verwendete Schema, sofern relevant)	Erfahrungen (e), Metaphern (m), Vergleiche (v)
Wind entsteht aufgrund eines Drückens oder aufgrund von Stößen. (16)	Alina, Hannah, Rainer, Bernd, Jana, Stefan, Jan	Wind entsteht, weil Luft andere Luft wegdrückt. (Drücken-Schema)	„Luftstöße“ (m), Luft als „Anstoß“ zum Wind (m), wie eine Spritze, die zusammengedrückt wird (v)
	Katja, Jana, Stefan, Jan	Der Luftdruck bildet sich erst oder wird allmählich größer. (Drücken-Schema)	entstehender Druck vergleichbar mit dem, der entsteht, wenn man einen Schirm auf einem Fahrrad in Fahrtrichtung hält (v), „(A)nschwellen“ des Luftdruckes und Explosion (m), ein Druckgebiet „herrscht“ (m), breitet sich aus (m), stößt vor (m), wie eine kohlenstoffhaltige Flüssigkeit im Mund (v), wie beim Kochen (v), aufgestiegene Luft staut sich und wird verdrängt (m)

**Tabelle 57:** Wind entsteht aufgrund eines Drückens oder aufgrund von Stößen (strukturierte Lernaussagen).

Für andere Lerner ist das Drücken-Schema von zentraler Bedeutung, um Windentstehung zu verstehen. Sie interpretieren den Begriff Luftdruck sehr wörtlich und gehen davon aus, dass die Luft

irgendwie weggedrückt wird. Hierzu führen sie zahlreiche Metaphern und Vergleiche an. Aus wissenschaftlicher Sicht erscheinen diese Veranschaulichungen jedoch wenig aussagekräftig. Was die Luft letztlich wegdrückt, bleibt unklar.

## 7.4 Aussagen zum Antipassat

### 7.4.1 Die aufgestiegene Luft sinkt vor Ort wieder ab

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Kerstin</b> (Interview 1: 251, 296-308, 319-320)	Wind weht nicht auf gleichbleibender Höhe. Es findet eine Auf- und Abwärtsbewegung warmer und kalter Luft statt.
<b>Stefan</b> (Interview 8: 141-194)	Nach dem Aufstieg kühlt die Luft ab. Die abgekühlte aufgestiegene Luft bewegt sich schließlich runter.
<b>Fabian</b> (Interview 9: 192-267)	Die aufgestiegene Luft kühlt ab und geht wieder nach unten.
<b>Jonas</b> (Interview 9: 192-267)	Die Luft kühlt ab und geht wieder runter.
<b>Simon</b> (Interview 9: 192-267)	Die aufgestiegene Luft sammelt sich, es entsteht ein Hochdruckgebiet. Schließlich kühlt sie ab, weil sie Energie abgibt und sinkt seitlich wieder runter.

**Tabelle 58:** Die aufgestiegene Luft sinkt vor Ort wieder ab (Beispiele von Lernaussagen).

Unter der Leitfrage 'Welche Vorstellungen haben die Lerner dazu, was mit der aufgestiegenen Luft in den Tropen geschieht?' konnten Aussagen identifiziert werden, die davon ausgehen, dass die aufgestiegene Luft etwa vor Ort wieder absinkt. Die Lerner erwähnen dies zwar nicht explizit, deuten jedoch an, dass sie von einer Auf- und Abwärtsbewegung, nicht jedoch von einer horizontalen Luftbewegung in der Höhe ausgehen. Insbesondere Lernern, die die aufsteigende Luft absolut betrachten, dürfte es schwer fallen zu verstehen, warum sich Luft in der Höhe nicht vertikal bewegt. Um Gleichgewichtszustände zwischen der auf die Luft wirkenden Auftriebskraft und der Gewichtskraft zu verstehen, betrachten Wissenschaftler diese relativ zur umgebenden Luft. Die Lerner scheinen davon auszugehen, dass sich Luft in ständiger Bewegung befindet, entweder aufsteigt oder absinkt, je nachdem ob sie warm oder kalt ist (Kerstin, Stefan, Fabian, Jonas). Was Simon unter „seitlich“ versteht, bleibt unklar. Eine Zeichnung hierzu fertigt er leider nicht an. Simon erwähnt ein Hochdruckgebiet in der Höhe, dessen Entstehung er über das Teil-Ganzes-Schema begreift: „Die aufgestiegene Luft sammelt sich“. Dass sich hieraus eine Druckdifferenz in der horizontalen ergibt, erläutert er jedoch nicht. Stattdessen begründet er die Bewegung der Luft mit der Abkühlung. Diese versteht er über das Person-Schema als „Energieabgabe“.

### 7.4.2 Die aufgestiegene Luft sinkt allmählich, nach polwärtiger Bewegung wieder ab

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Julian</b> (Interview 2: 202-252)	Nach dem Aufstieg kühlt die Luft ab, wenn sie sich fort vom Äquator bewegt, weil die Sonne hier nicht mehr so steil auftrifft und es dort kühler ist.
<b>Jan</b> (Interview 10: 203-268)	Wir haben ja gesagt, dass wärmere Luft einen höheren Druck hat und das hat ja auch was mit Wärme auf jeden Fall zu tun, was dann aufsteigt. Und Luft mit höherem Druck steigt dann auf und staut sich oben und wird verdrängt. Dadurch geht der Wind da rüber, er weht eine Weile auf gleichbleibender Höhe und sinkt dann wieder.
<b>Bernd</b> (Interview 10: 203-268)	Der Aufwind drückt die Luft so, dass die sich hier in die horizontale Richtung ausdehnt. Nach einer Weile ist dann wieder genug Platz und da kühlt sich die weggedrückte Luft ab und sinkt runter. Wenn das vielleicht so rechts und links sozusagen abfällt, weil da ein niedrigerer Luftdruck herrscht? Also sozusagen der Luftscheitel der Erde.

**Tabelle 59:** Die aufgestiegene Luft sinkt allmählich, nach polwärtiger Bewegung wieder ab (Beispiele von Lernaussagen).

Andere Lerner gehen davon aus, dass sich die Luft in der Höhe zunächst polwärts bewegt und erst allmählich abkühlt und absinkt (Julian, Jan, Bernd). Julian begründet die Abkühlung sich horizontal bewegender Luft mit dem Einstrahlungswinkel bzw. weil es dort kühler ist. Warum sich die Luft in der Höhe bewegt, erläutert er nicht. Jan und Bernd artikulieren die Vorstellung, dass ein Impuls, das Wegdrücken der Luft durch Aufwinde, die Luft in der Höhe polwärts bewegt. Sie begreifen den Vorgang also über das Drücken-Schema. Die Lerner verwenden zahlreiche Metaphern: „Sonne trifft nicht mehr so steil auf“ (Julian), „Luftscheitel der Erde“ (Bernd), Luft „staut sich oben“, „wird verdrängt“ (Jan). Damit werden die Bewegungen der Strahlung und der Luft veranschaulicht, nicht jedoch deren Ursachen erklärt.

### 7.4.3 Die aufgestiegene Luft weht als Wind auf gleichbleibender Höhe

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Katja</b> (Interview 3: 193-197, 201, 330-365, 372-404, 433-437)	Die aufgestiegene Luft bleibt oben, kühlt sich ab und geht dann zur Seite, bis zum Süd- und Nordpol, was vielleicht auch mit Magnetismus und der Anziehungskraft von Nord und Süd zu tun hat.
<b>Judith</b> (Interview 3: 213-215, 330-365, 372-404, 433-437)	Die aufgestiegene heiße Luft in der Höhe erzeugt einen Hochdruck, sofern sie schnell aufgestiegen ist. Sie weicht zu den Seiten aus, da sie durch Tiefdruckgebiete abgelenkt wird und diese ausgleichen möchte.

**Tabelle 60:** Die aufgestiegene Luft weht als Wind auf gleichbleibender Höhe (Beispiele von Lernaussagen).

Einige Lerner beschreiben eine horizontale Bewegung der Luft in der Höhe, erwähnen jedoch nicht explizit, dass die aufgestiegene Luft wieder absinkt. Katja stellt sich eine Bewegung bis zum Süd- und Nordpol vor. Ursächlich für diese Höhenwinde seien Magnetismus oder Anziehungskräfte von Nord und Süd, die sie jedoch nicht näher beschreibt. Katja erwähnt, dass sich die Luft abkühlt, aber nicht, dass sie absinkt. Judith erfasst die Ursache der Bewegung der Luft in der Höhe mit Hilfe von Personifizierungen: Die Luft „weicht zu den Seiten aus“, wird „abgelenkt“ und möchte etwas „ausgleichen“. Die Entstehung eines Hochdruckgebietes begreift sie über das Person-Schema: Luft „erzeugt einen Hochdruck“. Aus wissenschaftlicher Sicht sind diese Metaphern jedoch wenig aussagekräftig. Judith zieht auch die Vorstellung von Wind als Ausgleich heran: Luft bewege sich vom Hoch zum Tief. Auf die genaue Ursache des Vorgangs geht sie jedoch auch hier nicht ein.

#### 7.4.4 Die sich in der Höhe bewegende Luft ändert ihre Richtung, weil sie auf etwas stößt oder von etwas angezogen wird

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Fabian</b> (Interview 9: 192-267)	Sich bewegende Luft ändert ihre Richtung, wenn zwei aufeinandertreffen (Gestik: Armbewegung deutet konvergierende Luftmassen an), dass die sich sozusagen aus dem Weg gehen.
<b>Simon</b> (Interview 9: 192-267)	Oder da gibt es bestimmt noch andere Luftströme. Ich meine, dass andere Luftströme diese Luft vielleicht auch noch beeinflussen.

**Tabelle 61:** Die sich in der Höhe bewegendes Luft ändert ihre Richtung, weil sie auf etwas stößt oder von etwas angezogen wird (Beispiele von Lerner aussagen, Teil 1).

Einige Lerner gehen davon aus, dass die sich in der Höhe bewegende Luft ihre Richtung ändert, weil sie auf etwas stößt oder von etwas angezogen wird. Fabian nutzt eine Personifizierung, um diesen Vorgang zu veranschaulichen: „(...) dass die sich sozusagen aus dem Weg gehen.“ Wind wird also als eine Art sich bewegendes Objekt verstanden. Simon nutzt die Metapher der „Luftströme“. Auch er betrachtet diese als Personen, die sich gegenseitig „beeinflussen“.

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Annika</b> (Interview 6: 180-264)	Dass die sich bewegende Luft in der Höhe ihre Richtung ändert, könnte etwas mit verschiedenen Luftsarten zu tun haben: Diese haben unterschiedliche Eigenschaften und können nicht miteinander verschmelzen, sodass sie irgendwie aneinander vorbei müssen.
<b>Lara</b> (Interview 6: 180-264)	(Stimmt Annika zu, dass es Luftsarten gibt, die nicht miteinander verschmelzen, sondern irgendwie aneinander vorbei müssen.) Die sich bewegende Luft könnte ihre Richtung ändern, weil sie bestimmte Eigenschaften (Temperatur, Luftfeuchtigkeit) hat, die andere Luftsarten nicht haben.

**Tabelle 62:** Die sich in der Höhe bewegendes Luft ändert ihre Richtung, weil sie auf etwas stößt oder von etwas angezogen wird (Beispiele von Lerner aussagen, Teil 2).

Annika und Lara gehen ebenfalls davon aus, dass der Höhenwind durch Zusammentreffen mit anderer Luft seine Richtung ändert. Im Gegensatz zu Fabian und Simon erläutern sie näher, warum Wind und Luft „nicht miteinander verschmelzen“, sondern „irgendwie aneinander vorbei müssen“ (Annika). Dies liege dran, dass es sich um verschiedene „Luftsarten (...) mit unterschiedliche(n) Eigenschaften“ handle (Annika), die die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit (Lara) betreffen.

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Kerstin</b> (Interview 1: 251, 296-308, 319-320)	Sich bewegende Luft ändert ihre Richtung, wenn sie auf ein anderes Druckgebiet stößt. Druckgebiete stoßen sich gegenseitig ab. Deswegen sind Druckgebiete auch auf unterschiedlicher Höhe.
<b>Rita</b> (Interview 1: 260-262, 296-308)	Dass die sich bewegende Luft in der Höhe mit zunehmender Entfernung vom Äquator ihre Richtung ändert, hat etwas mit dem Hoch und dem Tief zu tun. Ich glaube, bei jeder Zone ändert sich die Windrichtung.
<b>Lea</b> (Interview 5: 199-236, 237-273)	Weil die Luft, wenn sie sich bewegt, also hier (Gestik: Stift wird in Richtung Kamera bewegt), sie kommt hier so und dann gibt es aber hier ein Tief und hier ein Tief (Gestik: links und rechts von Stift, in gleicher Höhe) und dann kann sie sich nicht entscheiden und dann geht sie immer da und dann da.
<b>Bernd</b> (Interview 10: 203-268)	(Auf die Frage, warum ein Wind auf gleichbleibender Höhe seine Richtung ändert:) Ja, vielleicht trifft er dann einfach auf ein wärmeres Gebiet mit höherem Luftdruck, auf ein Hochdruckgebiet und wird sozusagen dann umgelenkt. Rechts vorbei oder links vorbei.

**Tabelle 63:** Die sich in der Höhe bewegendes Luft ändert ihre Richtung, weil sie auf etwas stößt oder von etwas angezogen wird (Beispiele von Lerner aussagen, Teil 3).

Andere Lerner begründen die Richtungsänderung der Höhenwinde mit dem Einfluss von Druckgebieten. Diese stoßen andere Druckgebiete ab (Kerstin) oder lenken die Luft um (Bernd). Rita deutet schematisch-modellhafte Vorstellungen von globalen Luftdruckgürteln an. Warum diese zu einer Richtungsänderung der sich bewegendes Luft in der Höhe führen, erläutert sie jedoch nicht.

Lea nutzt eine Personifizierung: So kann sich die Luft zwischen verschiedenen Tiefdruckgebieten, die links und rechts ihrer Bewegungsrichtung liegen, „nicht entscheiden“ und ändert entsprechend häufig ihre Richtung. Die Lerner nutzen also Drücken- (Kerstin, Bernd) und Ziehen-Schemata (Lea), um die Richtungsänderung der Höhenwinde zu verstehen.

#### 7.4.5 Die sich in der Höhe bewegende Luft ändert ihre Richtung aufgrund der Erdrotation

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Björn</b> (Interview 2: 202-248)	Die sich vom Äquator wegbewegende Luft ändert ihre Richtung, weil sie träge ist und durch die Erdbewegung abgelenkt wird. Hier wirken Fliehkräfte.
<b>Hannah</b> (Interview 7: 98, 223-298)	Die Richtungsänderung der sich vom Äquator entfernenden Luft wird durch die Erdrotation verursacht. Die Luft bleibt trägheitsbedingt zurück gegenüber der sich bewegenden Erdoberfläche, vergleichbar mit einem Gegenstand, den man aus einem fahrenden Auto wirft. Aber komisch ist, dass sich dann alle Winde automatisch in die entgegengesetzte Richtung zur Erdrotation drehen müssten, aber das gibt es doch gar nicht.

**Tabelle 64:** Die sich in der Höhe bewegende Luft ändert ihre Richtung aufgrund der Erdrotation (Beispiele von Lerneraussagen, Teil 1).

Einige Lerner gehen davon aus, dass die polwärts wehenden Höhenwinde ihre Richtung aufgrund der Erdrotation ändern. Björn personifiziert den Wind: Er sei träge und werde durch die Erdbewegung abgelenkt. Außerdem würden Fliehkräfte wirken. Letztere beschreibt er jedoch nicht näher. Ob sich Björn eine trägheits- oder fliehkraftbedingte Ablenkung des Höhenwindes mit oder entgegen der Erdrotation vorstellt, bleibt leider offen. Wissenschaftler verstehen Trägheit als Beibehalten der höheren Umdrehungsgeschwindigkeit des äquatornäheren Herkunftsbreitenkreises. Dieser bewirke entsprechend eine Ablenkung mit der Erdrotation. Hannah versteht die trägheitsbedingte Ablenkung des Höhenwindes als Zurückbleiben gegenüber der sich bewegenden Erdoberfläche. Ihre Aussage ähnelt der historischen Vorstellung Galileis, der die Passate als Relativbewegung der Luft gegenüber der sich nach Westen bewegenden Erdoberfläche beschreibt. Dass diese nur in den Tropen, nicht jedoch beispielsweise in unseren Breiten auftreten, erklärt Galilei mit der höheren Umdrehungsgeschwindigkeit der tropischen Breitenkreise aufgrund der Kugelgestalt der Erde, sodass dieser Effekt nur dort spürbar sei. Hannah erkennt ebenfalls dieses Problem, kann es jedoch nicht lösen. Sie vergleicht das trägheitsbedingte Zurückbleiben der Luft mit einem Gegenstand, den man aus einem fahrenden Auto wirft.

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Sophie</b> (Interview 4: 103-161)	Die sich bewegende Luft in der Höhe ändert mit zunehmender Entfernung vom Äquator ihre Richtung, weil sie sich vielleicht anpasst und mit dreht oder vielleicht gegensätzlich bewegt, sofern es nahe der Erdoberfläche ist. Und weiter oben ist es dann nicht mehr so nah an der Erde. Vielleicht hat es was mit der Erdanziehung zu tun, dass es dem Wind in der Höhe sozusagen egal ist, ob sich die Erde jetzt rechtsrum oder linksrum dreht oder wie auch immer.
<b>Simon</b> (Interview 9: 192-267)	Dass die sich bewegende Luft ihre Richtung ändert, könnte verschiedene Ursachen haben: Ich denke, dass die Luft, die weiter oben ist, von unserem Blickwinkel aus die Richtung ändert, weil sie weniger beeinflusst wird von der Erdanziehungskraft.

**Tabelle 65:** Die sich in der Höhe bewegende Luft ändert ihre Richtung aufgrund der Erdrotation (Beispiele von Lernaussagen, Teil 2).

Sophie und Simon äußern die Vorstellung, dass die Richtungsänderung des Höhenwindes auf eine geringe Erdanziehungskraft zurückzuführen sein könnte. Simon spricht von einer Änderung der Bewegungsrichtung „von unserem Blickwinkel“, was ebenfalls auf die Vorstellung einer Relativbewegung hindeutet. Sophie versucht die Richtungsänderung zudem über eine Personifizierung zu verstehen. Sie spricht davon, dass der Wind „sich vielleicht anpasst“ bzw. dass es ihm in der Höhe „egal ist, ob sich die Erde jetzt rechtsrum oder linksrum dreht“. Auch diese Aussagen lassen auf Vorstellungen von einer Relativbewegung zwischen Luft und Erdoberfläche schließen.

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Emma</b> (Interview 5: 199-236, 237-273)	Ich denke, dass es etwas mit der Erdrotation zu tun hat. Der Luftstrom dreht sich ja nicht mit. Also dass es für uns aussieht, als ob die Luft woanders hingehet, aber das nur ist, weil die Erdrotation halt unten stattfindet.
<b>Lea</b> (Interview 5: 199-236, 237-273)	(In Bezug auf Emmas Vorschlag, dass die Richtungsänderung des Antipassats nur eine Täuschung, eine Relativbewegung zur sich drehenden Erde darstellt:) Ich glaube nicht, dass das so ist. Dann müsste der Wind ja immer aus der gleichen Richtung wehen. Bei uns ist das aber nicht der Fall.
<b>Alina</b> (Interview 7: 223-298)	(In Bezug auf Hannahs Vorstellung, dass durch die Erdrotation Kräfte verursacht werden, die eine Richtungsänderung der Winde zur Folge haben:) Die Erde dreht sich doch nicht mit Lichtgeschwindigkeit. Das merkt man gar nicht! Dann müsste es Erdbeben geben.

**Tabelle 66:** Die sich in der Höhe bewegende Luft ändert ihre Richtung aufgrund der Erdrotation (Beispiele von Lernaussagen, Teil 3).

Auch Emma, Lea und Alina beschäftigen sich mit der Frage, ob die Richtungsänderung des Höhenwindes auf eine Relativbewegung zurückzuführen ist. Das Problem, dass der Wind dann immer aus der gleichen Richtung wehen müsste, was offensichtlich in Deutschland nicht der Fall ist, wird von Lea als Argument gegen Emmas Behauptung verwendet. Alina schließt einen Einfluss der Erdrotation auf die sich bewegende Luft aus mit der Begründung, dass diese sich nicht schnell genug bewege. Ihre Vorstellungen zur Umdrehungsgeschwindigkeit einzelner Breitenkreise erläutert sie leider nicht, belegt jedoch ihre Behauptung damit, dass es ansonsten Erdbeben geben müsste, was nicht der Fall ist.

### 7.4.6 Fazit: Strukturierte Aussagen zum Antipassat

Typ (Nr.)	Lerner (Anmerkung)	Strukturierte Aussagen (verwendete Schema, sofern relevant)	Erfahrungen (e), Metaphern (m), Vergleiche (v)
Die aufgestiegene Luft sinkt vor Ort wieder ab. (17)	<b>Kerstin, Stefan, Fabian, Jonas, Simon</b>	Die Luft kühlt ab und sinkt wieder nach unten. (Teil-Ganzes-Schema, Person-Schema)	
Die aufgestiegene Luft sinkt allmählich, nach polwärtiger Bewegung wieder ab. (18)	<b>Jan, Bernd</b>	Die Luft bewegt sich eine Weile polwärts, dadurch dass ein Impuls (das Wegdrücken der Luft) durch Aufwinde anhält. (Drücken-Schema)	„Luftscheitel der Erde“ (m), Luft staut sich, wird verdrängt (m), Luftdruck „herrscht“ (m)
	<b>Julian</b>	Die Luft bewegt sich eine Weile polwärts, bis sich die Luft abkühlt, weil der Einstrahlungswinkel der Sonne flacher ist bzw. weil es dort kühler ist.	
Die aufsteigende Luft weht als Wind auf gleichbleibender Höhe. (19)	<b>Katja, Judith</b>	Die aufsteigende Luft weht als Wind auf gleichbleibender Höhe. (Person-Schema)	Magnetismus (e), Anziehungskräfte (e), Luft „weicht aus“ (m), wird ablenkt (m), möchte etwas ausgleichen (m)

**Tabelle 67:** Die aufgestiegene Luft sinkt vor Ort wieder ab, die aufgestiegene Luft sinkt allmählich, nach polwärtiger Bewegung wieder ab und die aufgestiegene Luft weht als Wind auf gleichbleibender Höhe (strukturierte Lernaussagen).

Unter der Leitfrage 'Welche Vorstellungen haben die Lerner dazu, was mit der aufgestiegenen Luft in den Tropen geschieht?' konnten drei Typen von Vorstellungen rekonstruiert werden. Einige Lerner gehen davon aus, dass Luft etwa vor Ort wieder absinkt. Sie betrachten Luft nicht relativ zur umgebenden Luft, sondern absolut, d.h. warme Luft steigt auf, kalte Luft sinkt ab. Entsprechend befindet sich Luft in einer permanenten vertikalen Bewegung (Typ 17). Andere Lerner gehen davon aus, dass die Luft in der Höhe sowohl eine horizontale als auch eine allmähliche, abkühlungsbedingte vertikale Bewegung macht (Typ 18). Jan und Bernd verstehen dabei die horizontale Windentstehung über das Drücken-Schema. Julian geht als einziger näher auf die Ursache der allmählichen Abkühlung der Luft in der Höhe ein. Ein dritter Typ von Vorstellungen beschreibt einen Höhenwind, ohne vertikale Bewegungen zu erwähnen (Typ 19). Katja geht davon aus, dass die Antipassate bis zum Nord- bzw. Südpol wehen.

Typ (Nr.)	Lerner (Anmerkung)	Strukturierte Aussagen (verwendete Schema, sofern relevant)	Erfahrungen (e), Metaphern (m), Vergleiche (v)
Die sich in der Höhe bewegende Luft ändert ihre Richtung, weil sie auf etwas stößt oder von etwas angezogen wird. (20)	<b>Fabian, Simon, Annika, Lara</b>	Unterschiedliche Luftsorten müssen aneinander vorbei bzw. sie können nicht verschmelzen.	Luft muss „sich aus dem Weg gehen“ (m), „Luftströme“ (m), „Luftsorten“ (m), „verschmelzen“ (m)
	<b>Rita</b>	Die Richtungsänderung hat etwas mit Hoch und Tief und mit Zonen zu tun.	
	<b>Bernd</b>	Druckgebiete, die aufeinander treffen, werden vom Hochdruckgebiet (dominierend) umgelenkt. (Drücken-Schema)	Luft wird „umgelenkt“ (m)
	<b>Lea</b>	Die Richtung wird durch Tiefdruckgebiete beeinflusst, zwischen denen sich die bewegende Luft entscheiden muss. (Ziehen-Schema)	Luft kann sich bezüglich der Bewegungsrichtung „nicht entscheiden“ (m)
	<b>Kerstin</b>	Druckgebiete auf gleicher Höhe stoßen sich gegenseitig ab. Luft ändert ihre Richtung, wenn sie auf ein anderes Druckgebiet stößt. (Drücken-Schema)	„stoßen“ (m), gegenseitig „abstoßen“ (m)

**Tabelle 68:** Die sich in der Höhe bewegende Luft ändert ihre Richtung, weil sie auf etwas stößt oder von etwas angezogen wird (strukturierte Lernaussagen).

Eine Änderung der Bewegungsrichtung des Höhenwindes erklären einige Lerner dadurch, dass diese auf etwas stößt oder von etwas angezogen wird. So gehen sich Luftobjekte aus dem Weg, unterschiedliche Luftsorten können nicht miteinander verschmelzen. Druckgebiete üben Einfluss auf die Bewegungsrichtung der Luft aus, was die Lerner über Ziehen- oder Drücken-Schema verstehen.

Typ (Nr.)	Lerner (Anmerkung)	Strukturierte Aussagen (verwendete Schema, sofern relevant)	Erfahrungen (e), Metaphern (m), Vergleiche (v)
Die sich in der Höhe bewegende Luft ändert ihre Richtung aufgrund der Erdrotation. (21)	<b>Hannah, Björn, Emma</b>	Die Luft bleibt trägheitsbedingt gegenüber der sich bewegenden Erdoberfläche zurück. (Teil-Ganzes-Schema, Start-Weg-Ziel-Schema)	trägheitsbedingtes Zurückbleiben wie ein Gegenstand, den man aus einem fahrenden Auto wirft (v), Luft ist „träge“ (m), wird „abgelenkt“ (m)
	<b>Sophie, Simon</b>	Luft macht Relativbewegung gegenüber der sich bewegenden Erdoberfläche, da sie durch die Erdanziehung nicht oder wenig beeinflusst wird. (Teil-Ganzes-Schema, Start-Weg-Ziel-Schema)	der Luft ist die Rotationsbewegung der Erde egal (m)
	<b>Sophie (alternativ)</b>	Luft passt sich an und dreht sich mit der Erde. (Teil-Ganzes-Schema, Start-Weg-Ziel-Schema)	„Anpassen“ der Luft an Erddrehung (m)
	<b>Lea, Hannah (Gegenargument)</b>	Die Luft kann keine Relativbewegung machen, sonst müsste der Wind immer aus der gleichen Richtung wehen.	
	<b>Alina (Gegenargument)</b>	Die Erde dreht sich so langsam, dass sie keinen Einfluss auf Luft ausübt	

**Tabelle 69:** Die sich in der Höhe bewegende Luft ändert ihre Richtung aufgrund der Erdrotation (strukturierte Lernaussagen).

Einige Lerner stellen einen Zusammenhang zwischen der Richtungsänderung des Antipassats und der Erdrotation her. Sie artikulieren Vorstellungen, die Ideen Galileis enthalten: Die Richtungsänderung des Höhenwindes sei bedingt durch eine Relativbewegung der Luft gegenüber der sich rotationsbedingt bewegenden Erdoberfläche. Sophie und Simon liefern hierzu eine Erklärung: Die Luft in der Höhe werde nicht oder weniger durch die Erdanziehung beeinflusst. Hannah und Lea bereitet die Vorstellung einer Relativbewegung der Luft jedoch Schwierigkeiten, denn daraus ergibt sich ein Problem: Alle Winde müssten aus der gleichen Richtung wehen, was offensichtlich nicht der Fall ist. Alina schließt einen solchen Einfluss aus, da die Erde sich zu langsam drehe. Sophies Idee

einer Anpassung der Luft an die Erddrehung erscheint aus wissenschaftlicher Perspektive nicht sehr aussagekräftig.

## 7.5 Aussagen zum Urpassat

### 7.5.1 Luft sinkt ab unter der Bedingung, dass sie kalt oder schwer ist

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Verena</b> (Interview 1: 325-410)	Wenn Luft abkühlt, wird sie schwer und sinkt ab. Die Geschwindigkeit absinkender Luft hängt von ihrer Feuchtigkeit ab, also wie schwer die Luft ist.
<b>Paul</b> (Interview 8: 198-2244)	Luft sinkt ab, weil ihre Dichte wieder höher ist und sie dann schwerer ist. Je kälter die Luft ist, desto schneller fällt sie.
<b>Tobias</b> (Interview 8: 198-244)	Luft kühlt ab und wird schwerer. Je kälter sie ist, desto schneller sinkt sie. Beispielsweise sinkt Hagel schneller als Regen, weil er kälter ist und eine höhere Dichte hat.

**Tabelle 70:** Luft sinkt ab unter der Bedingung, dass sie kalt oder schwer ist (Beispiele von Lernaussagen, Teil 1).

Unter der Leitfrage 'Wie stellen sich die Lerner die Bedingungen vor, unter denen Luft in der Höhe absinkt?' konnten Lernervorstellungen rekonstruiert werden, die davon ausgehen, dass die Luft in der Höhe durch Abkühlung schwer wird und absinkt. Sie betrachten diese Luft nicht relativ zur umgebenden Luft. Ihre Aussagen korrelieren mit denen zu aufsteigender Luft, d.h. diese Lerner betrachten auch Aufwinde nicht im Verhältnis zur umgebenden Luft. Ein Indiz für dieses absolute Verständnis sind die Aussagen zur Geschwindigkeit absinkender Luft. Verena geht davon aus, dass diese vom Gewicht der Luft abhängig ist. Umso schwerer Luft sei, desto schneller würde sie sinken. Wissenschaftler erachten den Dichteunterschied zur umgebenden Luft als relevant für die Geschwindigkeit des Absinkens. Verenas Vorstellung, dass Feuchtigkeit Luft schwer mache, wurde bereits beschrieben. Paul und Tobias gehen ebenfalls davon aus, dass allein das Gewicht der absinkenden Luft für die Geschwindigkeit der Abwinde verantwortlich sei. Tobias begründet dies mit der Alltagserfahrung, dass Hagel schneller als Regen falle, weil er kälter sei und eine höhere Dichte habe. Bei dieser Analogiebildung betrachtet Tobias den Hagel relativ zum Regen. Aus wissenschaftlicher Sicht angemessen wäre es, die Dichte von Hagel oder Regen im Verhältnis zur umgebenden Luft unter Berücksichtigung von Auftriebs- und Gewichtskraft zu betrachten. Die Lerner ziehen nicht das Behälter-Schema heran, um Inneres und Äußeres miteinander vergleichen zu können. Metaphern werden ebenfalls nicht verwendet.

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Judith</b> (Interview 3: 443--556)	Luft sinkt unter der Bedingung ab, dass sie sich abkühlt und ihre Dichte größer wird. Die Geschwindigkeit absinkender Luft hängt davon ab, wie schnell sie sich abkühlt.
<b>Simon</b> (Interview 9: 8, 276-291)	Kalte Luft sinkt ab. Damit sie schnell absinkt, müsste die Luft außen rum verdammt kalt sein, damit die noch wärmere Luft eben sehr schnell abkühlt.

**Tabelle 71:** Luft sinkt ab unter der Bedingung, dass sie kalt oder schwer ist (Beispiele von Lernaussagen, Teil 2).

Judith und Simon betrachten die absinkende Luft ebenfalls absolut. Im Unterschied zu Verena, Paul und Tobias gehen sie jedoch davon aus, dass nicht die Lufttemperatur oder Dichte sondern die

Intensität, also der zeitliche Ablauf der Abkühlung, für die Geschwindigkeit des Absinkens verantwortlich sei. Umso schneller Luft abkühle, desto schneller sinke sie auch. Simon geht außerdem davon aus, dass die Abkühlung durch den Einfluss umgebender, kälterer Luft erfolgt, eine Vorstellung, die bereits im Zusammenhang mit den Aussagen zu Aufwinden beschrieben wurde.

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Lara</b> (Interview 6: 67-70, 117-119, 265- 306)	Luft sinkt ab, wenn sie abgekühlt ist. Die Geschwindigkeit absinkender Luft ist davon abhängig, wie viel Luft nachströmt (Gestik: Armbewegung verdeutlicht aufsteigende, nachströmende Luft). Es ist ja ein Kreislauf und wenn alles oben ist, das geht ja gar nicht. Wenn sie kalt wird, geht sie wieder runter und unten wird sie wieder warm und dann geht sie wieder hoch. Eventuell hängt die Geschwindigkeit des Absinkens auch davon ab, wie viel Wind da ist. Vielleicht nimmt der sie mit runter.

**Tabelle 72:** Luft sinkt ab unter der Bedingung, dass sie kalt oder schwer ist (Beispiele von Lernaussagen, Teil 3).

Lara entwickelt eine differenziertere Vorstellung. Sie geht einerseits wie die anderen Lerner davon aus, dass Luft absinkt, wenn sie abgekühlt ist, betrachtet diese also absolut. Die Temperatur oder Dichte der umgebenden Luft spielt keine Rolle in Hinblick auf die Geschwindigkeit der absinkenden Luft. Hier führt sie dynamische Ideen an: Wie schnell kalte Luft absinkt, hänge davon ab, wie schnell warme Luft aufsteige. Sie deutet einen Kreislauf von permanentem Absinken und Aufsteigen der Luft an, je nachdem ob sie warm oder kalt sei, ein Indiz dafür, dass sie die Lufttemperatur absolut betrachtet. Der Wind wird personifiziert: Er kann absinkende Luft mit runter nehmen. Lara unterscheidet also hier zwischen absinkender Luft und Wind. Sie erkennt nicht, dass es sich in beiden Fällen um Luft handelt. Insofern erscheint die Personifizierung widersprüchlich und aus wissenschaftlicher Perspektive wenig aussagekräftig.

### 7.5.2 Luft sinkt ab unter der Bedingung, dass sie schwerer oder kälter als etwas ist

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Julian</b> (Interview 2: 196-268, 358-364)	Luft sinkt ab, wenn sie kälter und damit schwerer als die umgebende Luft ist. Ihre Dichte ist dann höher. Zuvor hat sie ihre Wärme an irgendetwas abgeben können. Die Geschwindigkeit absinkender Luft ist von ihrer Dichte im Vergleich zur Dichte der umgebenden Luft und natürlich vom Ortsfaktor abhängig. Wenn man beispielsweise einen Bleigurt anzieht, sinkt man im Wasser schneller. Oder man lässt Gasblasen im Wasser aufsteigen, dann verringert sich die Dichte des Wassers und man sinkt schneller. Wenn die umgebende Luft also weniger dicht ist, also selbst weniger Gewicht hat, dann leistet sie weniger Widerstand und Luft sinkt schneller ab.
<b>Elena</b> (Interview 5: 281-307, 347-358)	Die Geschwindigkeit absinkender Luft ist vom Temperaturunterschied zwischen aufgestiegener und umgebener Luft abhängig.

**Tabelle 73:** Luft sinkt ab unter der Bedingung, dass sie schwerer oder kälter als etwas ist (Beispiele von Lernaussagen, Teil 1).

Mit Hilfe der Leitfrage 'Wie stellen sich die Lerner die Bedingungen vor, unter denen Luft in der Höhe absinkt?' konnten Vorstellungen rekonstruiert werden, die Dichte und Temperatur der absinkenden Luft im Verhältnis zur der umgebenden Luft betrachten und die Geschwindigkeit des Absinkens aus der Differenz ableiten. Diese relative Betrachtungsweise ist die aus wissenschaftlicher Sicht angemessene. Julian und Elena ziehen hierzu das Behälter-Schema heran: Im Inneren befindet sich kältere, schwere Luft mit hoher Dichte (Julian) oder die „aufgestiegene Luft“ (Elena). Die umgebende Luft existiert außerhalb des Behälters und ist anders in Hinblick auf Temperatur (Julian, Elena) und

Dichte (Julian). Julian erwähnt zudem einen zweiten relevanten Aspekt, den er den Ortsfaktor nennt. Dass die Dichtedifferenz die Geschwindigkeit des Absinkens bestimmt, schlussfolgert er in Analogie zu lebensweltlichen Erfahrungen: Ein Körper sinkt in einem Medium umso schneller, je geringer die Dichte des Mediums ist. Er nennt Wasser, welches durch Gasblasen dünner wird. Oder ein Körper sinkt umso schneller, je mehr seine Dichte erhöht wird. Er erwähnt einen Menschen im Wasser, der einen Bleigurt anzieht. Aus wissenschaftlicher Sicht ist diese Analogie angemessen. Während Julian von „weniger Widerstand“ spricht, der „(ge)leistet“ wird, die wirkenden Kräfte also personifiziert, gehen Wissenschaftler von Auftriebs- und Gewichtskräften aus.

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Jan</b> (Interview 10: 270-290)	Wenn die Luft kälter ist als die umgebende Luft, dann sinkt sie ab. Wenn es sich abkühlt, wird die Dichte kleiner und dadurch nimmt der Druck ab und es sinkt. Die Geschwindigkeit absinkender Luft ist vom Temperatur- und Druckunterschied abhängig.
<b>Bernd</b> (Interview 10: 50-51, 270-290)	(Stimmt Jan zu, der sagt, dass die Luft sinkt, wenn sie kälter ist als die umgebende Luft.) Die Geschwindigkeit absinkender Luft ist vom Temperaturunterschied abhängig. Niedriger Druck, niedrige Temperatur. (Stimmt Jan zu, dass bei der Abkühlung die Dichte kleiner wird.)

**Tabelle 74:** Luft sinkt ab unter der Bedingung, dass sie schwerer oder kälter als etwas ist (Beispiele von Lerneraussagen, Teil 2).

Jan und Bernd betrachten absinkende Luft mit Hilfe des Behälter-Schemas ebenfalls relativ zur umgebenden. Sie nehmen jedoch an, dass nicht nur Temperatur- und Dichteunterschiede relevant sind, sondern auch der Luftdruck eine Rolle spielt. Diese Vorstellung könnte auf einer deduktiven Schlussfolgerung basieren: So scheinen die Lerner von einem gesetzmäßigen Zusammenhang von Temperatur, Dichte und Druck der Luft auszugehen, was aus wissenschaftlicher Sicht durchaus angemessen ist: „Wenn es sich abkühlt, wird die Dichte kleiner und dadurch nimmt der Druck ab“ (Jan) bzw. „(n)iedriger Druck, niedrige Temperatur“ (Bernd). Zudem gehen beide Lerner im Kontext horizontaler Windentstehung davon aus, dass Hoch- und Tiefdruck eine Rolle spielen. Aus beiden Annahmen leiten sie ab, dass auch bei Abwinden der Druckunterschied zwischen absinkender und umgebender Luft eine Rolle spielt. Aus wissenschaftlicher Sicht erscheinen lediglich Auftriebs- und Gewichtskräfte bei vertikalen Luftbewegungen relevant. Die aus Druckunterschieden resultierende Gradientkraft spielt hingegen bei horizontalen Luftbewegungen eine wichtige Rolle. Ihre Vorstellung, dass die vertikale Bewegung durch Druckunterschiede initiiert wird, enthält zudem einen Widerspruch, den sie jedoch nicht bemerken: Sie gehen davon aus, dass sich Luft in der Höhe mit einem niedrigen Druck zur Luft darunter mit dem höheren Druck bewegt. Julian, Elena und Bernd betrachten auch aufsteigende Luft relativ zur umgebenden. Jan entwickelt im Kontext Abwinde seine ehemals absolute Betrachtungsweise aufsteigender Luft weiter zu einer relativen. Die übrigen Lerner, Julian, Elena und Bernd, verstehen bereits in früheren Kontexten sich vertikal bewegende Luft im Verhältnis zur umgebenden.

### 7.5.3 Luft sinkt aus sonstigen Gründen ab

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Kerstin</b> (Interview 1: 325-357, 404-408)	Wenn Luft auf ein anderes Druckgebiet stößt, sinkt sie ab. In einem Hochdruckgebiet ist die Luft oben, in einem Tiefdruckgebiet unten. Treffen die Druckgebiete aufeinander, kann es sein, dass ein Druckfeld das andere überwiegt, beispielsweise dadurch, dass sie unterschiedlich groß sind.
<b>Hannah</b> (Interview 7: 79, 309-335)	Oder Luft sinkt ab, wenn sich ein Hoch über ein Tief schiebt, wie wenn die Erde so aufeinander prallt.
<b>Emma</b> (Interview 5: 274-307, 338-358)	Die Geschwindigkeit absinkender Luft könnte vom Druckunterschied zwischen dem Hochdruckgebiet oben und dem Tiefdruckgebiet unten abhängig sein.

**Tabelle 75:** Luft sinkt aus sonstigen Gründen ab (Beispiele von Lernaussagen, Teil 1).

Mit Hilfe der Leitfrage 'Wie stellen sich die Lerner die Bedingungen vor, unter denen Luft in der Höhe absinkt?' konnten weitere Vorstellungen rekonstruiert werden. Einige Lerner gehen ebenfalls davon aus, dass der Luftdruck bei Abwinden relevant ist. Sie verstehen diesen jedoch im Gegensatz zu Jan und Bernd vor allem über das Drücken-Schema. Sie sprechen von „Druckgebiete(n)“ (Kerstin), „Druckfelder(n)“ (Kerstin), „Hoch“ und „Tief“ (Hannah), von „Hoch-“ und „Tiefdruckgebieten“ (Emma), die sie als Entitäten oder Objekte begreifen. Sie können aufeinander stoßen (Kerstin), sich gegenseitig überwiegen (Kerstin), unterschiedlich groß sein (Kerstin) und sich übereinander schieben (Hannah). Hannah vergleicht diesen Vorgang mit der „Erde“, worunter sie eventuell Prozesse an Subduktionszonen versteht. Die Lerner nutzen also Personifizierungen, um die Bewegungen zu veranschaulichen. Interessanterweise verorten alle drei Hochdruckgebiete in der Höhe und Tiefdruckgebiete darunter. Im Kontext von Windentstehung wurde diese Vorstellung bei Julian herausgearbeitet. Er versteht das metaphorische Konzept 'Wind ist fließendes Wasser' sehr wörtlich und geht von einem Gefälle, bedingt durch einen Höhenunterschied, aus. Während Kerstin und Hannah davon ausgehen, dass sich die Druckgebiete bewegen, artikuliert Emma die Vorstellung, dass sich Luft vom Hochdruck- zum Tiefdruckgebiet bewegt. Wie Bernd und Jan erachtet sie also den Druckunterschied als relevant für die vertikale Luftbewegung. Diese erfolge umso schneller, je größer die Luftdruckdifferenz zwischen oben und unten sei. Wissenschaftler erfassen mit einer solchen Vorstellung lediglich horizontale Luftbewegungen.

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Jana</b> (Interview 7: 309-335)	Luft sinkt ab unter der Bedingung, dass es geregnet hat, weil sie sich dann ihres Wasserdampfes entladen hat. (Auf die Frage, warum Luft ohne Wasserdampf absinken sollte:) Weil sie wieder neuen braucht.
<b>Emma</b> (Interview 5: 274-307, 338-358)	Absinken ist ja eigentlich Regen, wobei es nicht dazu kommen muss, wenn sich nicht genügend Teilchen oben sammeln.

**Tabelle 76:** Luft sinkt aus sonstigen Gründen ab (Beispiele von Lernaussagen, Teil 2).

Einen Zusammenhang zwischen absinkender Luft und Regen stellen Jana und Emma her. Jana artikuliert eine teleologische Vorstellung. Sie personifiziert die wasserdampfhaltige Luft und unterstellt ihr bestimmte zweckgerichtete Handlungen: Sie entlädt sich ihres Wasserdampfes und sinkt ab, „(w)eil sie wieder neuen braucht.“ Emma scheint in diesem Kontext nicht zwischen absinkender Luft und Regen zu differenzieren: „Absinken ist ja eigentlich Regen“. Dass flüssiges

Wasser in der Atmosphäre durch Kondensation entsteht, begreifen Wissenschaftler über das Person-Schema: Luft nimmt im Rahmen von Verdunstung Wasserdampf auf und scheidet aufgrund von Kondensationsprozessen Wasser in flüssiger Phase aus. Auf dieses Schema greift Emma jedoch nicht zurück. Niederschlagsbildung stellt sie sich sehr bildhaft mit Hilfe des Teil-Ganzes-Schema vor. Warum ab einer bestimmten Menge von „Teilchen“ Regen einsetzen sollte, erläutert sie leider nicht.

### 7.5.4 Die absinkende Luft erwärmt sich – Ursachen

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Julian</b> (Interview 2: 269--322)	Luft erwärmt sich gemäßigt beim Absinken, weil sie erstens näher an die Erde kommt, also näher an den Hauptabgeber der Wärme, die Luft aufnehmen kann. Und weil sie entgegen der Richtung der warmen, aufsteigenden Luftsäule fließt und von dieser dann erwärmt wird. Die Wärme wird an die die ganze Zeit vorbeiströmenden kalten Luftmoleküle abgegeben. Haben aufsteigende und sinkende Luft nicht irgendwann dann die gleiche Temperatur? Da findet natürlich die ganze Zeit ein Austausch von Molekülen statt. Es gibt die warme Luftsäule und die kalte Luftsäule, die nach unten fällt und irgendeines aus den Molekülen aus der kalten Luftsäule wird jetzt so oft von dem warmen (Luftmolekülen) getroffen, dass es selber wieder warm wird, dann geht es sozusagen auf die andere Seite der Autobahn, geht mit nach oben. Und ich denke mal, dass die dann eben noch weitergehen, dass liegt dann eben an dem Sog oder eben an dem Druck. Wenn die ja nach unten fallen, dann drücken die ja sozusagen von unten dann wieder nach.

**Tabelle 77:** Die absinkende Luft erwärmt sich - Ursachen (Beispiele von Lerneraussagen, Teil 1).

Mit Hilfe der Leitfrage 'Inwiefern stellen sich die Lerner vor, dass sich die Luft beim Absinken verändert?' konnten Aussagen rekonstruiert werden, die davon ausgehen, dass sich die Luft während des Absinkens erwärmt. Julian erläutert eine sehr differenzierte Vorstellung. Die eigentliche Ursache der Erwärmung sieht er darin, dass sich die Luft dem „Hauptabgeber der Wärme“, der Erdoberfläche nähert. Diese wird also personifiziert. Aufgrund der lebensweltlichen Erfahrung, dass sich die gefühlte Temperatur erhöht, je mehr man sich einer Wärmequelle, z.B. einem Feuer oder einem Ofen, nähert, erscheint Julians Erklärung plausibel und nachvollziehbar, obgleich sie aus wissenschaftlicher Perspektive nicht korrekt ist. Wissenschaftler führen die Abkühlung absinkender Luft auf adiabatische Kompression zurück. Julian erkennt ein Problem oder einen Widerspruch: Den absinkenden Luftteilchen müssten aufsteigende entgegen kommen. Er spricht von kalten und warmen Molekülen und fragt sich, ob es nicht zu einem Temperatúrausgleich kommen müsste. Im Kontext Aufwinde artikuliert er die aus wissenschaftlicher Sicht angemessene Vorstellung einer geringen Wärmeleitfähigkeit der Luft, auf die er in dieser Situation nicht zurückgreift. Stattdessen führt er dynamische Aspekte als Ursache an. So herrsche ein „Sog“ oder „Druck“, der die Luftteilchen trotz Temperatúrausgleiches weiterhin absinken bzw. aufsteigen lässt. Julian begreift diese Vorgänge vor allem über das Teil-Ganzes- und das Start-Weg-Ziel-Schema: Moleküle treffen auf andere und übertragen dadurch ihre Wärme. Es findet ein Austausch von Molekülen statt. Er nutzt die Metapher der Autobahn, um die gegensätzlichen Wege und Bewegungen der aufsteigenden und den der absinkenden Luft zu veranschaulichen. Zudem spricht er von „vorbeiströmenden“ Luftmolekülen, versteht diese also über das metaphorische Konzept 'Wind ist fließendes Wasser' um die Art der Bewegung zu veranschaulichen. Andererseits begreift er Auf- und Abwinde als „Luftsäulen“, zieht

also das metaphorische Konzept 'Luft ist fester Körper' heran, um die äußere Form der sich vertikal bewegend Luft gedanklich fassen zu können.

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Judith</b> (Interview 3: 495-532)	Luft erwärmt sich beim Absinken, da sie wieder näher zur Erde kommt. Dies geschieht jedoch nicht schlagartig. Der Prozess der Erwärmung läuft nicht so schnell ab, da es sich um winzige Partikel, Moleküle handelt, die sich erwärmen müssen. Einzelne erwärmen sich schon sehr früh. Die meiste Erwärmung findet nahe der Erdoberfläche statt.
<b>Hannah</b> (Interview 7: 79, 309-335)	"Die Luft erwärmt sich beim Absinken." Nein, ah doch. Aber nicht so stark, wie wenn sie sich da so auf das Relief und so drauf legt. Ich denke, dass Luft eigentlich keinen großen eigenen Wärmekoeffizienten hat wie die Erde, dass die Erde die Luft wärmt und nicht umgekehrt, dass die Luft sich selbst erwärmt. Weil sie von der Erde erwärmt wird.
<b>Fabian</b> (Interview 9: 276-298)	Ich dachte, die absinkende Luft erwärmt sich erst, wenn sie angekommen ist an der Erde. Weil wenn sie sich ja eigentlich zu arg erwärmen würde, dann steigt sie ja direkt wieder auf.

**Tabelle 78:** Die absinkende Luft erwärmt sich - Ursachen (Beispiele von Lerner aussagen, Teil 2).

Judith, Hannah und Fabian gehen ebenfalls davon aus, dass die Erwärmung der absinkenden Luft durch die Annäherung an die Wärmequelle, die Erdoberfläche, erfolgt. Hannah betont, „dass die Erde die Luft erwärmt und nicht umgekehrt“. Judith begreift Luft über das Teil-Ganzes-Schema: Sie erläutert, dass der Prozess der Erwärmung langsam abläuft, da es sich um winzige „Partikel“ oder „Moleküle“ handelt, welche ihre Temperatur unterschiedlich schnell erhöhen. Fabian geht ebenfalls von einer langsamen Erwärmung der absinkende Luft aus, begründet dies jedoch teleologisch: „(W)enn sie sich ja eigentlich zu arg erwärmen würde, dann steigt sie ja direkt wieder auf“. Mariela, Hannah und Fabian betrachten vertikale Luftbewegungen absolut, d.h. die Temperatur- oder Dichtedifferenz zur umgebenden Luft wird nicht berücksichtigt. Daher fällt es ihnen schwer, zu erklären, ab welcher Temperatur Luft aufsteigt oder absinkt. Sie gehen davon aus, dass warme Luft aufsteigt und kalte Luft absinkt. Entsprechende Schwierigkeiten bereitet ihnen die Vorstellung, dass absinkende Luft wieder warm ist und sich daher nicht mehr nach unten bewegt. Sie lösen dieses Problem, indem sie davon ausgehen, dass sich absinkende Luft sehr langsam erwärmt, also beim Absinken eigentlich immer noch kalt ist. Hannah erklärt, dass sich die Luft erst auf das Relief „drauf legt“, um sich stark erwärmen zu können. Sie personifiziert also die Luft, um die Bewegung und ihr Verhältnis zur Erdoberfläche zu veranschaulichen. Den Begriff „Wärmekoeffizient“ erwähnt sie auch im Kontext Aufwinde. Im Gegensatz zu Julian wendet sie die Idee einer geringen Wärmeleitfähigkeit der Luft auch in diesem Zusammenhang an.

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Lara</b> (Interview 6: 67-70, 117-119, 265-306)	Die Luft erwärmt sich beim Absinken durch die Sonne schon wieder ein bisschen, so kurz vor der Erdoberfläche. Luft in der Höhe ist kälter, weil sie nicht so viel Wärme aufnehmen kann. Unten hat sie eine größere Dichte und kann mehr Sonnenstrahlung aufnehmen.

**Tabelle 79:** Die absinkende Luft erwärmt sich - Ursachen (Beispiele von Lerner aussagen, Teil 3).

Eine andere Vorstellung artikuliert Lara. Sie geht davon aus, dass sich absinkende Luft erwärmt, da sie unten eine größere Dichte hat. Diese führe dazu, dass die Luft in der Nähe der Erdoberfläche „mehr Sonnenstrahlung aufnehmen“ kann. Sie begreift den Vorgang also mit Hilfe des Person-Schemas. Aus wissenschaftlicher Sicht erscheint diese Vorstellung nicht vollständig korrekt: Die bodennahe Luft absorbiert vor allem terrestrische Wärmestrahlung, wobei die Dichte der Luft hierbei

wie von Lara beschrieben, relevant ist. Während des Absinkens führt die adiabatische Kompression zu einer Erwärmung.

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Stefan</b> (Interview 8: 198-204, 218-223, 233-244)	Wenn sie dann wieder sinkt, dann wird die Luft auch wieder sauerstoffreicher. Dann müsste es sich eigentlich auch wieder erwärmen.
<b>Rainer</b> (Interview 10: 270-290)	Die Luft erwärmt sich beim Absinken. Sie gleicht sich wieder der Umgebung an und die Luft nahe der Erde ist wärmer wie die weiter weg.

**Tabelle 80:** Die absinkende Luft erwärmt sich - Ursachen (Beispiele von Lernaussagen, Teil 4).

Wiederum andere Erklärungen für die Erwärmung absinkender Luft liefern Stefan und Rainer. Stefan verwendet die mit Hilfe einer Analogiebildung gewonnene Vorstellung, dass Sauerstoff Luft warm macht, auch im Kontext Abwinde. Er geht davon aus, dass absinkende Luft sauerstoffreicher wird, erläutert jedoch nicht, warum. Dies führe zu einer Erwärmung der absinkenden Luft. Rainer erklärt letzteres durch ein Angleichen der Luft an die wärmer werdende Umgebung. Er personifiziert die absinkende Luft also, erläutert seine Vorstellung jedoch leider nicht weiter.

### 7.5.5 Die absinkende Luft erwärmt sich – Folgen

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Tim</b> (Interview 2: 269-322, 365-366)	Luft sinkt ab, bis sie wieder aufsteigt. Beim Absinken erwärmt sie sich, beim Aufsteigen kühlt sie ab. Müsste nicht irgendwann ein Punkt kommen, wo auf- und absteigende Luft die gleiche Temperatur haben?
<b>Katja</b> (Interview 3: 466-471, 495-532)	Die absinkende Luft erwärmt sich erst unten ab einem bestimmten Bereich wieder. Würde sie sich früher erwärmen, würde sie ja überhaupt nicht mehr runter kommen. Ab wo sich absinkende Luft erwärmt, ist unklar.
<b>Annika</b> (Interview 6: 67-70, 117-119, 269-306)	Die absinkende Luft erwärmt sich nicht, denn warme Luft steigt nach oben, kalte Luft sinkt ab. (Später:) Theoretisch müsste sie sich ja erwärmen beim Absinken, weil sie sonst nicht hoch gehen kann, um sich wieder abzukühlen.

**Tabelle 81:** Die absinkende Luft erwärmt sich - Folgen (Beispiele von Lernaussagen, Teil 1).

Das von Julian, Judith, Hannah und Fabian angedeutete Problem, dass sich Abwinde nicht zu schnell erwärmen dürfen, da sie sonst nicht mehr absinken, wird auch von anderen Lernern erkannt. Tim fragt, wie Julian, ob nicht irgendwann „ein Punkt“ kommt, „wo auf- und absteigende Luft die gleiche Temperatur haben?“. Er kann diesen jedoch ebenso wenig wie Katja verorten, da beide Lerner absinkende Luft als etwas Absolutes betrachten. Aus Annikas Äußerung lässt sich diese Betrachtungsweise sehr deutlich herausarbeiten. Sie unterscheidet zwei Zustände: Luft kann warm sein und aufsteigen oder kalt sein und absinken. Ihre Schlussfolgerung, absinkende Luft erwärme sich nicht, leitet sie deduktiv aus diesen einfachen Annahmen ab. Später entwickelt sie ihre Vorstellung weiter und nimmt an, dass sich absinkende Luft erwärmt, „weil sie sonst nicht hoch gehen kann, um sich wieder abzukühlen“. Sie unterstellt diesen Vorgängen also Absichten oder Zwecke.

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Rita</b> (Interview 1: 84, 289, 367--393, 411-418)	Absinkende Luft erwärmt sich, wodurch ihre Dichte größer wird.
<b>Paul</b> (Interview 8: 198-204, 218--244)	Beim Absinken wird sie langsam warm. Erst wenn sie dann wieder erwärmt wird, wird die Dichte so gering, dass sie wieder aufsteigen kann.
<b>Tobias</b> (Interview 8: 198-204, 218--244)	Beim Runtergehen wird die Dichte schon geringer, weil die Luft immer wärmer wird. Und wenn sie unten ist, dann wird sie noch mal erwärmt und dadurch steigt sie wieder auf, da ist dann eine geringere Dichte.

**Tabelle 82:** Die absinkende Luft erwärmt sich - Folgen (Beispiele von Lerneraussagen, Teil 2).

Einige Lerner erwähnen als Folge der Erwärmung absinkender Luft eine Veränderung der Luftdichte. Während Rita im Kontext Aufwinde davon ausgeht, dass warme Luft leicht ist und daher aufsteigt, behauptet sie nun, dass mit der Erwärmung die Dichte der Luft größer wird. Leider geht sie nicht näher auf ihre Vorstellungen zu Dichte ein. Aus wissenschaftlicher Sicht erscheint der von Rita angesprochene Zusammenhang relevant. Allerdings sehen Wissenschaftler die Zunahme der Luftdichte nicht als Folge der Erwärmung an, sondern als Ursache. Sie sprechen von adiabatischer Kompression. Paul und Tobias nehmen an, dass sich die Dichte der absinkenden Luft verringert. Sie leiten dies deduktiv aus der Annahme ab, dass die Luftdichte mit zunehmender Temperatur abnimmt. Beide betrachten also Dichte und Temperatur absolut und nicht im Verhältnis zur umgebenden Luft. Dass letztere durch zunehmende Dichte die absinkende Luft komprimiert und damit die Dichte erhöht, ziehen sie nicht in Betracht. Dass die Dichte absinkender Luft in Folge der Erwärmung abnimmt, betrachten beide als Problem, da sie davon ausgehen, dass Luft mit geringer Dichte nicht mehr absinkt. Paul betont daher, dass die Luft beim Absinken „langsam“ warm wird. Tobias spricht davon, dass sie „immer wärmer wird“ und „wenn sie unten ist“ sich „noch mal erwärmt“. Um das Absinken zu veranschaulichen, verwendet er die Personifizierung „(b)eim Runtergehen“.

### 7.5.6 Die absinkende Luft erwärmt sich nicht - Ursachen

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Emma</b> (Interview 5: 274-307, 338-358)	Luft erwärmt sich nicht beim Absinken. Das wäre unlogisch. Wir haben gesagt, dass aufsteigende Luft abkühlt, weil die Teilchen ihre Energie wegnehmen.
<b>Nele</b> (Interview 6: 281-306)	Die Luft erwärmt sich nicht beim Absinken. Die Luft in der Höhe ist kalt, weil sie eine kleinere Dichte hat. Bei größerer Dichte kann es schneller warm werden.

**Tabelle 83:** Die absinkende Luft erwärmt sich nicht - Ursachen (Beispiele von Lerneraussagen).

Unter der Leitfrage 'Wie stellen sich die Lerner die Bedingungen vor, unter denen Luft in der Höhe absinkt?' konnten Vorstellungen rekonstruiert werden, die davon ausgehen, dass sich die absinkende Luft nicht erwärmt. Emma begründet diese Annahme damit, dass den Abwinden keine Energie zugeführt wird. Sie begreift also die Erwärmung oder Abkühlung von Luft über das Person-Schema. Die Teilchen werden zudem personifiziert: Sie versteht darunter die Moleküle der umgebenden Luft, die ausgeschiedene Energie „wegnehmen“. Nele artikuliert die Vorstellung, dass die Luftdichte Einfluss auf die Erwärmung der Luft hat. Ob sie von einer ähnlichen Annahme wie Lara ausgeht, Luft

könne Strahlung umso besser aufnehmen, je dichter sie sei, lässt sich leider nicht rekonstruieren. Sie zieht ihre Behauptung heran, um zu begründen, warum sich absinkende Luft nicht erwärmt.

### 7.5.7 Die Luft sinkt bis zum Boden ab

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Björn</b> (Interview 2: 269-322, 365-366)	Luft sinkt ab, bis sie sich wieder erwärmt, d.h. bis sie so nah über dem Boden ist, dass sie von der abgegebenen Hitze oder Wärme wieder wärmer wird und aufsteigt.

**Tabelle 84:** Die Luft sinkt bis zum Boden ab (Beispiele von Lerner aussagen, Teil 1).

Unter der Leitfrage 'Welche Vorstellungen haben Lerner darüber, wie weit Luft absinkt?' konnten Aussagen herausgearbeitet werden, die davon ausgehen, dass Luft bis zum Boden absinkt. Diese Behauptung wird sehr unterschiedlich begründet. Björn schlussfolgert dies deduktiv aufgrund der Annahme, dass die Luft erst „so nah vor dem Boden (...) von der abgegebenen Hitze oder Wärme wieder wärmer wird“. Während des vorhergehenden Absinkvorgangs sei die Erwärmung weniger stark.

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Katja</b> (Interview 3: 445-456, 533-545, 557-559)	Wenn sich die Luft jedoch erhitzt, sinkt sie nicht mehr. Ein Teil der Luft sinkt jedoch immer bis zum Boden. Es findet eine Zirkulation statt, sonst wäre es unten kalt, weil alle warme Luft nach oben steigen würde. Ein beheizter Raum erwärmt sich auch vollständig, d.h. die absinkende Luft wird nicht irgendwo gestoppt.

**Tabelle 85:** Die Luft sinkt bis zum Boden ab (Beispiele von Lerner aussagen, Teil 2).

Katja artikuliert eine differenzierte Vorstellung. Sie betrachtet Luft absolut, geht also von der einfachen Annahme aus, dass warme Luft aufsteigt und kalte Luft absinkt. Das Problem, dass diese nicht mehr absinkt, wenn sie sich erhitzt, löst sie, indem sie annimmt, dass „(e)in Teil der Luft“ immer bis zum Boden sinkt, „sonst wäre es unten kalt, weil alle warme Luft nach oben steigen würde.“ Sie belegt dies mit einer Alltagserfahrung: „Ein beheizter Raum erwärmt sich auch vollständig, d.h. die absinkende Luft wird nicht irgendwo gestoppt.“

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Amelie</b> (Interview 4: 185-189, 207-215, 224-235)	Wenn die Luft in den Tropen nur bis zu einer bestimmten Höhe absinken würde, würde man unten ja keine Luft mehr kriegen. Unten drunter wäre dann gar nichts, ein Unterdruckgebiet, ein Vakuumraum.
<b>Lea</b> (Interview 5: 308-337)	Dass Luft in den Tropen nur bis zu einer bestimmten Höhe absinkt, glaube ich nicht. Luft kann nicht einfach aufhören zu sinken.

**Tabelle 86:** Die Luft sinkt bis zum Boden ab (Beispiele von Lerner aussagen, Teil 2).

Amelie geht ebenfalls davon aus, dass Luft bis zum Boden absinkt. Sie begründet dies mit der Alltagserfahrung, dass es keine luftleeren Räume gibt, kein „Unterdruckgebiet“, keinen „Vakuumraum“. Mit ihrem Argument, „sonst würde man unten ja keine Luft mehr kriegen“, unterstellt sie der Natur Absichten oder Zwecke. Es handelt sich also um eine teleologische Vorstellung. Ähnlich argumentiert Lea. Sie personifiziert die Luft und unterstellt ihr, sie „kann nicht einfach aufhören zu sinken“.

### 7.5.8 Luft sinkt nur bis zu einer bestimmten Höhe ab

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Kerstin</b> (Interview 1: 337-347, 367-393, 411-418)	Es könnte auch sein, dass Luft nur bis zu einer bestimmten Höhe absinkt, weil unten drunter kein Platz mehr ist. Vergammelt die Luft unten drunter dann nicht? Die Luft unten drunter könnte trotzdem aufsteigen, die Luft oben drüber jedoch nicht weiter absinken. Dieses Phänomen gibt es nur in den Tropen, weil dort Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur viel intensiver sind.
<b>Rita</b> (Interview 1: 84, 289, 367-393, 411-418)	In den Tropen sinkt die Luft nur bis zu einer bestimmten Höhe ab, weil sie sich nicht an die untere Luft anpassen kann. Letztere ist feuchtwarm im Gegensatz zur absinkenden Luft. Die untere Luft steigt trotzdem auf, nur die absinkende Luft kann nicht weiter absinken. Dies ist nur in den Tropen so, da die Luft viel wärmer und feuchter ist wie z.B. in Deutschland.
<b>Lara</b> (Interview 6: 118-119, 266-268, 307-320)	In den Tropen sinkt Luft nur bis zu einer bestimmten Höhe ab, weil die unten wegen der hohen Luftfeuchtigkeit eine so hohe Dichte hat, dass die absinkende Luft nicht weiter runter kann. Ein bisschen Luft kommt jedoch immer runter, da sie sich sonst oben stauen würde, was ich mir nicht vorstellen kann.

**Tabelle 87:** Luft sinkt nur bis zu einer bestimmten Höhe ab (Beispiele für Lernaussagen, Teil 1).

Unter der Leitfrage 'Welche Vorstellungen haben Lerner darüber, wie weit Luft absinkt?' konnten Vorstellungen identifiziert werden, die davon ausgehen, dass Luft nur bis zu einer bestimmten Höhe absinkt. Die Begründungen hierzu sind ebenfalls vielfältig. Kerstin stellt sich vor, dass das Absinken endet, „weil unten drunter kein Platz mehr ist“, da dieser Raum von Luft mit hoher Feuchtigkeit und Temperatur eingenommen wird. Damit die Luft in Bodennähe jedoch nicht „(v)ergammelt“ könne diese aufsteigen. Lara artikuliert eine ähnliche Vorstellung. Sie nimmt an, dass die Luft in Bodennähe eine höhere Dichte aufgrund höherer Luftfeuchtigkeit habe. Die vertikale Bewegung der Luft versteht sie mit Hilfe des metaphorischen Konzeptes 'Wind ist fließendes Wasser'. Im Gegensatz zu Kerstin stellt für sie nicht die Verhinderung des Aufsteigens der Luft ein Problem dar, sondern dass sich die absinkende Luft „oben stauen würde“. Sie geht daher davon aus, dass „ein bisschen Luft“ immer runter kommt. Rita stellt sich eine ähnliche Situation vor. Auch sie erläutert, dass Luft aufsteigen, Abwinde jedoch nicht weiter absinken könnten. Ihre Begründung erscheint aus wissenschaftlicher Sicht jedoch wenig aussagekräftig: Sie personifiziert den Abwind und behauptet, dass dieser sich nicht an die feuchtwarmer Luft in Bodennähe „anpassen“ kann. Es fällt auf, dass sich die Lerner eine Art feste Grenze vorstellen, die nur von einem Teil aufsteigender oder absinkender Luft passiert werden kann. Das Start-Weg-Ziel-Schema spielt also eine wichtige Rolle. Wissenschaftler gehen von der Vorstellung einer Inversion aus. Entscheidend sind für sie Auftriebs- und Gewichtskräfte, die über das Ziehen- und Drücken-Schema verstanden werden.

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Paul</b> (Interview 8: 205-210, 245-267)	Wenn Luft in den Tropen nur bis zu einer Höhe von etwa 1000 Meter absinken würde, läge das daran, dass sie sich beim Absinken wieder so stark erwärmt hätte, dass sie wieder hoch geht. Unter den 1000 Metern wäre die Luftdichte überall gleich. Wenn man Sandkörner in einem Glas schüttelt, dann vertauschen die sich ja auch alle. Das ist, denke ich, so beim Wind auch.

**Tabelle 88:** Die Luft sinkt bis zum Boden ab (Beispiele von Lernaussagen, Teil 2).

Dass die Luft nur bis zu einer bestimmten Höhe absinkt, begründet Paul mit der Erwärmung des Abwindes. Im Gegensatz zu Wissenschaftlern, die einen Gleichgewichtszustand von abgesunkener und umgebender Luft mit Hilfe von Vorstellungen zu Auftriebs- und Gewichtskräften beschreiben, geht Paul hierauf nur sehr vage ein und spricht davon, „dass sie sich beim Absinken wieder so stark

erwärmt hätte, dass sie wieder hoch geht.“ Aus wissenschaftlicher Sicht nicht angemessen erscheint die Annahme, dass die Luftdichte unter diesem Bereich überall gleich sei. Paul belegt seine Vorstellungen mit einem lebensweltlichen Vergleich: „Wenn man Sandkörner in einem Glas schüttelt, dann vertauschen die sich ja auch alle. Das ist, denke ich, so beim Wind auch.“

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Bernd</b> (Interview 10: 291-309)	Die Luft sinkt ab, bis sie sich wieder erwärmt hat. Wenn die Luft in den Tropen nur bis zu einer bestimmten Höhe absinkt, liegt dies daran, weil einfach bis 1000 Meter so eine Wärme herrscht, dass die Luft, die herab sinkt, ab 1000 Meter Höhe schon wieder diese Temperatur hat wie die Luft drunter und dadurch nicht niedriger sinkt, sondern einfach dort bleibt. Also ist einfach dieser Kreislauf in 1000 Meter Höhe und dieser Bereich von 0 bis 1000 hat eben eine konstante Temperatur. Und deswegen ist es dort ja auch immer so warm. In diesen Gegenden gibt es monatelang keine Niederschläge. Wenn die Luft herabsinkt bis auf 1000 Meter Höhe, nimmt die vielleicht nicht so viel Wasserdampf auf wie Luft, die 10 Meter oder 5 Meter über dem Boden ist. Und daher gelangt auch nicht so viel Wasserdampf in die obere Atmosphäre. So entstehen dann auch in dem Fall keine Wolken.

**Tabelle 89** Die Luft sinkt bis zum Boden ab (Beispiele von Lernaussagen, Teil 3).

Bernd artikuliert eine ähnliche, jedoch differenziertere Vorstellung. Er geht ebenfalls davon aus, dass die Lufttemperatur der absinkenden Luft ein Niveau erreicht, dass den weiteren Abstieg verhindert. Allerdings betrachtet er die Abwinde mit Hilfe des Behälter-Schemas relativ zur umgebenden Luft und kann daher den Zeitpunkt genauer erfassen: Das Absinken endet, wenn die Temperatur der sich vertikal bewegenden Luft der der Luft darunter entspricht. Dass beide Lerner dies etwa auf gleicher Höhe lokalisieren, ist durch die Interventionen während des Interviews bedingt. Wissenschaftler gehen von einer mittleren Höhe der Passatinversion bei etwa 1000 Meter über NN aus. Bernd schlussfolgert, dass weniger Wasserdampf in die obere Atmosphäre kommt und es daher weniger Niederschläge in diesen Gebieten gebe.

### 7.5.9 Fazit: Strukturierte Aussagen zum Urpassat

Typ (Nr.)	Lerner (Anmerkung)	Strukturierte Aussagen (verwendete Schema, sofern relevant)	Erfahrungen (e), Metaphern (m), Vergleiche (v)
Luft sinkt ab unter der Bedingung, dass sie schwer oder kalt ist. (22)	<b>Verena, Judith, Lara, Paul, Tobias, Simon</b>	Luft sinkt unter der Bedingung ab, dass sie schwer ist.	
	<b>Verena, Paul, Tobias</b>	Die Geschwindigkeit der absinkenden Luft ist von ihrer Schwere oder Temperatur abhängig.	Luft „fällt“ (m), Hagel fällt schneller als Regen (e)
	<b>Judith, Simon</b>	Die Geschwindigkeit der absinkenden Luft ist von der Geschwindigkeit des Abkühlens abhängig.	„Moleküle rutschen wieder näher zusammen, da sie nicht mehr so eine große Energie haben“ (m)
	<b>Lara</b>	Die Geschwindigkeit der absinkenden Luft ist von der nachströmenden Luft, vom Wind abhängig. (Teil-Ganzes-Schema)	Luft „strömt nach“ (m), Wind „nimmt Luft mit“ (m)

**Tabelle 90:** Luft sinkt ab unter der Bedingung, dass sie schwer oder kalt ist (strukturierte Lernaussagen).

Mit Hilfe der Leitfrage ‘Wie stellen sich die Lerner die Bedingungen vor, unter denen Luft in der Höhe absinkt?’ konnte ein Typ von Vorstellungen rekonstruiert werden, der davon ausgeht, dass Luft absinkt, wenn sie schwer ist. Diese Lerner betrachten auch aufsteigende Luft absolut, d.h. Dichte- oder Temperaturunterschiede zur umgebenden Luft werden nicht berücksichtigt. Wie schnell die Luft absinkt, hängt entweder von der Schwere oder Temperatur der Luft, von der Geschwindigkeit des

Abkühlens oder von nachströmender Luft ab. Die Schülerinnen und Schüler belegen ihre Aussagen mit Erfahrungen und nutzen Metaphern und Vergleiche zur Veranschaulichung. Das aus wissenschaftlicher Sicht wichtige Behälter-Schema, das einen Vergleich von absinkender und umgebender Luft ermöglicht, wird von den Lernern jedoch nicht herangezogen.

Typ (Nr.)	Lerner (Anmerkung)	Strukturierte Aussagen (verwendete Schema, sofern relevant)	Erfahrungen (e), Metaphern (m), Vergleiche (v)
Luft sinkt ab unter der Bedingung, dass sie schwerer oder kälter als etwas ist. (23)	Julian, Elena, Jan, Bernd	Luft sinkt ab, weil sie kälter und/oder schwerer ist als die umgebende Luft. (Behälter-Schema)	„gibt Wärme an irgendetwas ab“ (m)
	Julian, Elena, Jan, Bernd	Die Geschwindigkeit absinkender Luft ist vom Dichte- oder Temperaturunterschied zwischen absinkender und umgebender Luft abhängig. (Behälter-Schema)	dünnere Luft „leistet weniger Widerstand“ (m) Luft „fällt in die untere Schicht zurück“ (m), wie Bleigurt im Wasser (v), wie Gasblasen im Wasser (v)
	Jan, Bernd (widersprüchlich)	Die Geschwindigkeit absinkender Luft ist vom Druckunterschied abhängig. In der Höhe ist der Luftdruck niedriger als unten. (Behälter-Schema)	

**Tabelle 91:** Luft sinkt ab unter der Bedingung, dass sie schwerer oder kälter als etwas ist (strukturierte Lernaussagen).

Einige Lerner betrachten absinkende Luft relativ zur umgebenden Luft, um die Bedingungen des Absinkens näher beschreiben zu können. Sie gehen mit Hilfe des Behälter-Schemas von Dichte- oder Temperaturunterschieden aus, die die vertikalen Luftbewegungen initiieren. Diese aus wissenschaftlicher Sicht angemessene Vorstellung wird von den Lernern durch zahlreiche Metaphern und Vergleiche veranschaulicht, die die Besonderheit des Mediums Luft mit seiner sich ändernden Dichte jedoch nur unzureichend erfassen. Mit Ausnahme von Jan betrachten alle Lerner sich vertikal bewegende Luft bereits im Kontext Aufwinde relativ zur umgebenden Luft.

Typ (Nr.)	Lerner (Anmerkung)	Strukturierte Aussagen (verwendete Schema, sofern relevant)	Erfahrungen (e), Metaphern (m), Vergleiche (v)
Luft sinkt aus sonstigen Gründen ab. (24)	Kerstin, Hannah	Luft wird von Druckgebieten zum Absinken gebracht. (Drücken-Schema)	Luft „stößt“ auf ein Druckgebiet (m), die Druckgebiete treffen aufeinander (m), ein „Druckfeld“ (m) „überwiegt das andere“ (m), wie sich übereinander schiebende Erdplatten (v)
	Jana	Luft sinkt ab, weil sie neuen Wasserdampf braucht; der ist unten.	Luft „entlädt sich ihres Wasserdampfes“ (m), Luft „braucht neuen Wasserdampf“ (m),
	Emma	Luft sinkt in Form von Regen ab, wenn sich genügend Teilchen gesammelt haben. (Teil-Ganzes-Schema)	Luftteilchen „sammeln sich oben“ (m)
	Emma	Die Geschwindigkeit der absinkenden Luft ist vom Druckunterschied zwischen dem Hoch oben und dem Tief unten abhängig.	

**Tabelle 92:** Luft sinkt aus sonstigen Gründen ab (strukturierte Lernaussagen).

Ein dritter Typ von Vorstellungen konnte mit Hilfe der Leitfrage ‘Wie stellen sich die Lerner die Bedingungen vor, unter denen Luft in der Höhe absinkt?’ rekonstruiert werden. Diese Lerner gehen davon aus, dass Luft absinkt, weil sie von anderen Objekten dazu veranlasst wird (Kerstin, Hannah), bestimmte Absichten hat (Jana) oder in Form von Regen absinkt (Emma). Die wissenschaftliche Vorstellung zur Ursache horizontaler Luftbewegungen wird von Emma auf die Abwinde übertragen. So sei die Geschwindigkeit absinkender Luft vom Druckunterschied zwischen dem Hoch- in der Höhe

und dem Tiefdruckgebiet unten abhängig. Die Lerner nutzten zahlreiche Vergleiche und Metaphern, um ihre Vorstellungen zu veranschaulichen, welche allerdings alle aus wissenschaftlicher Sicht unangemessen sind.

Typ (Nr.)	Lerner (Anmerkung)	Strukturierte Aussagen (verwendete Schema, sofern relevant)	Erfahrungen (e), Metaphern (m), Vergleiche (v)
Die absinkende Luft erwärmt sich – Ursachen. (25)	<b>Julian, Judith, Hannah, Fabian</b>	Die absinkende Luft erwärmt sich durch die Wärme der Erdoberfläche, der sie sich nähert.	Moleküle brauchen länger, um sich zu erwärmen, weil sie so viele und so klein sind (e), Erde als „Hauptabgeber der Wärme“ (m), „Luft nimmt Wärme auf“ (m), absinkende Luft „fließt“ (m) „entgegen der Richtung der warmen, aufsteigenden Luftsäule“ (Julian), wie eine Autobahn (v), kalte Luftmoleküle strömen vorbei (m), kalte Luftsäule (m), die nach unten „fällt“ (m) (Julian), Erwärmung nicht „schlagartig“ (m), Luft legt sich auf das Relief drauf (m)
	<b>Rainer, Julian</b> (alternativ)	Die absinkende Luft erwärmt sich durch die Wärme der umgebenden Luft. (Behälter-Schema, Teil-Ganzes-Schema, Person-Schema)	Erwärmung als Angleichen an wärmere Luft (m)
	<b>Lara</b>	Die absinkende Luft erwärmt sich direkt durch die Sonne unten mehr, weil die Luft dichter ist.	Wärme aufnehmen (m)
	<b>Stefan</b>	Absinkende Luft erwärmt sich, weil sie sauerstoffreicher wird.	Sauerstoff macht Blut warm (e)
	<b>Fabian</b>	Die absinkende Luft erwärmt sich erst nahe der Erdoberfläche, weil sie sonst nicht absinken würde.	Luft erwärmt sich nicht, damit sie weiter absinken kann (m, teleologisch)

**Tabelle 93:** Die absinkende Luft erwärmt sich - Ursachen (strukturierte Lernaussagen).

Unter der Leitfrage 'Inwiefern stellen sich die Lerner vor, dass sich die Luft beim Absinken verändert?' konnten Vorstellungen rekonstruiert werden, die von einer Erwärmung der absinkenden Luft ausgehen und diese unterschiedlich begründen. Einige Lerner gehen in Analogie zu Erfahrungen mit Wärmequellen davon aus, dass sich absinkende Luft erwärmt, da sie sich der wärmeabgebenden Erdoberfläche nähert (Julian, Judith, Hannah, Fabian). Alternativ erscheint die Vorstellung, dass sich die Abwinde durch die umgebende Luft erwärmen (Julian, Rainer). Lara geht davon aus, dass Luft in Bodennähe dichter ist und sich daher stärker durch Sonnenstrahlung erwärmt als Luft in der Höhe. Stefan schlussfolgert, wie schon im Kontext Aufwinde, dass zunehmender Sauerstoffgehalt absinkende Luft erwärme. Fabian begründet die Erwärmung absinkender Luft teleologisch. Außerdem personifiziert er diese: Sie erwärme sich erst nahe der Erdoberfläche, da sie sonst nicht absinken würde. Die Lerner nutzen zahlreiche Metaphern und Vergleiche, um ihre Vorstellungen zu veranschaulichen. Aus wissenschaftlicher Sicht sind ihre Begründungen jedoch nicht korrekt. Wissenschaftler gehen von einer Erwärmung der absinkenden Luft durch adiabatische Kompression aus.

## Vorstellungen von Schülerinnen und Schülern zur Passatzirkulation

Typ (Nr.)	Lerner (Anmerkung)	Strukturierte Aussagen (verwendete Schema, sofern relevant)	Erfahrungen (e), Metaphern (m), Vergleiche (v)
Die absinkende Luft erwärmt sich – Folgen. (26)	Rita	Absinkende Luft erwärmt sich, wodurch die ihre Dichte größer wird. (Teil-Ganzes-Schema, Person-Schema)	
	Tim, Katja, Annika, Paul, Tobias (Problem)	Absinkende Luft kann/darf sich nicht zu stark erwärmen, weil sie sonst nicht mehr absinken würde. (Start-Weg-Ziel-Schema)	Luft „geht hoch“ um sich abzukühlen (m, teleologisch) – „beim Runtergehen“ (m)
	Paul, Tobias (Lösung)	Luft erwärmt sich beim Absinken sehr langsam und wird erst unten stärker erwärmt. (Start-Weg-Ziel-Schema)	

**Tabelle 94:** Die absinkende Luft erwärmt sich - Folgen (strukturierte Lernaussagen).

Ebenfalls unter der Leitfrage 'Inwiefern stellen sich die Lerner vor, dass sich die Luft beim Absinken verändert?' konnten Vorstellungen rekonstruiert werden, die sich mit den Folgen der Erwärmung der Luft beim Absinken befassen. Rita nimmt an, dass die Dichte der Luft größer wird, erläutert dies jedoch leider nicht weiter. Andere gehen davon aus, dass die Dichte der Luft durch die Erwärmung geringer wird. Diese Lerner betrachten die absinkende Luft absolut und nicht im Verhältnis zur umgebenden Luft. Daher fällt es ihnen schwer, zu begründen, warum warme Luft weiterhin absinken sollte. Sie lösen dieses Problem, indem sie eine langsame Erwärmung postulieren, die schließlich erst in Bodennähe intensiver wird.

Typ (Nr.)	Lerner (Anmerkung)	Strukturierte Aussagen (verwendete Schema, sofern relevant)	Erfahrungen (e), Metaphern (m), Vergleiche (v)
Die absinkende Luft erwärmt sich nicht – Ursachen. (27)	Emma	Luft erwärmt sich nicht beim Absinken, da ihr keine Energie zugeführt wird. (Person-Schema)	Teilchen nehmen Energie weg (m)
	Nele	Die Luft erwärmt sich nicht beim Absinken, sondern erst unten, da ihre Dichte dann größer ist.	

**Tabelle 95:** Die absinkende Luft erwärmt sich nicht – Ursachen (strukturierte Lernaussagen).

Andere Lerner gehen davon aus, dass sich die absinkende Luft nicht erwärmt. Emma begründet dies damit, dass den Abwinden keine Energie zugeführt würde. Nele setzt eine hohe Luftdichte für die Erwärmung voraus, die absinkende Luft in der Höhe nicht habe.

Typ (Nr.)	Lerner (Anmerkung)	Strukturierte Aussagen (verwendete Schema, sofern relevant)	Erfahrungen (e), Metaphern (m), Vergleiche (v)
Die Luft sinkt bis zum Boden ab – Ursachen. (28)	Björn	Die Luft sinkt bis zum Boden ab, weil sich die Luft erst hier wieder erwärmt. (Start-Weg-Ziel-Schema)	
	Katja	Die Luft sinkt bis zum Boden ab, weil sonst unten die Luft kalt wäre, alle warme Luft oben sein würde. (Start-Weg-Ziel-Schema)	beheizter Raum (e), absinkende Luft wird „gestoppt“ (m)
	Amelie	Die Luft sinkt bis zum Boden ab, weil man sonst unten keine Luft mehr kriegen würde, kein Sauerstoff da wäre, kein Austausch stattfinden könnte und/oder ein Unterdruck, dünnere Luft oder ein Vakuumraum entstehen würde. (Start-Weg-Ziel-Schema)	
	Lea	Die Luft sinkt bis zum Boden ab, weil Luft nicht einfach aufhören kann zu sinken. (Start-Weg-Ziel-Schema)	Luft kann nicht einfach aufhören zu sinken (m)

**Tabelle 96:** Die Luft sinkt bis zum Boden ab – Ursachen (strukturierte Lernaussagen).

Unter der Leitfrage 'Welche Vorstellungen haben die Lerner dazu, wie weit Luft absinkt?' konnten Vorstellungen identifiziert werden, die davon ausgehen, dass Luft bis zum Boden absinkt, dies jedoch unterschiedlich begründen. Björn belegt seine Annahme damit, dass sich die abgesunkene Luft erst in Bodennähe wieder erwärmt. Katja vergleicht den Vorgang mit einem geschlossenen Raum, der erwärmt wird. Amelie begründet ihre Behauptung mit teleologischen Überlegungen. Lea personifiziert die Luft und unterstellt ihr, dass sie nicht einfach aufhören kann zu sinken.

Typ (Nr.)	Lerner (Anmerkung)	Strukturierte Aussage (verwendete Schemata, sofern relevant)	Erfahrungen (e), Metaphern (m), Vergleiche (m)
Luft sinkt nur bis zu einer bestimmten Höhe ab – Ursachen. (29)	Kerstin, Lara	Luft sinkt nur bis zu einer bestimmten Höhe ab, weil darunter kein Platz mehr ist, Temperatur und/oder Luftfeuchtigkeit der Luft darunter zu hoch sind. (Start-Weg-Ziel-Schema)	
	Rita	Luft sinkt nur bis zu einer bestimmten Höhe ab, weil sie sich nicht an die feucht-warme Luft darunter anpassen kann. (Start-Weg-Ziel-Schema)	Luft kann sich nicht anpassen (m)
	Kerstin, Rita	Dieses Phänomen gibt es nur in den Tropen, da Luftfeuchtigkeit und –temperaturen hier viel höher oder intensiver sind.	
	Paul, Bernd	Luft sinkt nur bis zu einer bestimmten Höhe ab, weil sie sich beim Absinken wieder so stark erwärmt, dass sie aufsteigt. (Start-Weg-Ziel-Schema)	wie Sandkörner in einem Glas (v)
	Paul, Bernd	Die Folge ist, dass die Luft darunter immer warm ist, eine konstante Dichte hat und dass es nicht regnet.	
	Kerstin, Lara (Problem)	Müsste die Luft unten dann nicht vergammeln oder die absinkende oben sich stauen?	Luft „vergammelt“ (m), staut sich (m)
	Kerstin, Lara (Lösung)	Luft steigt auf, sinkt aber nicht ab oder umgekehrt.	

**Tabelle 97:** Luft sinkt nur bis zu einer bestimmten Höhe ab (strukturierte Lernaussagen).

Andere Lerner artikulieren die Vorstellung, dass die Luft in den Tropen nur bis zu einer bestimmten Höhe absinkt. Sie begründen dies unterschiedlich: Ab einer bestimmten Höhe sei „kein Platz mehr“ für die absinkende Luft. Die absinkende Luft könne sich nicht „anpassen“ oder erwärme sich so stark, dass sie wieder aufsteige. Zwei Lerner stellen sich vor, dass dennoch ein Teil der Luft aufsteigt oder absinkt. Wissenschaftler stellen sich in diesem Zusammenhang Gleichgewichtszustände vor, bei denen Auftriebs- und Gewichtskräfte relevant sind, die sie mit Hilfe von Ziehen- und Drücken-Schemata verstehen. Die Lerner greifen auf diese Schemata nicht zurück.

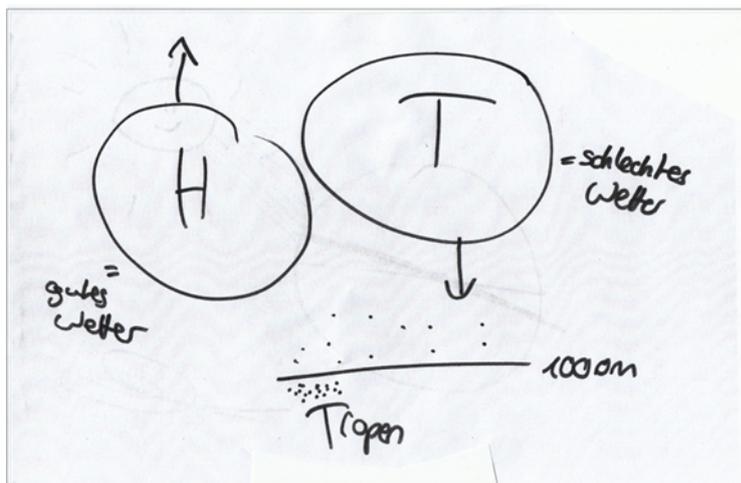
## 7.6 Aussagen zur Passatzirkulation

### 7.6.1 Ursachen und Folgen ohne Wechselwirkungen

Lerner	Geordnete Aussagen
Rita (Interview 1: 428-435, 454-458)	Ursächlich für den Passatwind könnte die Sonne sein. Der meiste Wind entsteht dort, wo Südost- und Nordostpassat aufeinander treffen.
Kerstin (Interview 1: 428-435, 454-458)	Ursächlich für das Wehen des Passatwindes könnten die Ozeane sein, hierüber nimmt die Geschwindigkeit zu. Da wo Südost- und Nordostpassat aufeinander treffen, ist der meiste Wind, vergleichbar mit dem Effekt, den man erzielt, wenn man zwei Föhne gegeneinander hält.

**Tabelle 98:** Ursachen und Folgen ohne Wechselwirkungen (Beispiele von Lernaussagen, Teil 1).

Unter der Leitfrage 'Welche Vorstellungen haben die Lerner zur Passatzirkulation?' konnten Vorstellungen identifiziert werden, die einfache Ursache-Folgen-Relationen beschreiben. Rita geht davon aus, dass die Sonne die Passatwinde initiiert, erläutert dies aber nicht weiter. Die Aussage erinnert an die historischen Vorstellungen Francis Bacons und Edmond Halleys, in denen die Sonne bzw. der Tagesgang der Sonne als Auslöser für die Passatwinde erachtet wird. Kerstin betrachtet die Ozeane als Ursache der Passatwinde, ebenfalls ohne dies weiter zu erläutern. Die Schülerinnen gehen davon aus, dass der meiste Wind in den Bereichen weht, in denen Nordost- und Südostpassate aufeinander treffen. Kerstin vergleicht dies mit zwei Föhnen, die man gegeneinander hält. Aus wissenschaftlicher Sicht ist das Gegenteil der Fall: Im Bereich der ITCZ schwächen sich die Passatwinde ab, da Luftdruckunterschiede geringer werden. Diese Winde bezeichnen die Wissenschaftler als Doldrums. Kerstin veranschaulicht ihre weiteren Vorstellungen mit Hilfe einer Zeichnung (siehe Abbildung 18). Sie verbindet mit Hochdruck gutes, mit Tiefdruck schlechtes Wetter. Beides versteht sie als Entitäten, die sich bewegen, das Hoch nach oben, das Tief nach unten.

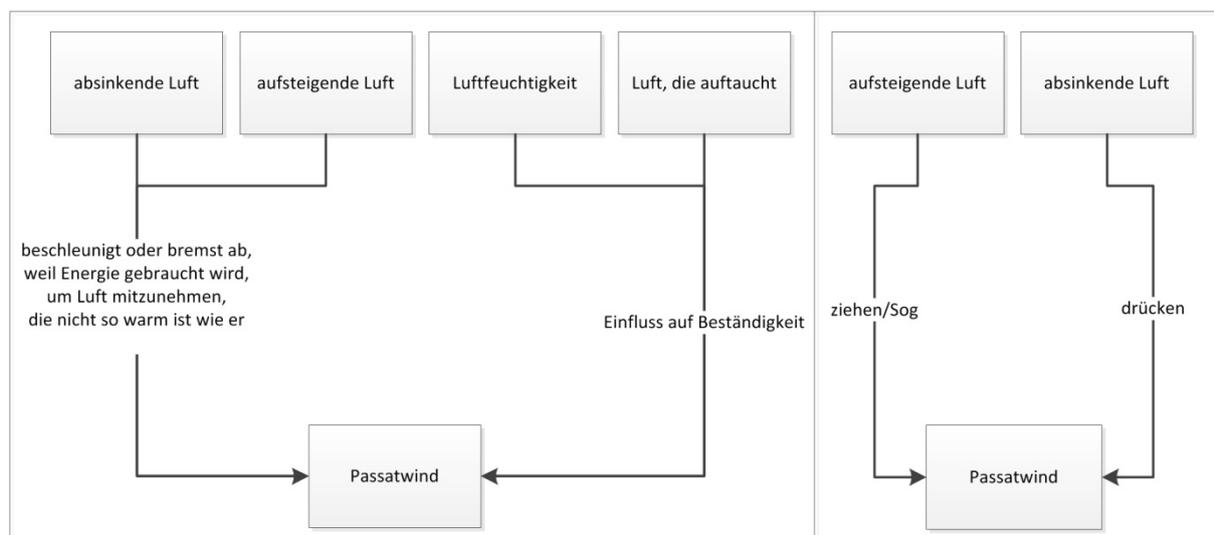


**Abbildung 18:** Hoch und Tief (Zeichnung von Kerstin).

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Emma</b> (Interview 5: 359-474)	Der Passatwind nimmt aufsteigende Luft einfach mit. Vielleicht wird er durch die aufsteigende oder absteigende Luft ein bisschen abgebremst, weil er mehr Energie braucht, um die aufsteigende Luft mitzunehmen, die nicht so warm ist wie er. Doch vielleicht wird der Wind durch aufsteigende Luft gar nicht abgebremst, sondern schneller? Dadurch weht er dann stärker, wenn er näher an den Äquator kommt. Ob der Passatwind beständig weht, weiß ich nicht. Es hängt ja nicht nur von Hochs und Tiefs ab, sondern auch davon, was zwischendurch passiert. Er muss ja eine ziemlich weite Strecke zurücklegen. Und dadurch dass da mal mehr oder weniger Luft auftaucht, auf dem Weg zum Beispiel mal mehr oder mal weniger Luftfeuchtigkeit hoch geht oder Luft mal mehr absinkt oder so, weht der Passatwind vermutlich nicht so konstant, obwohl Hoch und Tief konstant vorhanden sind.
<b>Hannah</b> (Interview 7:380-430)	Das drückt dann so von oben auf das andere und dann entsprechend weht dann der Passatwind. (Auf die Frage, welchen Einfluss aufsteigende Luft auf den Passatwind haben könnte:) Das zieht den so an, also wenn es Aufwind gibt, dann gibt es so einen Sog.

**Tabelle 99:** Ursachen und Folgen ohne Wechselwirkungen (Beispiele von Lerner Aussagen, Teil 2).

Differenzierte Vorstellungen artikulieren Emma und Hannah. Auch sie beschreiben Ursache-Folge-Relationen. Emma personifiziert den Passatwind und versteht ihn über das Person-Schema: Er nimmt Energie auf, um sich zu bewegen, also seinen Zustand zu ändern. Aufsteigende Luft könnte ihn abbremsen, da er Energie eventuell verbraucht, um diese „mitzunehmen“. Emma hält es jedoch auch für möglich, dass aufsteigende Luft den Passatwind beschleunigt, erläutert dies jedoch nicht weiter. Der Passatwind als Person müsse „eine ziemlich weite Strecke zurücklegen“. Es scheint, als ob sich Emma einen luftleeren Raum vorstellt, durch den sich der Passatwind als eine Art Entität bewegt und der bestimmte Hindernisse wie Luft, die „auftaucht“, „mal mehr oder mal weniger Luftfeuchtigkeit“ überwinden müsse, was Einfluss auf dessen Beständigkeit habe. Emma deutet an, dass die eigentliche Ursache dieser Bewegung mit Hoch und Tief zusammenhängt, erläutert dies jedoch leider nicht weiter. Hannah beschreibt den Einfluss von aufsteigender Luft und absinkender Luft mit Hilfe von Ziehen- und Drücken-Schemata. Erstere würde einen Sog verursachen, das letztere „drückt dann so von oben“ (siehe Abbildung 19).



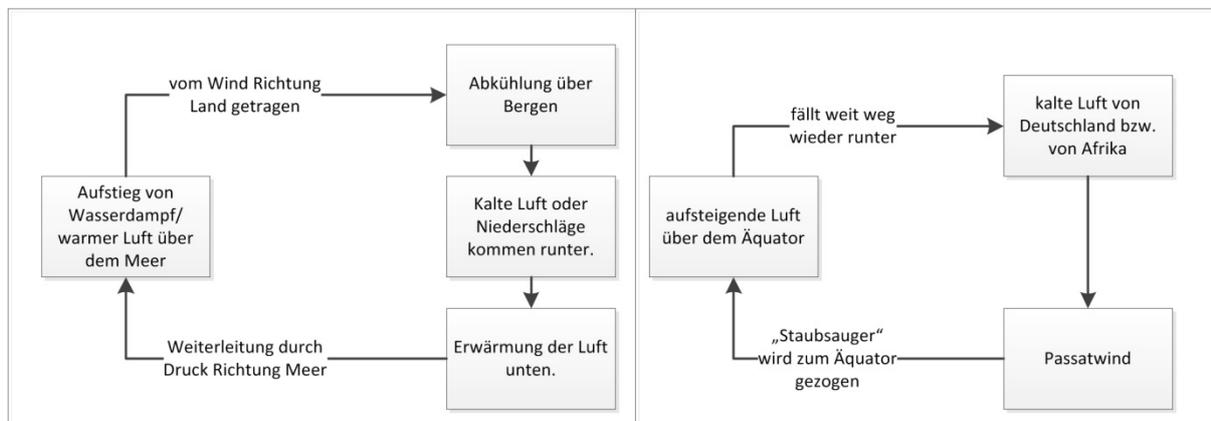
**Abbildung 19:** Vorstellungen von Ursachen des Passatwindes von Emma (links) und Hannah (rechts) (eigene Darstellung. Anmerkung: Viereck als Objekt/Entität).

### 7.6.2 Die Passatzirkulation als lineares System

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Judith</b> (Interview 3: 404, 569-645)	Der Passatwind weht beständig, weil er von der absinkenden Luft verdrängt wird. Er ist ein Rückfluss im Rahmen eines Kreislaufes. Wenn die Passatwinde der beiden Halbkugeln aufeinander treffen, entweichen sie nach oben, weil unten kein Platz ist. Dass diese Aufwinde Auswirkungen auf den Passatwind haben, kann ich mir nicht vorstellen. Sie bilden lediglich die Rücklage für den nächsten Passatwind.
<b>Katja</b> (Interview 3: 219, 602-613, 622-645)	Die ganzen Winde werden wieder zum Äquator zurückgeweht. Wegen dem Kreislauf weht der Passatwind beständig. Irgendwo vermischen sich die Passatwinde der beiden Halbkugeln. Und dann steigen sie wieder auf und so weiter. Also, es wiederholt sich.
<b>Paul</b> (Interview 8: 273-331)	Über dem Meer steigt Wasserdampf auf und wird vom Wind Richtung Land getragen. Über den Bergen wird es kälter und die kalte Luft oder die Niederschläge kommen runter. Unten wird die Luft wieder erwärmt und es entsteht Wind Richtung Meer. Die aufsteigende Luft über dem Meer ist wärmer als die abkühlende über den Bergen und dadurch entsteht ein kleiner Wind. Der Wind wird durch den Druck weitergeleitet. Das wäre dann der Kreislauf.
<b>Bernd</b> (Interview 10: 315-396)	Die aufsteigende Luft über dem Äquator ist sozusagen wie so ein Staubsauger, der über den Tropen ist und sozusagen die ganze Luft so wegzieht. Auf dem Äquator ist es ja beständig warm und wenn der Passatwind dem nahe kommt, weht der ja stärker, weil die Luft schneller erwärmt wird. Dass die kalte Luft von Deutschland oder beziehungsweise von Afrika und so sozusagen hier hingezogen wird, weil sie sich hier erwärmt und weil sie sich erwärmt, steigt sie auf. So (Gestik: Armbewegung deutet konvergierende Luftmassen am Boden an, die anschließend aufsteigen). Und wenn sie oben ist, fällt sie wieder runter und fällt weit weg runter und nicht direkt runter (Gestik: Armbewegung deutet divergierende Luftmassen in der Höhe an, die mit Abstand absinken).

**Tabelle 100:** Die Passatzirkulation als lineares System (Beispiele von Lernaussagen).

Während Rita, Kerstin, Emma und Hannah lediglich Ursache-Folge-Relationen beschreiben, begreifen andere Lerner die Passatzirkulation als lineares System, bei dem Vorgänge nacheinander, jedoch nicht gleichzeitig stattfinden. Dies konnte ebenfalls unter der Leitfrage 'Welche Vorstellungen haben die Lerner zur Passatzirkulation?' herausgearbeitet werden. Diese Linearität äußert sich durch bestimmte Schlüsselwörter: Judith spricht von „Rückfluss“ und einer „Rücklage für den nächsten Passatwind“. Katja und Paul erläutern, dass die Luft „wieder“ aufsteigt, „es wiederholt sich“ (Katja), die Luft „fällt wieder runter“ (Bernd). Judith geht von einem Kreislauf aus, der durch die absinkende Luft initiiert wird. Diese „verdrängt“ die Luft, wodurch der Passatwind weht. Weil „unten kein Platz ist“, steigt die Luft im Bereich der inneren Tropen schließlich auf, was jedoch keine Auswirkungen auf den Passatwind habe. Sie begreift diese Vorgänge also über das Drücken-Schema. Katja geht ebenfalls von einem „Kreislauf“ aus, ohne die genauen Ursachen und Folgen näher zu beschreiben.



**Abbildung 20:** Vorstellungen von Paul (links) und Bernd (rechts) zur Passatzirkulation (eigene Darstellung. Anmerkung: Pfeile als „führt zu“, sofern nicht anders beschriftet).

Paul und Bernd entwickeln differenzierte Vorstellungen (siehe Abbildung 20). Paul verortet die Passatzirkulation zwischen Meer und Land. Er geht davon aus, dass die Niederschläge räumlich versetzt und nicht im Bereich über der aufsteigenden Luft stattfinden. Warum die Luft im Bereich der Berge abkühlt, erläutert er leider nicht. Er personifiziert den Wind, der Wasserdampf Richtung Land trägt. Als Ursache horizontaler Luftbewegungen scheint er Druck anzusehen, also auf die bereits beschriebene Vorstellung zur Windentstehung durch Drücken zurückzugreifen. Bernd geht davon aus, dass die Passatzirkulation auch Luft aus Deutschland beeinflusst. Diese werde von aufsteigender Luft über dem Äquator „wie so ein Staubsauger“ angezogen. Er begreift diese Vorgänge also über das Ziehen- und Drücken-Schema. Umso stärker die Erwärmung der Luft in Äquatornähe sei, desto schnelle würde der Passatwind wehen. Die Zeichnungen von Nele und Katja lassen ebenfalls lineare Ideen erkennen (Abbildung 21). Nele kennzeichnet mit Farben, dass die Luft links aufsteigt. Der Weg der Sonnenstrahlen ist hier kürzer. Katja deutet Pfeile an. Diese könnten, wie die Striche bei Nele, als Entitäten gedeutet werden, die sich permanent im Kreis bewegen.

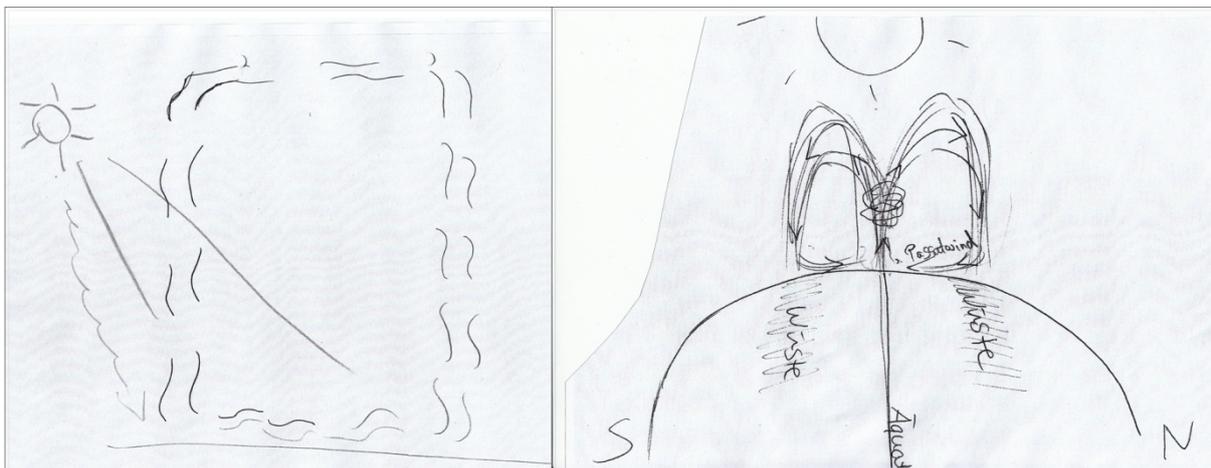
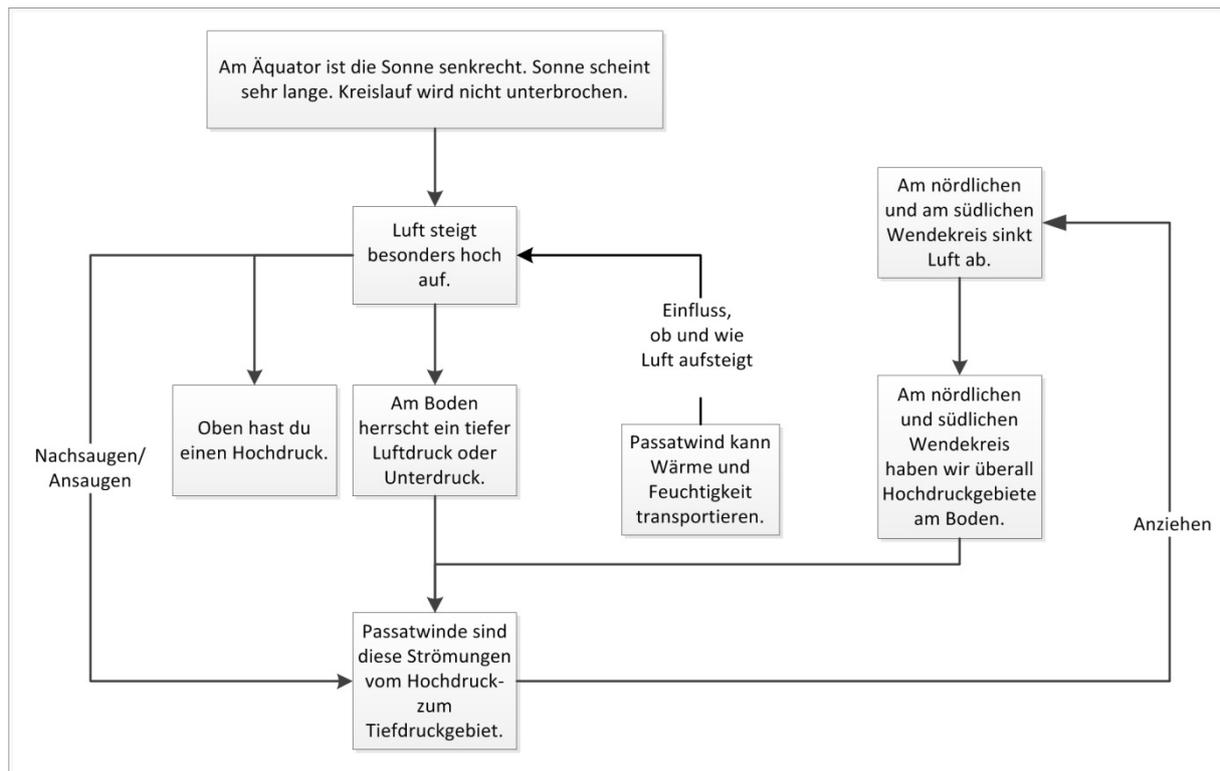


Abbildung 21: Die Passatzirkulation als lineares System (Zeichnungen von Nele links und Katja rechts).

### 7.6.3 Die Passatzirkulation als komplexes System mit Wechselwirkungen

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Julian</b> (Interview 2: 119-124, 177-183, 367-427)	Also, sagen wir, es ist Herbst oder Frühling, dann ist am Äquator die Sonne senkrecht. Dort herrscht am Boden ein tiefer Luftdruck oder Unterdruck, weil da die Luft aufsteigt. Oben hast du einen Hochdruck. Am nördlichen Wendekreis und am südlichen Wendekreis haben wir überall am Boden Hochdruckgebiete, weil dort die Luft absinkt. Passatwinde sind ja dann diese Strömungen vom Hochdruck- zum Tiefdruckgebiet. Die aufsteigende Luft saugt die Passatwindluft nach. Aufsteigende Luft ist ja erst mal der Grund für die Entstehung des Passatwindes. Weil Luft aufsteigt, wird der angesaugt. Vielleicht steigt deswegen die Luft so hoch auf, weil sie eben nachgesaugt wird und der Kreislauf nicht unterbrochen wird. Bei uns ist der Kreislauf unterbrochen, da längere Zeit mal die Sonne nicht scheint oder im Winter der Einstrahlungswinkel der Sonne zu flach ist. Der Passatwind hat natürlich auch Einfluss auf die aufsteigende und fallende Luft, weil er sozusagen die fallende Luft anzieht und dort, wo die aufsteigende Luft aufsteigt, sozusagen neue Luft hin transportiert, damit dort überhaupt noch etwas ist zum Aufsteigen. Und zum anderen, weil er ja auch Wärme transportieren kann und auch Feuchtigkeit, was ja alles Einfluss darauf hat, ob Luft aufsteigt und wie Luft aufsteigt. Das ist alles zusammen der Passatkreislauf.

Tabelle 101: Die Passatzirkulation als komplexes System mit Wechselwirkungen (Beispiele für Lerner aussagen, Teil 1).



**Abbildung 22: Vorstellung von Julian zur Passatzirkulation (eigene Darstellung. Anmerkung: Pfeile, sofern nicht beschriftet als „führt zu“).**

Mit Hilfe der Leitfrage 'Welche Vorstellungen haben die Lerner zur Passatzirkulation?' konnten Vorstellungen rekonstruiert werden, die die Passatzirkulation als ein komplexes System mit Wechselwirkungen erfassen. So finden Prozesse gleichzeitig statt und beeinflussen sich gegenseitig. Eine solche Idee artikuliert Julian (siehe Abbildung 21): Die aufsteigende Luft saugt die Passatwinde an, diese wiederum ziehen die absinkende Luft im Bereich der Wendekreise an. Er versteht diese Prozesse mit Hilfe von Ziehen- und Drücken-Schemata und veranschaulicht eine Ursache der Luftbewegung über die Metapher des Saugens. Diese Vorgänge erzeugen Hochdruckgebiete im Bereich der aufsteigenden Luft in der Höhe und im Bereich der absinkenden Luft am Boden bzw. ein Tiefdruckgebiet im Bereich aufsteigender Luft am Boden. Julian spricht von „Unterdruck“. Die Bewegungen der Luft veranschaulicht er über das metaphorische Konzept 'Wind ist fließendes Wasser', indem er die Passatwinde als „Strömungen“ bezeichnet. Außerdem personifiziert er den Wind, um seine Eigenschaften zu veranschaulichen: So könne er Wärme und Feuchtigkeit „transportieren“, was Auf- und Abwinde beeinflusse. Dass eine solche Zirkulation nur in den Tropen zu finden sei, führt er auf den steilen Einstrahlungswinkel und die damit intensive Sonneneinstrahlung zurück, die diese Prozesse initiieren würde: „Bei uns ist der Kreislauf unterbrochen, da längere Zeit mal die Sonne nicht scheint oder im Winter der Einstrahlungswinkel der Sonne zu flach ist“. Seine Aussagen zur Himmelsmechanik, dem senkrechten Einstrahlungswinkel der Sonne über dem Äquator im Frühling und Herbst, entsprechen den wissenschaftlichen Vorstellungen, nicht jedoch die Annahme einer Zirkulation, die auch die gemäßigten Breiten umfasst.

Er veranschaulicht seine Aussagen mit zwei Zeichnungen (siehe Abbildung 23). Auch er verwendet Pfeile, um die Bewegungen der Luft zu veranschaulichen. Die Verortung von Hoch- und Tiefdruckgebieten erscheint aus wissenschaftlicher Sicht ebenso angemessen wie die Darstellung der jahreszeitlichen Verschiebungen.

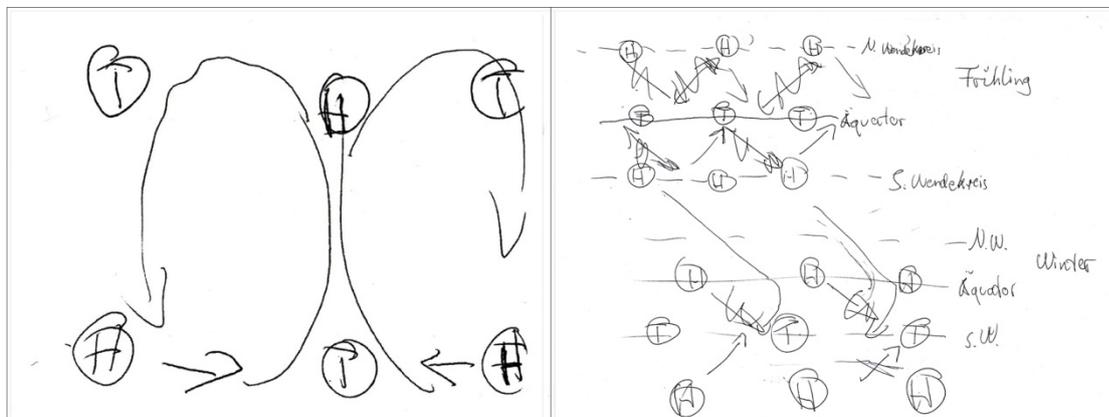


Abbildung 23: Die Passatzirkulation im vertikalen Querschnitt und als Draufsicht (Zeichnungen Julians links und rechts).

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Tim</b> (Interview 2: 367-391, 415-425)	(Nach Julians Erläuterung der Wechselwirkungen im Passatkreislauf:) Dann hat ja alles eine Auswirkung auf das andere. Ja, wir haben ja jetzt hier einen Kreis. Da berührt jedes das andere, also irgendwann. Das heißt, wenn jetzt zum Beispiel dieser Höhenwind relativ warm ist, dann wird auch der Passatwind wärmer als wenn der Höhenwind kälter wäre. Quasi. Oder schneller oder schwächer. Und alle anderen auch.
<b>Jan</b> (Interview 10: 315-396)	Ich habe die Vermutung, dass bei uns im Winter die Luft nicht warm genug ist, um aufzusteigen und dann einfach sich staut und zu den Tropen hingedrückt wird, sich dort erwärmt. Und dann wird sie dort hochgezogen. Wenn mehr Luft aufsteigt, gibt es auch automatisch einen stärkeren Höhenwind. Durch den stärkeren Höhenwind gibt es auch mehr kalte Luft, die absinkt. Und dadurch wird dann der Passatwind wieder beeinflusst. Also weil dann einfach mehr Luft aufsteigt, dadurch wird mehr Luft nachgezogen. Ja, durch dieses ansaugen.  Also, sie erwärmt sich und steigt auf und dadurch ist halt der Kreislauf zum Äquator hin. Also der Wind weht zum Äquator. Im Sommer auf der NHK ist der Passatwind etwas schwächer, weil der Temperaturgegensatz zwischen unseren Breiten und den Tropen nicht so groß ist.

Tabelle 102: Die Passatzirkulation als komplexes System mit Wechselwirkungen (Beispiele für Lernaussagen, Teil 2).

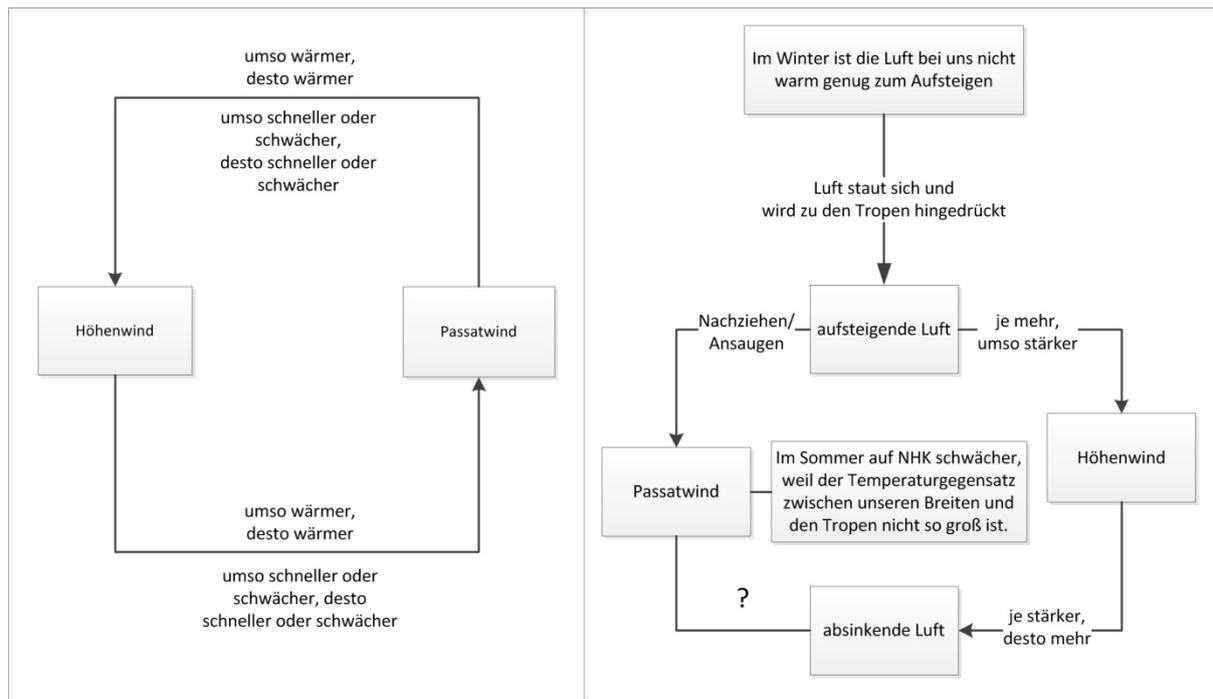


Abbildung 24: Vorstellungen von Tim (links) und Jan (rechts) zur Passatzirkulation (eigene Darstellung).

Tim greift Julians Ideen auf und entwickelt hieraus die Vorstellung, dass Passat- und Höhenwind sich sehr umfassend gegenseitig in ihrer Temperatur oder Geschwindigkeit beeinflussen (siehe Abbildung 24 links). Er personifiziert die Winde und versucht darüber die Beeinflussung zu veranschaulichen: „Da berührt jedes das andere“. Aus wissenschaftlicher Sicht werden diese Wechselwirkungen in Bereichen betrachtet, bei denen sie so nicht direkt stattfinden. Die Geschwindigkeit der Passatwinde übt keinen direkten Einfluss auf die der aufsteigenden Luft im Bereich der ITCZ aus. Allerdings erzeugt diese ein Tiefdruckgebiet, welches die Passatwinde beeinflusst. Die Temperatur der Aufwinde bedingt in erster Linie, wie weit diese aufsteigen, nicht jedoch, wie warm die Höhenwinde sind. Jan (siehe Abbildung 24 rechts) verortet Einflüsse der Passatzirkulation bis nach Deutschland. So könne Luft bei uns im Winter nicht aufsteigen und werde in Richtung Äquator gedrückt. Er versteht Windentstehung also über das Drücken-Schema. Zudem verwendet er das metaphorische Konzept `Wind ist fließendes Wasser`: Die Luft wird im Winter in Deutschland „gestaut“ und zu den Tropen „hingedrückt“. Da der Temperaturgegensatz zwischen Äquator und unseren Breiten im Sommer auf der Nordhalbkugel geringer sei, wehe der Passatwind in dieser Zeit weniger stark. Jan personifiziert den Wind, um die Vorgänge zu veranschaulichen. In Äquatornähe wird die Luft „hochgezogen“ und „angesaugt“. Ein starker Höhenwind habe mehr absinkende Luft zur Folge. Er „beeinflusst“ den Passatwind. Jan erläutert jedoch nicht, inwiefern. Aus wissenschaftlicher Sicht sind diese Vorstellungen nur bedingt angemessen. Wissenschaftler gehen von einer jahreszeitlichen Verschiebung der gesamten Systems nach Norden bzw. Süden aus, wobei sie annehmen, dass sich die Passatzirkulation bis etwa 30°N bzw. 30°S erstreckt.

### 7.6.4 Der Passatwind ändert seine Richtung aufgrund der Erdrotation

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Judith</b> (Interview 3: 404, 569-645)	Die Richtung des Passatwindes könnte mit der Erdrotation zusammenhängen. Er weht aus nord- bzw. südwestlicher Richtung. Wenn es wirklich etwas mit der Rotation zu tun hat, dann müsste die Luft ja eigentlich nach Osten gehen. Und dann würde die schwerere Luft praktisch wie in einer Zentrifuge fast nicht mitkommen. Das heißt, die schwere Luft würde zwar auch der Erddrehung nach Osten folgen, aber eben viel langsamer. Und das würde dann wiederum keinen Sinn ergeben, weil Wind ja stärker als die Erddrehung von der Geschwindigkeit her ist.
<b>Emma</b> (Interview 5: 359-474)	Die Richtungsänderung der Passatwinde könnte etwas mit der Erdrotation zu tun haben. Je näher man an den Äquator kommt, umso schneller wird die Geschwindigkeit, mit der sich die Erde dreht. Wind, der nach Norden oder Süden weht, hat dann eine andere Geschwindigkeit als die sich drehende Erde.

**Tabelle 103:** Der Passatwind ändert seine Richtung aufgrund der Erdrotation (Beispiele von Lernaussagen).

Mit Hilfe der Leitfrage 'Welche Vorstellungen haben die Lerner zur Passatzirkulation?' konnten Aussagen identifiziert werden, die von einem Einfluss der Erdrotation auf die Bewegungsrichtung des Passatwindes ausgehen. Diese werden von Lernern artikuliert, die schon im Kontext Antipassat von einem solchen Einfluss ausgehen. Judith vergleicht das trägheitsbedingte Zurückbleiben der Luft mit Prozessen in einer Zentrifuge. Die Erde dreht sich nach Osten und „die schwere Luft“ folgt ihr, „aber eben viel langsamer“. Luft wird also personifiziert, um die Art der Bewegung zu veranschaulichen. Die daraus resultierende Bewegungsrichtung ist die nach Westen. Diese Vorstellung erinnert an die Aussagen Galileis, der die Passate ebenfalls als das Resultat einer Relativbewegung von Luft zu Erdoberfläche betrachtet. Judith äußert jedoch Zweifel an ihrer eigenen Behauptung, da sie Windgeschwindigkeiten höher erachtet als die der Erdrotation - aus wissenschaftlicher Sicht eine Fehleinschätzung. Zudem bleibt unklar, warum die Passatwinde aus nord- bzw. südwestlicher Richtung wehen sollten. Wissenschaftler gehen von Nord- bzw. Südostpassaten aus. Emma artikuliert die Vorstellung, dass die Passatwinde mit Annäherung an den Äquator höheren Rotationsgeschwindigkeiten ausgesetzt sind. Leider nennt sie nicht explizit die hieraus resultierende Bewegungsrichtung. Sie spricht nur von Norden oder Süden. Ihre Äußerungen ähneln jedoch der historischen Vorstellung Hadleys, die in ihren Grundzügen noch heute wissenschaftlich anerkannt ist.

### 7.6.5 Der Passatwind ändert seine Richtung aufgrund von Zusammenstößen

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Sophie</b> (Interview 4: 303-326)	Die Winde bewegen sich aufeinander zu, treffen sich und wehen schließlich gemeinsam in eine neue Richtung. Treffen Passatwind und Aufwind aufeinander, gehen sie gemeinsam nach oben.
<b>Amelie</b> (Interview4: 303-326)	(Stimmt Sophie zu, die sagt, dass die aufeinander treffenden Winde gemeinsam in eine bestimmte neue Richtung weiter wehen.) Ja natürlich beeinflusst sich das. Das ist wie wenn zwei Menschen aus verschiedenen Richtungen aufeinanderprallen. Dann gehen die so ineinander und fliegen so in dieselbe Richtung.

**Tabelle 104:** Der Passatwind ändert seine Richtung aufgrund von Zusammenstößen (Beispiele für Lernaussagen, Teil 1).

Die Leitfrage 'Welche Vorstellungen haben die Lerner zur Passatzirkulation?' ermöglichte auch die Rekonstruktion von Vorstellungen, die davon ausgehen, dass der Passatwind aufgrund von Zusammenstößen seine Richtung ändert. Diese Vorstellungen artikulieren sie bereits im Kontext Antipassat. Winde werden dabei als Entitäten aufgefasst, die aufeinander treffen können, ähnlich wie zwei Objekte, und dadurch eine neue Bewegungsrichtung erhalten (Sophie, Amelie). Amelie

vergleicht den Vorgang mit dem „(A)ufeinanderprallen“ zweier Menschen aus verschiedenen Richtungen. Die Winde, beispielsweise Passatwind und Aufwind (Sophie), würden nach diesem Ereignis „gemeinsam“ in dieselbe Richtung „fliegen“ (Amelie) oder „gehen“ (Sophie). Der Wind wird also personifiziert, um die Art der Bewegung zu veranschaulichen.

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Annika</b> (Interview 6: 336-437)	Der Passatwind weht auf der Nordhalbkugel von Nordosten. Er ändert seine Richtung, je näher er an den Äquator kommt, weil es dort ja heißer wird. Da prallen dann 2 Luftsarten aufeinander.
<b>Alina</b> (Interview 7: 380-430)	Der Passatwind könnte seine Richtung ändern wegen eines anderen Windes. Ja, die stoßen sich halt an. Oder vielleicht verschmelzen sie auch.

**Tabelle 105:** Der Passatwind ändert seine Richtung aufgrund von Zusammenstößen (Beispiele für Lerner aussagen, Teil 2).

Annika und Alina betrachten Luft oder Wind ebenfalls als Entitäten. Sie „stoßen sich halt an“ (Alina) oder „verschmelzen“ auch (Alina). Die Idee der „Luftsarten“, mit der Annika bereits die Änderung der Bewegungsrichtung des Antipassats erklärt hat, greift sie in diesem Kontext erneut auf. Sie erläutert, dass die Luft in Äquatornähe heißer sei und daher eine Richtungsänderung des Passatwindes bewirke.

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Stefan</b> (Interview 8: 273-331)	Wind könnte vielleicht seine Richtung ändern, weil er von anderer Luft verdrängt oder abgelenkt wird. Dass dann ein anderer Wind kommt und ihn so (Gestik: anderer Arm deutet aufsteigenden Wind an, der mit horizontalem Wind kollidiert und eine Richtungsänderung zur Folge hat) rüber lenkt.
<b>Paul</b> (Interview 8: 273-331)	Eine Richtungsänderung könnte dadurch entstehen, dass der Wind durch Druck irgendwo abgelenkt wird. Der Passatwind könnte einfach vom Äquator weggedrängt werden. Ich denke, es kommt sogar auf die Druckwelle drauf an, weil er könnte ja dann wieder sogar zurück abgelenkt werden, zwar nicht gerade, aber das er gerade über den Äquator kommt oder aber über den Äquator und wird trotzdem abgelenkt.

**Tabelle 106:** Der Passatwind ändert seine Richtung aufgrund von Zusammenstößen (Beispiele für Lerner aussagen, Teil 3).

Stefan und Paul begreifen die Änderung der Bewegungsrichtung des Passatwindes über das Drücken-Schema. Der Wind werde von anderer Luft „verdrängt“ (Stefan), „weggedrängt“ (Paul), „durch Druck irgendwo abgelenkt“ (Paul), durch eine „Druckwelle“ (Paul). Stefan und Paul verstehen Windentstehung ebenfalls über das Drücken-Schema. Luftbewegungen werden nach ihrer Vorstellung also durch äußere Impulse ausgelöst. Auch sie verstehen den Wind in diesem Kontext als Entität und sie personifizieren ihn: Er „kommt“ über den Äquator (Paul), lässt sich ablenken (Stefan, Paul).

## 7.6.6 Fazit: Strukturierte Aussagen zur Passatzirkulation

Typ (Nr.)	Lerner (Anmerkung)	Strukturierte Aussagen (verwendete Schema, sofern relevant)	Erfahrungen (e), Metaphern (m), Vergleiche (v)
Ursachen und Folgen ohne Wechsel- wirkungen. (30)	Rita, Kerstin	Ursächlich für den Passatwind könnten die Sonne oder die Ozeane sein.	
	Rita, Kerstin	Der meiste Wind ist dort, wo Nordost- und Südostpassat aufeinander treffen.	wie zwei Föhne, die man gegeneinander hält (v)
	Emma	Die Beständigkeit des Passatwindes hängt von der Menge, Feuchtigkeit und Temperatur der Luft ab, die auftaucht und mitgenommen wird. (Person-Schema, Start-Weg-Ziel-Schema)	
	Emma	Der Passatwind nimmt aufsteigende oder absinkende Luft mit, wodurch er langsamer wird, weil er Energie verbraucht. (Person-Schema, Start-Weg-Ziel-Schema)	Passatwind nimmt Luft mit (m), wird abgebremst (m), braucht Energie (m), Luft taucht auf (m),
	Emma (alternativ)	Der Passatwind nimmt aufsteigende oder absinkende Luft mit, wodurch er schneller wird, denn er weht stärker, je näher er an den Äquator kommt. (Person-Schema, Start-Weg-Ziel-Schema)	
	Hannah	Der Passatwind wird durch absinkende Luft gedrückt und durch aufsteigende Luft gezogen. (Ziehen-Schema, Drücken-Schema)	Wind/Luft drückt und zieht (m)

Tabelle 107: Ursachen und Folgen ohne Wechselwirkungen (strukturierte Lernaussagen).

Unter der Leitfrage 'Welche Vorstellungen haben die Lerner zur Passatzirkulation?' konnten Aussagen identifiziert werden, die Ursache-Folgen-Relationen ohne Wechselwirkungen beschreiben. Die Lerner verstehen die Ursachen und Folgen mit Hilfe von Ziehen- und Drücken-Schemata: Der Passatwind wird durch absinkende Luft gedrückt und aufsteigende gezogen oder über das Person-Schema, der Passatwind braucht und verbraucht Energie, um sich bewegen zu können. Der Einfluss von Ozeanen oder Sonne wird angedeutet, aber nicht näher erläutert. Die historischen Vorstellungen von Francis Bacon und Edmond Halley gehen ebenfalls von einem starken Einfluss der Sonne aus. Die Annahme, dass im Bereich der inneren Tropen durch das Konvergieren der Passate der meiste Wind weht, steht im Widerspruch zur wissenschaftlichen Vorstellung. Kerstin vergleicht die Situation mit zwei Föhnen, die gegeneinander gehalten werden. Die Lerner nutzten weitere Metaphern, um Eigenschaften von Luft oder Wind zu veranschaulichen.

Typ (Nr.)	Lerner (Anmerkung)	Strukturierte Aussagen (verwendete Schema, sofern relevant)	Erfahrungen (e), Metaphern (m), Vergleiche (v)
Die Passat- zirkulation als lineares System. (31)	Judith, Katja	Die Passatwinde wehen am Äquator zusammen, steigen auf, sinken ab und wehen als Passatwind wieder zum Äquator. (Drücken-Schema, Start-Weg-Ziel-Schema)	„Rückfluss“ (m), „Rücklage“ (m), „entweichen nach oben, weil unten kein Platz“ (m), Passatwinde „vermischen sich“ (m)
	Paul	Über dem Meer steigen Wasserdampf und warme Luft auf und werden vom Wind Richtung Land getragen. Über den Bergen kommt es zur Abkühlung und zum Absinken von kalter Luft und Regen. Unten erwärmt sich die Luft wieder und wird durch Druck Richtung Meer geleitet. (Drücken-Schema, Start-Weg-Ziel-Schema)	ein „kleiner Wind“ entsteht (m), Luft wird vom Wind „getragen“, Wind wird durch „Druck“ weiter geleitet (m),
	Bernd	Die aufsteigende Luft über dem Äquator ist wie ein Staubsauger, der den Passatwinde und kalte Luft von Deutschland bzw. Afrika anzieht. Diese steigt auf und sinkt nach polwärtiger Bewegung wieder ab. (Drücken-Schema, Ziehen-Schema, Start-Weg-Ziel-Schema)	aufsteigende Luft zieht Luft weg bzw. Luft wird hingezogen (m), Ziehen (e), Luft fällt runter (m) aufsteigende Luft wie ein Staubsauger (v)
	Bernd	Je stärker die aufsteigende Luft zieht, umso schneller erwärmt sich die angezogene Luft.	

**Tabelle 108:** Die Passatzirkulation als lineares System (strukturierte Lernaussagen).

Einige Lerner betrachten den Passatwind als lineares System, d.h. Prozesse laufen zeitlich nacheinander ab. So sprechen sie beispielsweise vom „nächsten Passatwind“, betonen, „es wiederholt sich“, erläutern, die Luft „fällt wieder runter“ und erwähnen, dass sich die Luft „wieder erwärmt“. Sie begreifen die Ursache der Bewegungen der Luft über Drücken- und Ziehen-Schemata. So wird Wind beispielsweise „durch den Druck weitergeleitet“. Die Aufwinde wirken „wie ein Staubsauger“. Die Lerner nutzen zudem zahlreiche Metaphern, um ihre Vorstellungen zu veranschaulichen.

Typ (Nr.)	Lerner (Anmerkung)	Strukturierte Aussagen (verwendete Schema, sofern relevant)	Erfahrungen (e), Metaphern (m), Vergleiche (v)
Die Passatzirkulation als komplexes System mit Wechselwirkungen. (32)	Julian, Jan	Passatwinde sind diese Strömungen vom Hochdruck- zum Tiefdruckgebiet. Sie werden durch aufsteigende Luft angesaugt und ziehen absinkende Luft über den Wendekreisen nach, was Einfluss auf die aufsteigende Luft hat. (Ziehen-, Drücken-Schema, Start-Weg-Ziel-Schema)	Passatwinde als „Strömungen“ (m), aufsteigende Luft saugt Passatwindluft nach oder angesaugt (m), Passatwind zieht fallende Luft an (m), „hochgezogen“ (m), „ansaugen“ (m), „beeinflussen“ (m)
	Julian	Am Äquator ist die Sonne senkrecht und sie scheint sehr lange, daher wird der Kreislauf nicht unterbrochen.	Kreislauf wird nicht „unterbrochen“ (m)
	Julian	Passatwinde transportieren Luft, Wärme und Feuchtigkeit und beeinflussen damit, ob und wie Luft aufsteigt.	Passatwind transportiert Luft, Wärme und Feuchtigkeit (m)
	Tim	Alles hat Auswirkungen auf das andere. Wenn der Höhenwind relativ warm oder schnell ist, wird der Passatwind ebenfalls wärmer oder schneller sein und alle anderen auch.	Wind/Luft „berührt“ andere (m)
	Jan	Im Winter ist die Luft bei uns nicht warm genug zum Aufsteigen. Sie staut sich und wird zu den Tropen hingedrückt. (Drücken-Schema)	Luft wird „gestaut“ (m) und zu den Tropen „hingedrückt“ (m)
	Jan	Im Sommer auf der Nordhalbkugel weht der Passatwind schwächer, weil der Temperaturgegensatz zwischen unseren Breiten und den Tropen nicht so groß ist.	
	Jan	Je mehr Luft aufsteigt, umso stärker weht der Höhenwind. Je stärker dieser weht, umso mehr Luft sinkt ab.	

**Tabelle 109:** Die Passatzirkulation als komplexes System mit Wechselwirkungen (strukturierte Lernaussagen).

Andere Lerner artikulieren Vorstellungen zur Passatzirkulation, die diese als komplexes System mit Wechselwirkungen erfasst. Prozesse laufen hier gleichzeitig ab und bedingen sich gegenseitig. Von zentraler Bedeutung für das Verstehen von Luftbewegungen sind auch hier Ziehen- und Drücken-Schemata. Es fällt auf, dass die Verortung als auch die Art der Einflüsse aus wissenschaftlicher Sicht nicht angemessen erfolgt bzw. dargestellt werden. Die Lerner greifen auf zahlreiche Metaphern zurück, um ihre Vorstellungen zu veranschaulichen.

Typ (Nr.)	Lerner (Anmerkung)	Strukturierte Aussagen (verwendete Schema, sofern relevant)	Erfahrungen (e), Metaphern (m), Vergleiche (v)
Der Passatwind ändert seine Richtung aufgrund der Erdrotation. (33)	Judith	Die Passatwinde wehen aus nord- bzw. südwestlicher Richtung. Die Richtung könnte aus einem trägheitsbedingten Zurückbleiben der „schwereren“ Luft gegenüber der rotierenden Erde resultieren. (Drücken-Schema, Start-Weg-Ziel-Schema, Teil-Ganzes-Schema)	wie in Zentrifuge (v), Luft „geht“ nach Osten (m), schwere Luft „kommt nicht mit“ (m), „folgt der Erdrotation“ (m)
	Judith	Windgeschwindigkeiten sind größer als die Rotationsgeschwindigkeit der Erde.	
	Emma	Die Richtungsänderung der Passatwinde könnte etwas mit der Erdrotation zu tun haben. Je näher man an den Äquator kommt, umso schneller wird die Geschwindigkeit, mit der sich die Erde dreht. Wind, der nach Norden oder Süden weht, hat dann eine andere Geschwindigkeit als die sich drehende Erde. (Drücken-Schema, Start-Weg-Ziel-Schema, Teil-Ganzes-Schema)	

**Tabelle 110:** Der Passatwind ändert seine Richtung aufgrund der Erdrotation (strukturierte Lernaussagen).

Die Änderung der Bewegungsrichtung der Passatwinde mit Annäherung an den Äquator von Nord- bzw. Südosten zunehmend nach Norden bzw. Süden erklären einige Lerner mit dem Einfluss der Erdrotation. Judith artikuliert die Idee eines trägheitsbedingten Zurückbleibens der Luft gegenüber der sich bewegenden Erdoberfläche. Diese Vorstellung erinnert an die historischen Annahmen Galileis. Emma zieht die höhere Rotationsgeschwindigkeit im Äquatorbereich in ihre Überlegungen mit ein. Ihre Aussagen ähneln denen Hadleys, wobei sie die resultierende Windrichtung leider nicht explizit benennt.

Typ (Nr.)	Lerner (Anmerkung)	Strukturierte Aussagen (verwendete Schema, sofern relevant)	Erfahrungen (e), Metaphern (m), Vergleiche (v)
Der Passatwind ändert seine Richtung aufgrund von Zusammenstößen. (34)	<b>Sophie, Amelie, Annika, Alina</b>	Die Richtungsänderung erfolgt daher, weil Winde zusammenstoßen.	wie zwei Menschen, die aus verschiedenen Richtungen aufeinander prallen (v), Winde „bewegen sich aufeinander zu“ (m), treffen sich“ (m) oder „treffen aufeinander“ (m), „gehen so ineinander und fliegen so in dieselbe Richtung“ (m), „stoßen halt an“ (m), „verschmelzen vielleicht“ (m), „Luftsorten“ (m)
	<b>Stefan, Paul</b>	Die Richtungsänderung erfolgt daher, weil der Passatwind weggedrückt wird. (Drücken-Schema)	Luft wird „verdrängt“ (m) oder „abgelenkt“ (m), ein Wind „kommt“ (m), „anderer Wind lenkt Wind rüber“ (m), Wind wird „weggedrängt“ (m) „Druckwelle“ (m), „abgelenkt“ (m)

**Tabelle 111:** Der Passatwind ändert seine Richtung aufgrund von Zusammenstößen (strukturierte Lerner aussagen).

Andere Lerner erklären die Richtungsänderung des Passatwindes, wie schon im Kontext Antipassat, mit Zusammenstößen. Sie personifizieren den Wind und verstehen ihn als sich bewegendes Subjekt, das mit anderen Objekten kollidieren kann, „wie zwei Menschen, die aus verschiedenen Richtungen aufeinander prallen“. Die Folge dieses Zusammentreffens ist eine Änderung der Bewegungsrichtung des Windes. Stefan und Paul ziehen hierbei das Drücken-Schema heran, sprechen von einer „Druckwelle“ oder vom Verdrängen des Windes.

## 7.7 Aussagen zu Regenzeiten in den wechselfeuchten Tropen

### 7.7.1 Regenzeiten entstehen durch einen Wechsel der Windrichtung

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Björn</b> (Interview 2: 323-357, 428-443)	Trockenheit herrscht, wenn der Wind vom Land weht, weil hier ja keine großen Wassermassen außer ein paar Flüssen sind. Die vom Meer kommende Luft regnet sich ja vor dem Gebirge aus, wenn es hoch genug ist und hinten dran regnet es ja überhaupt nicht mehr dann.
<b>Emma</b> (Interview 5: 475-515)	Also bei uns entstehen ja auch Jahreszeiten. Ich denke, das kann man vergleichen. Das hat bei uns ja jetzt nichts mit dem Passatkreislauf zu tun oder vielleicht hat es da ein bisschen was damit zu tun. In Indien beispielsweise, da kommt ja der Passatkreislauf und er kommt ja vom Meer. Wenn es Indien erreicht, dann regnet es ja und dann entsteht die Regenzeit. (Zu Elena, die sagt, dass der Passatwind Regen bringt:) Ja schau mal, wir haben ja auch keinen Passatwind und es regnet bei uns und wenn jetzt da irgendwo in Indien die Luft aufsteigt, warum soll es dann nicht regnen in der Trockenzeit? Um Indien herum ist doch überall Meer. Ja aber bei uns gibt es ja auch keine Passatwinde und es regnet. In der Sahara regnet es nicht, weil es da kein Wasser gibt.
<b>Annika</b> (Interview 6: 321-331, 438-461)	In der Wüste ist es trocken, weil da kein Meer ringsum ist, wo die Luftfeuchtigkeit sich erhöhen kann und dann ist es so nah am Äquator, dass die Sonne den Wasserdampf schon gleich verdampfen lässt. Und dann können sich keine Wolken bilden und dann kann es nicht regnen. Und wenn es regnet, würde der Regen auch gleich wieder verdampfen, weil es zu heiß ist. Vielleicht hat die Entstehung von Regen- und Trockenzeiten etwas mit dem Wind zu tun, weil wenn der Wind vom Meer ins Land weht, dann hat er ja die Feuchtigkeit vom Meer noch eingespeichert und dann kann es regnen im Land. Aber wenn er vom Land ins Meer weht, dann ist da keine feuchte Luft und dann wird es auch nicht regnen. Also hat das vielleicht doch etwas mit den Richtungen zu tun? Und halt auch mit der Temperatur, mit der Sonneneinstrahlung. Weil je mehr Sonne, desto wärmer und so weiter.

**Tabelle 112:** Regenzeiten entstehen durch einen Wechsel der Windrichtung (Beispiele von Lerner aussagen).

Unter der Leitfrage 'Welche Vorstellungen haben Lerner zur Entstehung der Regenzeiten in den wechselfeuchten Tropen?' konnten Vorstellungen herausgearbeitet werden, die einen Wechsel der Windrichtung als ursächlich betrachten. Björn, Emma und Annika erläutern, dass in der Regenzeit der Wind aus Richtung großer, offener Wasserflächen, „vom Meer“ (Björn, Justnya, Annika), weht. Trockenheit hingegen wird auf Wind vom Land zurückgeführt. Hier fehlt das Wasser, es ist zu wenig

Wasser vorhanden oder es gibt Barrieren: „In der Sahara regnet es nicht, weil es da kein Wasser gibt“ (Emma), ein paar Flüsse reichen hierzu nicht aus (Björn), „(d)ie vom Meer kommende Luft regnet sich ja vor dem Gebirge aus, wenn es hoch genug ist und hinten dran regnet es ja überhaupt nicht mehr dann“ (Björn). Emma lokalisiert Regenzeiten in Indien, spricht also das Monsun-Phänomen an, ohne den Fachbegriff zu nennen. Einen direkten Zusammenhang zwischen Passatwinden und Regen lehnt sie ab mit der Begründung, dass es auch in Deutschland regnet, obwohl es hier keinen entsprechenden Wind gibt. Annika artikuliert eine differenzierte Vorstellung über Regenentstehung in den tropischen Wüsten: Sie geht einerseits von einer geringen Luftfeuchtigkeit aus, „weil da kein Meer ringsum ist“. Andererseits nimmt sie an, dass sich keine Wolken bilden und es nicht regnet, da Wasser aufgrund der hohen Temperaturen sofort verdampfen würde. Die Lerner führen die Entstehung der Regenzeiten also auf eine Änderung der Windrichtung zurück. Leider gehen sie jedoch nicht darauf ein, warum sich diese ändert.

### 7.7.2 Regenzeiten entstehen aufgrund eines sich ändernden Abstands zwischen Erde und Sonne

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Katja</b> (Interview 3: 646-702)	Vielleicht hat es etwas mit dem sich im Laufe eines Jahres verändernden Abstands der Erdhalbkugeln zur Sonne zu tun. Im Winter ist die Nordhalbkugel näher an der Sonne als im Sommer. Ein Sonnenstrahl braucht länger, um beispielsweise die Wüste zu erreichen. Er kühlt unterwegs ab.
<b>Stefan</b> (Interview 8: 332-345)	Die Entstehung von Regen- und Trockenzeiten könnte etwas mit der Stellung der Erde zur Sonne zu tun haben. So wie es Sommer und Winter gibt, gibt es dort ein halbes Jahr Regenzeit und ein halbes Jahr Trockenzeit. Wenn die Erde näher an der Sonne ist, ist es vielleicht mehr trocken.

**Tabelle 113:** Regenzeiten entstehen aufgrund eines sich ändernden Abstands zwischen Erde und Sonne (Beispiele von Lernaussagen).

Einige Lerner erklären die Entstehung von Regenzeiten mit einem sich jährlich ändernden Abstand zwischen Erde und Sonne. Katja personifiziert die Sonnenstrahlung und stellt sie sich als eine Art sich bewegendes Subjekt vor: „Ein Sonnenstrahl braucht länger, um beispielsweise die Wüste zu erreichen. Er kühlt unterwegs ab.“ Letzteres versteht sie über das Person- und das Start-Weg-Ziel-Schema. Warum sie davon ausgeht, dass die Nordhalbkugel der Erde im Winter näher an der Sonne ist, erläutert sie leider nicht. Stefan verbindet Hitze mit Trockenheit. Er vergleicht Regen- und Trockenzeiten mit Sommer bzw. Winter und führt letztere auf einen geringeren Abstand zwischen Erde und Sonne zurück.

### 7.7.3 Regenzeiten entstehen aufgrund eines sich ändernden Einstrahlungswinkels der Sonne

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Sophie</b> (Interview 4: 329-382)	Regenzeiten könnten irgendwie durch die Krümmung der Erdachse verursacht werden. Der Verdunstungs- und Regenkreislauf wäre dann zu bestimmten Zeiten nicht so stark ausgeprägt, weil die Luft weniger stark erhitzt wird. Die Entstehung der Regenzeiten hat etwas mit dem Einstrahlungswinkel zu tun. Je mehr Sonneneinstrahlung da ist, desto wärmer ist die Luft und desto weniger Feuchtigkeit ist vielleicht auch drin.
<b>Lara</b> (Interview 6: 321-331, 438-461)	Ob es eine Regen- oder eine Trockenzeit gibt, hängt davon ab, wie die Erde gerade gedreht ist. Ob die Sonne direkt drauf strahlt oder von einem Winkel. Weil wenn die Sonne mehr da ist, wenn die Sonne direkt drauf strahlt, dann ist ja trockener und es regnet nicht so häufig.

**Tabelle 114:** Regenzeiten entstehen aufgrund eines sich ändernden Einstrahlungswinkels der Sonne (Beispiele von Lernaussagen).

Auch Sophie und Lara stellen sich einen Zusammenhang von Wärme und Trockenheit vor. Sie gehen davon aus, dass es Zeiten gibt, in denen „mehr Sonneneinstrahlung“ (Sophie) bzw. „die Sonne mehr da ist“ (Lara), führen dies jedoch im Gegensatz zu Katja und Stefan nicht auf den Abstand zwischen Erde und Sonne zurück, sondern auf den Einstrahlungswinkel. Die Sonne strahle „direkt drauf“ (Lara) mit der Folge, dass die Luft trockener ist (Lara), „weniger Feuchtigkeit“ enthält (Sophie) und es „nicht so häufig“ regnet (Lara). Luftfeuchtigkeit begreift Sophie über das Behälter-Schema: Diese sei in der Luft „drin“. Ihre Aussage enthält einen Widerspruch, den sie scheinbar nicht bemerkt: Einerseits geht sie davon aus, dass ein steiler Einstrahlungswinkel zu Trockenheit führt, andererseits erläutert sie, dass der „Verdunstungs- und Regenkreislauf (...) dann zu bestimmten Zeiten nicht so stark ausgeprägt (sei), weil die Luft weniger stark erhitzt wird“.

### 7.7.4 Regenzeiten entstehen, weil sich etwas füllt oder anstaut

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Judith</b> (Interview 3: 646-702)	Trockenzeiten in den wechselfeuchten Tropen, das ist doch der Gürtel neben dem tropischen Regenwald. Ursächlich für die Regenzeit könnte sein, dass sich vorher in der Trockenzeit so viel heiße Luft angestaut haben muss, dass riesige Energie vorhanden ist. Diese ist größer als bei einem normalen Gewitter, da sich hier sehr viel heiße Luft angestaut hat.
<b>Paul</b> (Interview 8: 332-345)	Es gibt nur eine bestimmte Feuchtigkeit in der Luft und wenn das halt nicht mehr so der Fall ist, wenn die Feuchtigkeit irgendwie schon verbraucht ist, dann herrscht erst mal eine Trockenzeit, die das alles wieder zum Verdunsten bringt.

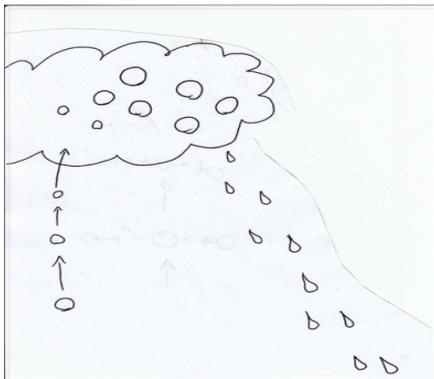
**Tabelle 115:** Regenzeiten entstehen, weil sich etwas füllt oder anstaut (Beispiele von Lernaussagen, Teil 1).

Einige Lerner gehen davon aus, dass Regenzeiten entstehen, weil sich etwas staut. Judith begreift die Vorgänge mit Hilfe des Behälter-Schemas, wobei sie annimmt, dass sich das Innere mit etwas füllt: „Ursächlich für die Regenzeit könnte sein, dass sich vorher in der Trockenzeit so viel heiße Luft angestaut haben muss, dass riesige Energie vorhanden ist“. Jan versteht die Luft über das Person-Schema: Sie nimmt Feuchtigkeit auf, „verbraucht“ diese und braucht eine „Trockenzeit“, um sich durch „Verdunsten“ zu regenerieren.

Lerner	Geordnete Aussagen
<b>Bernd</b> (Interview 10: 291-309, 397-435)	<p>Wolken und Niederschlag entstehen, indem Wasserdampf von der Warmluft nach oben transportiert wird und sich dort dann sozusagen sammelt, weil es zu viel Wasserdampf ist. In den wechselfeuchten Tropen gibt es monatelang keine Niederschläge. Wenn die Luft herabsinkt bis auf 1000 Meter Höhe, nimmt die vielleicht nicht so viel Wasserdampf auf wie Luft, die 10 Meter oder 5 Meter über dem Boden ist. Und daher gelangt auch nicht so viel Wasserdampf in die obere Atmosphäre. So entstehen dann auch in dem Fall keine Wolken. 1000 Meter ist schon eine lange Zeit. Bis man das mit Wasserdampf füllt, das sind ja weiß Gott wie viel Kubikmeter. Millionen? Milliarden? Das dauert verdammt lange, diesen Bereich 0 - 1000 mit Wasserdampf aufzufüllen. Und der steigt ja auch erst mal hoch, bis es diese Schicht erreicht hat. Das heißt, es arbeitet sich langsam runter und irgendwann ist es ganz unten wieder. Und wenn es dort halt dann regnet, dann regnet es richtig, weil die ganze kalte Luft, also der Regen kühlt das dann ja ab und wenn die ganze kalte Luft durch den Regen runter fällt, steigt die warme Luft von unten wieder auf und es regnet sich wieder ab. Und es kann ja dort diese monatelangen Regen hervorrufen. Wenn das feuchte Gebiet sich ganz auffüllt, dass dann hier vom Trockenen sozusagen Luftfeuchtigkeit entzogen wird und hier kommt halt wirklich viel Luftfeuchtigkeit hinzu. Deswegen wechselt das.</p>

**Tabelle 116:** Regenzeiten entstehen, weil sich etwas füllt oder anstaut (Beispiele von Lerneraussagen, Teil 2).

Bernd stellt sich ebenfalls einen Behälter vor, indem sich Wasserdampf „sammelt“. Trockenheit herrscht in der Zeit, in der sich dieser Behälter, den Bernd zwischen 0 und 1000 Meter Höhe verortet, „auffüllt“. Da dieser ein so großes Volumen hat, gibt es monatelang Trockenheit, aber schließlich auch eine entsprechend lange Regenzeit. Um zu verstehen, wie und warum es zu dieser Füllung kommt, personifiziert Bernd den Wind: Dieser „transportiert“ den Wasserdampf in die Höhe, wobei sich der Behälter von oben nach unten füllt. Leas Zeichnung (siehe Abbildung 24) lässt sich ähnlich deuten: Wolken füllen sich mit Wasser- oder Wasserdampfteilchen, welche als Kreise dargestellt werden.



**Abbildung 25:** Verdunstung, Wolken und Regen (Zeichnung von Lea).

### 7.7.5 Fazit: Strukturierte Aussagen zur Entstehung von Regenzeiten in den wechselfeuchten Tropen

Typ (Nr.)	Lerner (Anmerkung)	Strukturierte Aussagen (verwendete Schema, sofern relevant)	Erfahrungen (e), Metaphern (m), Vergleiche (v)
Regenzeiten entstehen durch einen Wechsel der Windrichtung. (35)	<b>Björn, Emma, Annika</b>	Voraussetzung für Regen ist das Vorhandensein großer, offener Wasserflächen.	Luft „regnet sich aus“ (m), Trockenheit „herrscht“ (m),
	<b>Annika</b>	Über Land in der Nähe des Äquators lässt die Sonne den Wasserdampf schon gleich verdampfen, sodass sich keine Wolken bilden können.	Sonne „lässt Regen verdampfen“ (m)
	<b>Björn, Emma, Annika</b>	Regenzeiten entstehen, wenn der Wind vom Meer weht. Trockenzeiten, wenn er vom Land weht. (Start-Weg-Ziel-Schema)	

**Tabelle 117:** Regenzeiten entstehen durch einen Wechsel der Windrichtung (strukturierte Lernaussagen).

Unter der Leitfrage 'Welche Vorstellungen haben Lerner zur Entstehung der Regenzeiten in den wechselfeuchten Tropen?' konnten Vorstellungen identifiziert werden, die einen Wechsel der Windrichtung als ursächlich betrachten. Die Lerner setzen zudem große, offene Wasserflächen voraus. Weht der Wind aus dieser Richtung, gibt es eine Regenzeit, kommt er vom Land, herrscht Trockenheit. Zudem wird ein Zusammenhang von Hitze und Trockenheit von Annika erläutert.

Typ (Nr.)	Lerner (Anmerkung)	Strukturierte Aussagen (verwendete Schema, sofern relevant)	Erfahrungen (e), Metaphern (m), Vergleiche (v)
Regenzeiten entstehen aufgrund eines sich ändernden Abstands zwischen Erde und Sonne. (36)	<b>Katja</b>	Wenn Sonnenstrahlen einen längeren Weg haben, kühlen sie unterwegs ab. (Person-Schema, Start-Weg-Ziel-Schema)	Sonnenstrahl kühlt ab (m)
	<b>Stefan</b>	Je näher die Erde an der Sonne ist, umso trockener ist es.	

**Tabelle 118:** Regenzeiten entstehen aufgrund eines sich ändernden Abstands zwischen Erde und Sonne (strukturierte Lernaussagen).

Katja und Stefan erklären die Entstehung von Regenzeiten mit einem sich jahrzeitlich ändernden Abstand von Erde und Sonne. Auch sie verbinden Hitze mit Trockenheit. Katja personifiziert die Sonnenstrahlung und versteht diese über das Person- und das Start-Weg-Ziel-Schema: Sie lege einen Weg zurück und kühle dabei aus.

Typ (Nr.)	Lerner (Anmerkung)	Strukturierte Aussagen (verwendete Schema, sofern relevant)	Erfahrungen (e), Metaphern (m), Vergleiche (v)
Regenzeiten entstehen aufgrund eines sich ändernden Einstrahlungswinkels der Sonne. (37)	<b>Sophie, Lara</b>	Je wärmer es ist aufgrund des Einstrahlungswinkels, umso trockener ist es. (Behälter-Schema)	
	<b>Sophie</b> (widersprüchlich, siehe oben)	Je wärmer es ist, umso intensiver ist der Verdunstungs- und Regenkreislauf. (Start-Weg-Ziel-Schema)	

**Tabelle 119:** Regenzeiten entstehen aufgrund eines sich ändernden Einstrahlungswinkels der Sonne (strukturierte Lernaussagen).

Ebenfalls von einem Zusammenhang zwischen Wärme und Trockenheit gehen Sophie und Lara aus. Sie führen eine stärkere Erwärmung jedoch nicht auf den kürzeren Abstand von Erde und Sonne zurück, sondern auf den Einstrahlungswinkel. Sophies Aussage, dass der Verdunstungs- und Regenkreislauf umso schwächer ist, je kälter es ist, steht jedoch mit Widerspruch zu ihrer Vorstellung zu den Folgen eines steileren Einstrahlungswinkels.

Typ (Nr.)	Lerner (Anmerkung)	Strukturierte Aussagen (verwendete Schema, sofern relevant)	Erfahrungen (e), Metaphern (m), Vergleiche (v)
Regenzeiten entstehen, weil sich etwas füllt oder anstaut. (38)	Judith	In der Trockenzeit staut sich heiße Luft, die schließlich die Regenzeit verursacht. (Behälter-Schema)	„heiße Luft wird angestaut mit riesiger Energie“ (m), wie Gewitter (v, e)
	Paul, Bernd	Wasserdampf wird von Warmluft nach oben transportiert und sammelt sich dort. Die Luft muss sich mit Wasserdampf füllen, damit es zu einer Regenzeit kommt, dies dauert. (Person-Schema, Behälter-Schema)	„Feuchtigkeit ist verbraucht“ (m), Wasserdampf sammelt sich (m), Luft in der Höhe füllt sich mit Wasserdampf (m)

**Tabelle 120:** Regenzeiten entstehen, weil sich etwas füllt oder anstaut (strukturierte Lernaussagen).

Andere Lerner erklären die Regenzeiten als Folge eines Stauens oder Anfüllens der Luft mit Energie oder Wasserdampf. Sie begreifen diese Vorgänge u. a. mit Hilfe des Behälter-Schemas. Erst wenn dieser gefüllt ist, setzt eine Regenzeit ein. Zuvor herrscht Trockenheit.

## 7.8 Zusammenfassung

Im Rahmen einer Interviewstudie konnten Vorstellungen zur Passatzirkulation von insgesamt 30 Schülerinnen und Schülern (18w, 12m) der Jahrgangsstufe 10 verschiedene Gymnasien erhoben werden. Gütekriterien qualitativer Forschung, beispielsweise in Bezug auf die Auswahl der Probanden, wurden beachtet. Als Erhebungsinstrument diente ein qualitatives Leitfadeninterview. Im Rahmen der Analyse bisheriger Untersuchungen (Kapitel 6) konnten bestimmte, defizitär erforschte Bereiche identifiziert sowie Forschungsfragen formuliert werden, die bei der Konstruktion des Leitfadens Berücksichtigung fanden: Fokussiert wurden die Bereiche Himmelsmechanik, Windentstehung und dabei wirkende Kräfte, Veränderungen bei vertikalen Luftbewegungen sowie die Fähigkeiten, die Passatzirkulation als System zu erfassen und die Entstehung von Regenzeiten in den wechselfeuchten Tropen zu erklären. Die dargestellten Ergebnisse wurden mittels qualitativer Inhaltsanalyse unter Berücksichtigung der Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens und der systematischen Metaphernanalyse gewonnen. Hierbei wurde sowohl auf eine interne als auch eine kommunikative Validierung geachtet. Zudem werden die Auswertungsschritte lückenlos dokumentiert.

Die im Rahmen bisheriger Untersuchungen (Kapitel 6) identifizierten Vorstellungen zur Himmelsmechanik konnten ebenfalls erhoben und mit Hilfe des Auswertungsinstrumentes näher analysiert werden. Es handelt um Aussagen, die die stärkere Erwärmung der Luft in den Tropen auf einen geringeren Abstand zwischen Erde und Sonne zurückführen, auf einen geringeren Abstand zwischen Tropen und Sonne aufgrund der Kugelgestalt der Erde oder auf einen sich ändernden

Abstand zwischen Erde und Sonne aufgrund der Neigung der Erdachse. Eine in bisherigen Untersuchungen noch nicht erhobene Vorstellung geht davon aus, dass durch einen steilen Einstrahlungswinkel der Weg der Strahlen durch die Atmosphäre kürzer ist und die Strahlung in den Tropen daher intensiver sei. Alle erhobenen Vorstellungen zur Himmelsmechanik werden im Kontext von Erklärungen zur Ursache wärmerer Luft in den Tropen artikuliert (Typ 10). Von zentraler Bedeutung für die Lerner ist das Start-Weg-Ziel-Schema. Sie begreifen Strahlen als Entitäten, die sich auf einem Weg von der Sonne zur Erde befinden. Zudem werden sie mit Hilfe des Person-Schemas verstanden: Auf ihrem Weg verbrauchen sie Energie. Die Schülerinnen und Schüler veranschaulichen ihre Vorstellungen durch Metaphern: Die Strahlen verlieren Energie durch Kontakt mit Luftteilen, sie gehen einen Weg, das Licht muss lange wandern. Erfahrungen mit Wärmequellen im Alltag, beispielsweise einem Grill oder einem Lagerfeuer, bestätigen die artikulierten Vorstellungen zur Himmelsmechanik. Einige Lerner differenzieren zwischen Sonnenstrahlung und Wärmestrahlung, was sie ebenfalls über das Person-Schema verstehen (Typ2).

Vorstellungen zu vertikalen Luftbewegungen, wirkenden Kräften und dabei stattfindenden Veränderungen konnten umfassend erhoben und analysiert werden. Die Untersuchung bisheriger Arbeiten hat hier ein Forschungsdesiderat aufgezeigt (Kapitel 6). Hinsichtlich der Bedingungen, unter denen Luft aufsteigt oder absinkt, lassen sich Vorstellungen von Luft als etwas Absolutem und als etwas Relativem unterscheiden. Erstere gehen davon aus, dass kalte Luft absinkt, weil sie schwer ist und warme Luft aufsteigt, weil sie leicht ist (Typ 1 und Typ 22). Die Aussagen erinnern an das Ptolemäische Weltbild, bei dem leichte Stoffe aufsteigen und schwere sinken, da sie ihrer natürlichen Sphäre zustreben. Objekte bewegen sich umso schneller, je wärmer oder kälter sie sind. Im Alltag finden diese Vorstellungen Bestätigung. Beispielsweise lässt sich beobachten, dass Rauch oder Nebel aufsteigt, während Steine etwa zu Boden fallen: „(S)chwere Sachen gehen ja runter“ (Sophie) und „Hagel (sinkt) schneller als Regen (...)“ (Tobias). Andere Lerner betrachten Temperatur und Dichte im Verhältnis zur umgebenden Luft (Typ 2 und Typ 23): Luft steigt unter der Bedingung auf, dass sie wärmer oder leichter als die umgebende Luft ist bzw. sie sinkt unter der Bedingung, dass sie kälter oder schwerer als diese ist. Die Schülerinnen und Schüler verstehen diese Relativität mit Hilfe des Behälter-Schemas: Die Temperatur oder Dichte im Inneren wird mit der außerhalb des Behälters verglichen. Die Geschwindigkeit der vertikalen Luftbewegung ergibt sich aus der Differenz von Temperatur oder Dichte. Die Lerner veranschaulichen dies durch Metaphern und Vergleiche: Warme Luft wird „verdrängt“ (Julian), „legt sich über die kältere“ (Judith), wie Wasser und Öl (Katja) oder wie Wasser und Eis (Bernd). Die umgebende dünnere Luft „leistet weniger Widerstand“ (Julian), wie ein Bleigurt im Wasser (Julian) oder wie Gasblasen im Wasser (Julian). Weitere Vorstellungen gehen von dynamischen Ursachen vertikaler Luftbewegungen aus (Typ 3 und Typ 24). Die Lerner begreifen diese über das Drücken-Schema. Auf- oder Abwinde erscheinen dabei als Entitäten, auf die ein Impuls

wirkt, der sie in Bewegung setzt. Diese Vorstellungen erinnern an historische Aussagen Francis Bacons, der sich Windentstehung mechanistisch als Luftstöße in Folge thermisch bedingter Ausdehnung vorstellt. Einige Lerner gehen davon aus, dass aufsteigende Luft sich abkühlt (Typ 4) und absinkende Luft sich erwärmt (Typ 25 und Typ 26). Interessanterweise stellen sich die meisten Lerner eine Art Wärmeleitung als ursächlich vor, die sie über Metaphern oder Vergleiche veranschaulichen: Die Erwärmung sei ein Angleichen an wärmere Luft. Die heiße Luft wird von kalter Luft „ummantelt“ (Judith). Es sei, wie wenn man warmes in kaltes Wasser schüttet (Hannah). Aufsteigende und absinkende Luft wird dabei über das Person-Schema begriffen: Sie nimmt Wärme auf und gibt diese wieder ab. Einige Lerner gehen dabei davon aus, dass sich die Dichte der Luft durch Aufnahme der Wärme erhöht. Dass das sich verändernde Luftvolumen ursächlich für Erwärmung oder Abkühlung ist, die wissenschaftliche Vorstellung von adiabatischer Kompression oder Dilatation, zieht keiner der Lerner in Betracht. Schülerinnen und Schüler, die vertikale Luftbewegungen absolut betrachten, haben Schwierigkeiten, den Zeitpunkt genau zu benennen, ab dem Luft nicht mehr aufsteigt oder absinkt. Sie gehen von permanenten Aufwärts- oder Abwärtsbewegungen der Luft (Typ 17), von festen Grenzen (Typ 8 und Typ 9) oder davon aus, dass die Luft bis zum Boden absinkt (Typ 28). Es fällt auf, dass diese Vorstellungen stark teleologisch geprägt sind: Es gibt Wolken, damit die warme Luft nicht weggeht (Emma), „Schutzschicht(en)“ (Katja), einen „Schutzmantel“ (Katja), eine „Schale“, die sich um die Erde „legt“ (Judith). Luft erwärme sich erst in Bodennähe, sonst könne sie ja nicht mehr absinken (Fabian). Häufig werden Personifizierungen eingesetzt. So können Gase in den Weltraum „entfliehen“ (Judith), andere werden „gehalten“ (Judith). Luft kann nicht einfach aufhören zu sinken (Lea).

Vorstellungen zu horizontalen Luftbewegungen, bisher nur defizitär erforscht, konnten ebenfalls umfassend erhoben und analysiert werden. Die Lerner erklären Windentstehung durch ein Aufeinandertreffen (Typ 14). Dabei begreifen sie Luft oder Drücke als Entitäten, die sich bewegen: Warme Luft werde „weggetragen“ (Stefan). Warme und kalte Luft „berühren“ sich (Annika). Unterschiedliche Drücke „crashen“ (Rainer) oder „prallen“ (Lara) aufeinander. Sie unterwandern sich (Rainer). Als Folge des Aufeinandertreffens würde sich Luftdruck bilden, vergleichbar mit dem Druck, der bei kochendem Wasser mit geschlossenem Topfkessel entsteht (Paul). Oder die Lerner erklären, dass Wind als Folge eines Ausgleiches entsteht (Typ 15), was sie über das Behälter- und das Teil-Ganzes-Schema begreifen. Sie nutzen Vergleiche und Metaphern zur Veranschaulichung: Luft „strömt“ und „fließt“ (Julian), wird „abgelenkt“ (Judith), möchte etwas ausgleichen (Judith), wie durch ein Loch fließendes Wasser (Simon). Die Luft sei ungleich verteilt, wie in und außerhalb eines Luftballons (Emma). Hoch und Tief „tauschen sich aus“ (Emma), wie ein Temperatenausgleich (Emma). Eine weitere Erklärung geht davon aus, dass Wind aufgrund von Drücken oder Stoßen (Typ 16) entsteht. Für die Lerner ist in diesem Fall das Drücken-Schema von zentraler Bedeutung. Sie

greifen auf zahlreiche Metaphern und Vergleiche zurück, um ihre Vorstellungen zu veranschaulichen: Sie sprechen von „Luftstöße(n)“ (Alina) oder Luft als „Anstoß“ zum Wind (Rainer), wie eine Spritze, die zusammengedrückt wird (Hannah). Dies sei vergleichbar mit dem Druck, der entsteht, wenn man einen Schirm auf einem Fahrrad in Fahrtrichtung hält (Katja). Sie sprechen vom „(A)nschwellen“ des Luftdruckes und einer Explosion (Jana). Ein Druckgebiet „herrscht, dass sich irgendwann ausbreitet und vorstößt“ (Stefan). Es sei wie eine kohlenensäurehaltige Flüssigkeit im Mund (Jana), wie der Druck, der im Topf beim Kochen entsteht (Stefan). Sich horizontal bewegende Luft kann ihre Richtung ändern. Die Passatwinde wehen beispielsweise mit Annäherung an den Äquator zunehmend aus nördlicher bzw. südlicher Richtung. Lerner erklären dieses Phänomen als Folge von Zusammenstößen oder durch Anziehung (Typ 20 und Typ 34). Sie begreifen diese Vorgänge mit Hilfe von Ziehen- und Drücken-Schemata. Zur Veranschaulichung ziehen sie zahlreiche Metaphern und Vergleiche heran: Luft muss „sich aus dem Weg gehen“ (Fabian), wird „umgelenkt“ (Bernd). Sie kann sich bezüglich der Bewegungsrichtung „nicht entscheiden“ (Lea). Druckgebiete stoßen sich gegenseitig ab (Kerstin). Es sei vergleichbar mit zwei Menschen, die aus verschiedenen Richtungen aufeinander prallen (Amelie). Winde „bewegen sich aufeinander zu“ (Sophie), „stoßen halt an“ (Alina), „verschmelzen vielleicht“ (Alina), wobei verschiedene „Luftsorten“ (Annika) dies nicht können. Andere Lerner stellen einen Zusammenhang zur Erdrotation her (Typ 21 und Typ 33). Emma erwähnt explizit unterschiedliche Rotationsgeschwindigkeiten verschiedener Breitenkreise. Ihre Aussage erinnert an die historischen Vorstellungen George Hadleys. Die übrigen Lerner gehen davon aus, dass die Luft ihre Richtung ändert, da sie eine Art Relativbewegung gegenüber der sich bewegenden Erdoberfläche macht. Diese Aussagen erinnern an die historischen Vorstellungen Galileis. Die Schülerinnen und Schüler veranschaulichen ihre Aussagen über zahlreiche Metaphern und Vergleiche: Die Luft verhält sich wie ein Gegenstand, den man aus einem fahrenden Auto wirft (Hannah). Luft ist „träge“ und wird „abgelenkt“ (Björn) oder der Luft ist die Rotationsbewegung der Erde egal (Sophie). Es sei vergleichbar mit Vorgängen in einer Zentrifuge (Judith). Die Erdoberfläche bewegt sich nach Osten und die schwere Luft „kommt nicht mit“ (Judith).

Die Passatzirkulation wird als System von den Lernern sehr unterschiedlich erfasst. Einige beschreiben Ursache-Folgen-Relationen ohne Wechselwirkungen (Typ 30). So wird der Passatwind beispielsweise durch absinkende Luft weggedrückt und durch aufsteigende Luft gezogen (Hannah). Diese Vorgänge werden mit Hilfe des Ziehen- und Drücken-Schemas verstanden. Andere begreifen Vorgänge mit Hilfe des Person-Schemas und Personifizierungen: Der Passatwind nimmt Luft mit, wird abgebremst und braucht Energie. Kerstin vergleicht den Effekt der Konvergenz der Passate mit zwei Föhnen, die man gegeneinander hält. Andere Lerner betrachten die Passatzirkulation mit Hilfe von Ziehen- und Drücken-Schemata als lineares System, bei dem Vorgänge zeitlich nacheinander ablaufen (Typ 31). Zur Veranschaulichung nutzen sie Vergleiche und Metaphern: Sie sprechen von

Wiederholungen (Judith, Katja, Paul, Bernd), vom „Rückfluss“ (Judith) oder einer „Rücklage“ (Judith). Wasserdampf wird vom Wind „getragen“ (Paul) oder Wind wird durch „Druck“ weiter geleitet (Paul). Aufsteigende Luft sei wie ein Staubsauger (Bernd). Weitere Lerner verstehen die Passatzirkulation als komplexes System mit Wechselwirkungen (Typ 32). Auch sie greifen vor allem auf Ziehen- und Drücken-Schemata zurück, um die Vorgänge zu verstehen. Zudem nutzen sie zahlreiche Metaphern und Vergleiche: Die Winde „beeinflussen“ sich gegenseitig (Julian). Der Kreislauf werde nicht „unterbrochen“ (Julian). Wind oder Luft berühren sich gegenseitig (Tim). Die Lerner veranschaulichen ihre Vorstellungen zum System Passatzirkulation mit Hilfe von Darstellungen eines vertikalen, längenkreisparallelen Querschnittes, der sowohl schematisch-bildhafte Elemente enthält als auch lineare oder komplexe Wirkungszusammenhänge aufzeigt. Julian fertigt zudem eine Ansicht der Passatzirkulation aus der Vogelperspektive an, um die jahreszeitliche Verschiebung des Systems zu veranschaulichen.

Die Vorstellung, Luft sei umso schwerer, je mehr Wasserdampf sie enthalte, wurde bereits bei früheren empirischen Arbeiten erhoben (Kapitel 6) und konnte auch im Rahmen dieser Studie identifiziert werden (Typ 12 und Typ 13). Die Lerner verstehen wasserdampfhaltige Luft über das Person-Schema: Luft nimmt Wasserdampf auf, ihr Zustand verändert sich, sie wird schwerer und schließlich scheidet sie das Wasser in Form von Regen wieder aus. Den Prozess der Regenentstehung begreifen einige Lerner dabei über das Behälter-Schema. Die Luft erscheint dabei als Behälter, der sich mit Wasser oder Wasserdampf füllt, bis ein Maximum erreicht ist. Ab dann setzt Regen ein. Die Schülerinnen und Schüler nutzen zahlreiche Metaphern und Vergleiche, um ihre Vorstellungen zu veranschaulichen: Warme Luft „trägt“ viel Wasser mit sich (Simon). Wasser werde rausgeschwemmt aus der Luft (Julian). Wasserdampf „bleibt in den Wolken hängen“ (Lara) oder Wolken „füllen“ sich mit Wasser (Tobias). Luft „regnet sich aus“ (Björn). Die Regenzeiten in den wechselfeuchten Tropen werden auf drei Arten erklärt. Einige Lerner betrachten einen Wechsel der Windrichtung als ursächlich (Typ 35). Sie gehen davon aus, dass der Wind aus Richtung Meer wehen muss, damit es zu einer Regenzeit kommt. Andere Lerner führen die Entstehung von Trockenzeiten auf einen geringeren Abstand zwischen Erde und Sonne (Typ 36) oder einen steileren Einstrahlungswinkel (Typ 37) zurück. Das Behälter- und das Person-Schema sind von zentraler Bedeutung für Lerner, die Regenzeiten als Folge eines Füllens oder Anstauens betrachten (Typ 38). Sie veranschaulichen ihre Vorstellungen mit Metaphern und Vergleichen: Wasserdampf sammelt sich (Bernd) oder die Luft in der Höhe füllt sich mit Wasserdampf (Bernd). Heiße Luft wird „angestaut mit riesiger Energie“, wie bei einem Gewitter (Judith). Trockenzeiten entstehen, wenn die „Feuchtigkeit verbraucht ist“ (Paul). Im Rahmen der Untersuchung bisheriger Arbeiten (Kapitel 6) wurde herausgearbeitet, dass die Fähigkeiten, systemische als auch inhaltliche Komplexität zu erfassen, mit entsprechendem Interesse und kognitiven Fähigkeiten einhergehen. Es fällt auf, dass sich Vorstellungen hinsichtlich des Grades

ihrer Wissenschaftsorientierung unterscheiden. Entsprechend könnten Lerner, deren Aussagen differenzierter sind oder den wissenschaftlichen Vorstellungen ähneln, interessierter am Thema Passatzirkulation sein bzw. stärkere kognitive Fähigkeiten besitzen.

Im Rahmen der Auswertung wurde festgestellt, dass sich die Vorstellungen von Jungen und Mädchen nicht signifikant unterscheiden. Alle Typen, die induktiv entwickelt wurden, basieren sowohl auf Aussagen von Jungen als auch von Mädchen, d.h. es lassen sich zahlreiche gemeinsame Merkmale finden. Auch die angeführten Vergleiche oder Metaphern sind ähnlich. Die artikulierten Vorstellungen basieren bei beiden Geschlechtern auf Schlussfolgerungen aufgrund von Alltagserfahrungen, auf Analogiebildungen und teleologischen Ideen oder dem wörtlichen Verstehen von Metaphern. Es werden metaphorische Konzepte, beispielsweise 'Wind ist fließendes Wasser' aus unterrichtlichen oder sonstigen Kontexten eigenständig übernommen und neu interpretiert. Auch Metaphern oder metaphorische Konzepte, die auf eindeutigen, erfahrbaren Quellbereichen basieren, wie beispielsweise 'Luft ist ein Behälter', werden dabei aus wissenschaftlicher Sicht unangemessen ausgelegt.

## 8 Didaktische Strukturierung

Im Rahmen der Untersuchungsaufgabe 4 werden Vermittlungsstrategien auf der Basis eines wechselseitigen Vergleichens von erhobenen Alltagsvorstellungen und wissenschaftlichen Vorstellungen entwickelt. Die kognitiv ausgerichteten didaktischen Empfehlungen orientieren sich am klassischen *Conceptual-Change*-Modell (POSNER ET AL. 1982). Auf eine konkrete Ausgestaltung mit Vorschlägen zu Fragetechniken, *idea units*, etc. (siehe Kapitel 2, Abschnitt 2.4) wird verzichtet, da solche Lernangebote immer individuell auf die Schülerinnen und Schüler abgestimmt sein sollten. Die didaktischen Empfehlungen sind vielmehr als Bausteine oder Anregungen für einen Geographieunterricht zu verstehen, der die Passatzirkulation zum Gegenstand hat. Dieser sollte interessenorientiert sein und vom Mensch-Umwelt-System ausgehen (siehe Kapitel 3). Die didaktischen Vorschläge sind zudem metakognitiv ausgerichtet. Es handelt sich um Empfehlungen zum Thematisieren von Nicht-Erfahrbarkeit und metaphorischem Verstehen, den Gefahren und Potentialen, die damit einhergehen. Dass ontologische oder epistemologische Überzeugungen Vorstellungen und ihre Entwicklung beeinflussen, sollte auf der Metaebene thematisiert werden. Entsprechende metakognitiv ausgerichtete Empfehlungen berücksichtigen den Kategorisierungsansatz (CHI 2008) und den Rahmentheorieansatz (VOSNIADOU 2008). Zudem sollen soziale und affektive Faktoren reflektiert und auf dieser Basis didaktische Empfehlungen formuliert werden. Das Kontextmodell (CARAVITA & HALLDÉN 1994; HALLDÉN 2008) findet hierbei Berücksichtigung.

### 8.1 Kognitiv ausgerichtete didaktische Empfehlungen

Die kognitiv ausgerichteten didaktischen Empfehlungen bauen aufeinander auf. Grundlegend erscheinen Kenntnisse zu (1) Ursachen von Luftbewegungen. Diese ermöglichen ein (2) Verständnis der Veränderungen der Luft während ihrer Bewegungen sowie (3) weiterer Eigenschaften von Luft, was die Voraussetzung für ein (4) angemessenes Verstehen von Wolken und (5) Regenbildung darstellt. (6) Himmelsmechanische Ursachen stärkerer Erwärmung der Luft in den Tropen, (7) die Wirkungsweise der Corioliskraft sowie die erwähnten Kenntnisse bilden die Basis, um (8) die Passatzirkulation und (9) die Entstehung von Regenzeiten in den wechselfeuchten Tropen aus wissenschaftlicher Sicht angemessen verstehen zu können. Zunächst erfolgen Überlegungen, wie Unzufriedenheit bei den Lernern mit ihren Vorstellungen ausgelöst werden könnte. Anschließend werden die Verständlichkeit der wissenschaftlichen Vorstellung und ihr Erklärungspotential reflektiert.

1. *Sich vertikal bewegend Luft als etwas Relatives betrachten:*

UNZUFRIEDENHEIT: Einige Lerner betrachten aufsteigende oder absinkende Luft als etwas Absolutes (Typ 1, 22). Sie weisen warmer Luft die Eigenschaft zu, leicht zu sein und aufzusteigen. Kalte Luft habe entsprechend umgekehrte Attribute. Zum Teil greifen sie auf das Behälter-Schema zurück, um sich Auf- oder Abwinde vorzustellen. Sie fokussieren dabei jedoch lediglich das Innere des Behälters und beschreiben dieses näher, um die Ursache der Bewegung zu erfassen. Die basale Logik Inneres-Grenze-Äußeres wird nicht herangezogen, um die aufsteigende oder absinkende Luft relativ zur umgebenden Luft zu betrachten. Dass Luft aufsteigt, wenn sie warm ist und absinkt, wenn sie kalt ist, hätte eine permanente Auf- und Abwärtsbewegung der Luft zur Folge (Typ 17). Unzufriedenheit könnte dadurch ausgelöst werden, dass Alltagserfahrungen Gegenteiliges belegen. Offensichtlich findet keine stetige Auf- oder Abwärtsbewegung von Luft statt. Lerner, die Auf- oder Abwinde als etwas Absolutes betrachten, haben zudem Schwierigkeiten, die Dauer der vertikalen Luftbewegung genauer zu erfassen. So stellen sie sich vor, dass Luft immer bis zum Boden sinkt oder dass die Erwärmung beim Absinken erst in Bodennähe stattfindet, da die Luft ansonsten nicht mehr absinken könnte (Typ 26, 28). Ferner gehen sie davon aus, dass Luft bis zu bestimmten Grenzen aufsteigt (Typ 9), bis es regnet (Typ 8) oder bis sie nicht mehr abkühlen kann (Typ 7). Unzufriedenheit könnte dadurch ausgelöst werden, dass diese vagen Aussagen hinterfragt werden: Wie sollen diese Grenzen, die die aufsteigende Luft aufhalten, beschaffen sein? Ab welcher Temperatur steigt Luft nicht mehr auf? Warum befindet sich Luft nicht in einer permanenten Auf- und Abwärtsbewegung?

VERSTÄNDLICHKEIT: Um zu verstehen, warum sich Luft vertikal bewegt (5.2.3.1 und 5.2.3.3), stellen sich Wissenschaftler Luft als Behälter vor, der mit einer bestimmten Menge an Luftmolekülen gefüllt ist, was sie über das Teil-Ganzes-Schema verstehen. Die basale Logik Inneres-Grenze-Äußeres ermöglicht es nun einerseits, die Luftdichte im Inneren zu erfassen, und andererseits Inneres und Äußeres miteinander zu vergleichen. Luft steigt auf unter der Bedingung, dass sie eine geringere Dichte als die umgebende Luft hat. Unter entsprechend umgekehrten Verhältnissen sinkt sie ab. Wissenschaftler verstehen die dabei wirkenden Auftriebs- und Gewichtskräfte über Ziehen- und Drücken-Schemata.

PLAUSIBILITÄT UND FRUCHTBARKEIT: Die relative Betrachtung von aufsteigender oder absinkender Luft ermöglicht es, die Dauer vertikaler Bewegungen genauer zu erfassen. Luft steigt oder sinkt, solange eine Dichtedifferenz zur umgebenden Luft vorhanden ist. Sie erklärt zudem, warum sich Luft eben nicht in einer permanenten Auf- und Abwärtsbewegung befindet.

2. *Sich bewegende Luft als einen sich in seiner Form verändernden Behälter begreifen:*

UNZUFRIEDENHEIT: Einige Lerner gehen davon aus, dass Luft aufsteigt oder absinkt, weil sie etwas wegstößt (Typ 3, 24). Sie betrachten Luft als Entität, die sich durch den Raum bewegt, weil sie Impulse erhält (Typ 14, 16) und die mit anderen Entitäten (Luft, Druck) zusammenstoßen kann, wodurch sich ihre Bewegungsrichtung ändert (Typ 20, 34) oder die gestoppt wird, weil sie auf etwas trifft, beispielsweise vertikal begrenzende Luftschichten (Typ 9, 29). Luft erscheint als starrer oder fester Körper, was die Lerner durch zahlreiche Metaphern oder Vergleiche veranschaulichen. Unzufriedenheit mit diesen Vorstellungen könnte durch Beobachtungen bei Modellexperimenten<sup>12</sup> hervorgerufen werden. So neigen sich die Flammen bei einem Kreis aus Teelichtern beispielsweise zur Mitte, da sich hier ein Tiefdruckgebiet bildet. Die Flammen lassen erkennen, dass Luft aus der Umgebung mit höherem Druck permanent in die Mitte des Kreises strömt (THEIßEN 2003, 8ff.). Ähnliche Effekte werden auch erreicht, wenn eine Kerze in den Türrahmen zwischen zwei unterschiedlich temperierten Räumen gestellt wird (FRAEDRICH 1997, 39). Letztlich können diese Beobachtungen im Alltag auch an sich drehenden Windrädern gemacht werden. Wäre Luft ein sich bewegendes Körper, würden sich Windräder nicht kontinuierlich drehen bzw. die Flammen würden sich nur phasenweise zur Mitte neigen.

VERSTÄNDLICHKEIT: Wissenschaftler verstehen Wind als sich in seiner Form verändernden Körper. Das Phänomen Luftdruck begreifen Wissenschaftler als Resultat der Stöße von Luftmolekülen im Inneren eines Behälters gegen die Grenze. Auch wenn das Start-Weg-Ziel- und das Teil-Ganzes-Schema ebenfalls aufgegriffen werden, kann der Luftdruck ohne die basale Logik Inneres-Grenze-Äußeres nicht verstanden werden. Die Ursache horizontaler Luftbewegungen (5.2.3.2 und 5.2.3.4) erfassen Wissenschaftler ebenfalls über das Behälter-Schema. Sie stellen sich zwei Behälter mit einer gemeinsamen Grenze, jedoch unterschiedlichem Luftdruck vor. Diese Druckdifferenz bewirkt, dass sich die Grenze zu Ungunsten des Behälters mit dem niedrigeren Druck verschiebt. Auch hier spielen das Start-Weg-Ziel- und das Teil-Ganzes-Schema eine Rolle, da es letztlich die Teilchen sind, die die sich horizontal bewegende Luft konstituieren. Dennoch bildet die basale Logik Inneres-Grenze-Äußeres den Rahmen, um die Vorgänge zu verstehen. Die Veränderungen der sich vertikal bewegenden Luft sind ebenfalls aus wissenschaftlicher Sicht mit Hilfe dieser basalen Logik zu verstehen (5.2.2.4). Sie stellen sich einen Behälter vor, der sich beim Aufsteigen ausdehnt und beim Absinken zusammenzieht. Die Ursache dieser Volumenveränderung begreifen sie mit Hilfe der dem Behälter-Schema inhärenten Logik: Der Luftdruck außerhalb der Behälters ändert sich, wobei die Druckverhältnisse im Inneren eine Verschiebung der Grenze bewirken. Das Start-Weg-Ziel als auch

---

<sup>12</sup> Auf eine vertiefte Auseinandersetzung mit experimentellen Lehr- und Lernformen im Geographieunterricht wird an dieser Stelle verzichtet. Siehe hierzu: LETHMATE 2006, 4-11; OTTO 2009, 4-14 und WILHELM 2012, 4-9.

das Teil-Ganzes-Schema sind hier ebenfalls relevant. Die Bewegungsenergie der Luftteilchen wird als Äquivalent zur Lufttemperatur betrachtet. Die Ausdehnung des Behälters hat eine langsamere, die Kompression eine schnellere Bewegung der Teilchen zur Folge. Die Logik Inneres-Grenze-Äußeres bildet also den Rahmen, um diese adiabatischen Vorgänge verstehen zu können.

PLAUSIBILITÄT UND FRUCHTBARKEIT: Die neue Vorstellung erklärt die beobachteten Phänomene. Die Flammen bzw. Windräder bewegen sich konstant und nicht nur für einen kurzen Moment, wie es beim Passieren eines sich bewegenden starren Luftkörpers zu erwarten wäre. Sie erklärt zudem, warum sich aufsteigende Luft abkühlt und absinkende erwärmt bzw. warum sich die Dichte und der Druck der sich vertikal bewegenden Luft verändern, sodass es zu Gleichgewichtszustände kommen kann, Luft also nicht mehr aufsteigt oder sinkt, da der Druck bzw. die Dichte der der umgebenden Luft entspricht.

### 3. *Erwärmung von Luft mit Hilfe der basalen Logik 'Aufnahme-Zustandsänderung-Ausscheidung' angemessen verstehen:*

UNZUFRIEDENHEIT: Lerner verstehen die Zustandsänderung aufsteigender oder absinkender Luft über das Person-Schema: Luft verbraucht beim Aufsteigen Energie, gibt diese ab oder scheidet sie aus (Typ 4). In den Tropen ist dieser Prozess der Energieaufnahme, Zustandsänderung und Energieabgabe besonders intensiv (Typ 10, 11). Hier erwärmt sich Luft stärker und steigt daher höher auf. Beim Absinken nimmt die Luft die Wärme oder Energie der umgebenden Luft auf (Typ 25) oder sie erwärmt sich nicht, da keine Energie zugeführt wird (Typ 27). Einige Lerner gehen davon aus, dass Luft durch Wärme- oder Energieaufnahme schwerer wird (Bernd, Kerstin), was im Widerspruch zur Aussage steht, dass warme Luft leicht ist und daher aufsteigt. Unzufriedenheit mit diesen Vorstellungen könnte durch das Reflektieren über die Folgen dieser Vorgänge ausgelöst werden. Wenn aufsteigende Luft Energie abgeben würde, würde sich die Luft in der Höhe langsam erwärmen. Wenn Luft bei Bewegungen Energie verbraucht, müsste sich auch absinkende Luft abkühlen. Dies steht im Widerspruch zum vertikalen Temperaturverlauf der Atmosphäre. Dass in großen Höhen im Bereich der Tropopause niedrigere Temperaturen als in Bodennähe vorherrschen, belegen einige Lerner mit Erfahrungen bei Flugreisen. Entsprechend ergibt sich ein kognitiver Konflikt.

VERSTÄNDLICHKEIT: Wissenschaftler verstehen die Erwärmung von Luft über das Person-Schema. Die basale Logik Aufnahme-Zustandsänderung-Ausscheidung spielt hierbei eine entscheidende Rolle. Luft nimmt Energie oder Strahlung auf, wodurch sie sich erwärmt (5.2.3.1). Letztlich emittiert sie hierdurch auch Energie oder Strahlung. Um diese Vorgänge zu verstehen, greifen Wissenschaftler auch auf das Teil-Ganzes-, das Start-Weg-Ziel- und das Behälter-Schema zurück. Die Energie- oder Strahlungsaufnahme führt dazu, dass sich die Luftmoleküle im Inneren schneller bewegen, was als

Zunahme der Lufttemperatur messbar und spürbar ist. Im Gegensatz zu den Lernern wenden sie das Person-Schema jedoch nicht an, um die Abkühlung oder Erwärmung sich vertikal bewegender Luft zu erklären. Hierzu ziehen Wissenschaftler die erwähnten Vorstellungen zu adiabatischer Kompression und Dilatation heran. Aufwinde kühlen ab, da sie sich ausdehnen. Absinkende Luft erwärmt sich, da sie sich aufgrund der Dichte und des Druckes der umgebenden Luft wieder zusammenzieht.

PLAUSIBILITÄT UND FRUCHTBARKEIT: Mit Hilfe der wissenschaftlichen Vorstellung von adiabatischen Prozessen kann erklärt werden, warum sich die Luft in der Höhe nicht kontinuierlich erwärmt und absinkende Luft nicht abkühlt. Das vertikale Temperaturprofil der Atmosphäre erscheint damit plausibel. Die Erklärung kann zudem herangezogen werden, um die hohen Temperaturen im Einflussbereich der Urpassate zu verstehen. Die Vorstellung von sich erwärmender Luft über das Person-Schema bildet zudem die Grundlage für ein Verständnis thermischer Konvektion im Bereich der ITCZ.

4. *Wasser in der Luft mit Hilfe der basalen Logik 'Aufnahme-Zustandsänderung-Ausscheidung' angemessen verstehen:*

UNZUFRIEDENHEIT: Die Lerner begreifen die Fähigkeit der Luft, Wasserdampf aufzunehmen, über das Person-Schema (Typ 12). Sie gehen davon aus, dass die Luft durch die Aufnahme von Wasserdampf schwerer wird (Typ 5, 13), was zahlreiche Alltagserfahrungen, beispielsweise mit nasser Kleidung, plausibel erscheinen lassen. Im Kontext Kondensation und Niederschlagsbildung haben sie Probleme, das Verhältnis von Luft zu Wasser in der Atmosphäre angemessen zu erfassen. Sie setzen Regen mit Luft gleich oder gehen davon aus, dass Regen mit der Luft absinkt (Typ 8). Unzufriedenheit mit dieser Vorstellung könnte durch Hinweise auf Alltagssituationen hervorgerufen werden. So kann wahrgenommen werden, dass Flüssigkeiten, beispielsweise aus einer Gießkanne, zu Boden fallen, ohne dass hierbei eine Luftbewegung zu spüren ist. Wenn Luft durch Wasserdampf schwerer wird, warum steigt sie dann auf? Hierauf antworten einige Lerner, dass der Wasserdampf extrem heiß ist und die Luft dadurch wärmer und leichter wird (Typ 13). Die Vorstellung, dass Wolken aus Wasserdampf bestehen, wird ebenfalls artikuliert (Typ 13, 38). Schülerinnen und Schüler, die davon ausgehen, dass Wasserdampf beispielsweise beim Kochen als weißer Rauch sichtbar ist, könnten gefragt werden, warum sich dieser nicht in der Natur beobachten lässt? Wieso können Wolken nur gesehen werden, wenn sie bereits in der Höhe sind, warum nicht aufsteigend? Wo befindet sich das Wasser, bevor es als Regen zu Boden fällt?

VERSTÄNDLICHKEIT: Wissenschaftler begreifen die Fähigkeit der Luft, Wasserdampf aufzunehmen bzw. auszuscheiden ebenfalls über das Person-Schema (5.2.3.1). Wasser verdunstet, es wird gasförmig und unsichtbar, wodurch die Luft es aufnehmen kann. Im Gegensatz zu den Lernern gehen

die Wissenschaftler jedoch davon aus, dass Luft durch Aufnahme von Wasserdampf leichter wird, da die Wassermoleküle leichter als die verdrängten Luftmoleküle sind. Das Behälter-, Start-Weg-Ziel-, das Teil-Ganzes-Schema spielen also auch eine Rolle. Zudem wird Verdunstungskälte freigesetzt bzw. bei der Ausscheidung Kondensationswärme frei. Die Luft scheidet das Wasser in flüssiger Form wieder aus. Die eigentlichen Prozesse der Verdunstung und Kondensation werden zwar über andere Schemata erfasst, ein Verständnis davon, in welchem Verhältnis Luft zu Wasser in der Atmosphäre steht, kann jedoch über die basale Logik Aufnahme-Zustandsänderung-Ausscheidung erreicht werden.

**PLAUSIBILITÄT UND FRUCHTBARKEIT:** Die wissenschaftliche Vorstellung erklärt, warum Wasserdampf und Luft als etwas Zusammenhängendes betrachtet werden können, während sich Wasser in flüssiger Form und Luft getrennt verhalten, Regen unabhängig von der Luft zu Boden fällt. Sie erklärt auch, warum Wolken nur in der Höhe zu beobachten sind, nicht aber aufsteigender Wasserdampf bzw. aufsteigende Wolken. Mit ihr lässt sich verstehen, woher das flüssige Wasser in den Wolken kommt bzw. wie es dort hingelangt ist. Mit der Vorstellung von Verdunstungskälte bzw. Kondensationswärme in Verknüpfung mit der oben entwickelten Vorstellung ist auch ein Verständnis trocken- und feuchtadiabatischer Prozesse möglich.

5. *Wolken und Regentstehung als Wirken von Gewicht- und Auftriebskräften über Ziehen- und Drücken-Schema angemessen verstehen:*

**UNZUFRIEDENHEIT:** Lerner ziehen das Behälter- und das Teil-Ganzes-Schema heran, um die Beschaffenheit von Wolken und die Ursachen von Regen zu erklären. Sie stellen sich Wolken als Behälter vor, die sich langsam mit Wasserdampf füllen (Typ 8). In den wechselfeuchten Tropen sind diese Behälter besonders groß, weswegen es lange dauert bis diese gefüllt sind, aber auch entsprechend lange, bis sie sich wieder geleert haben (Typ 13). Ob sich die Lerner Regen aufgrund eines Überlaufens des Behälters oder eines Platzens vorstellen, konnte nicht rekonstruiert werden. Mit Hilfe des oben skizzierten Vorschlages können Lerner die Vorstellung entwickeln, dass Wolken aus flüssigem Wasser, nicht jedoch aus Wasserdampf bestehen. Unzufriedenheit könnten daher die folgenden Fragen auslösen: Sollte Wasser nicht direkt zu Boden fallen? Warum füllt sich die Wolke erst? Woraus bestehen die Grenzen dieses Behälters? Wie schaffen es Wolken, das Wasser `zu halten´? Ab wann ist das Wasser zu schwer, sodass es als Regen zu Boden fällt?

**VERSTÄNDLICHKEIT:** Wissenschaftler stellen sich Wolken als bestehend aus winzigen Tröpfchen vor, die in der Luft schweben (5.2.3.1). Dieser Zustand wird über Ziehen- und Drücken-Schemata verstanden: Auftriebskräfte, ausgelöst durch Aufwinde, wirken entgegengesetzt der Gewichtskraft. Die auf diese winzigen Tröpfchen wirkenden Kräfte gleichen sich gegenseitig aus. Aufgrund

molekularer Anziehungskräfte fließen sie jedoch allmählich zusammen, wodurch die auf sie wirkende Gewichtskraft überwiegt und Regen einsetzt.

PLAUSIBILITÄT UND FRUCHTBARKEIT: Die wissenschaftliche Vorstellung erklärt, warum Wasser in flüssiger Form nicht unbedingt zu Boden fällt und Wolken aus flüssigem Wasser bestehen können. Mit ihr lassen sich zudem die Bedingungen näher beschreiben, unter denen Tröpfchen schließlich als Regen niederfallen.

### 6. *Solare Strahlungsintensität als Energie pro Fläche angemessen verstehen:*

UNZUFRIEDENHEIT: Einige Lerner führen die größere Erwärmung der Luft in den Tropen auf einen geringeren Abstand zwischen Erde und Sonne zurück (Typ 10). Sie gehen zudem davon aus, dass die Tropen aufgrund der Kugelgestalt der Erde oder aufgrund der Neigung der Erdachse näher an der Sonne liegen. Auch der Einstrahlungswinkel wird herangezogen, jedoch nur um die Länge des Weges der Strahlen reflektieren zu können. Alltagserfahrungen mit Wärmequellen scheinen diese Vorstellungen zu bestätigen. Für diese Lerner sind das Person- und das Start-Weg-Ziel-Schema relevant. Strahlung wird als Person verstanden, die Energie verbraucht, um sich zu bewegen. Die Strahlung ist also umso intensiver, je kürzer der Weg ist, den sie zurücklegen muss. Unzufriedenheit könnten Darstellungen der elliptischen Erdbahn um die Sonne auslösen. Der geringste Abstand (Perihel) zwischen Erde und Sonne beträgt am 2. Januar etwa 147,5 Millionen Kilometer, die weiteste Entfernung (Aphel) am 4. Juli 152,5 Millionen Kilometer (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 24). Sowohl die durch die Schiefe der Ekliptik bedingte Abstandsänderung zwischen Erde und Sonne aufgrund der Neigung der Halbkugel zur Sonne als auch die größere Nähe der Tropen zur Sonne aufgrund der Kugelgestalt der Erde sind bei diesen Größendimensionen zu vernachlässigen. Dies könnte Lernern veranschaulicht werden, indem der Erdradius mit etwa 6300 Kilometer (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 23) den astronomischen Entfernungen gegenüber gestellt wird. Unzufriedenheit könnte auch durch Hinweisen auf die Zeitpunkte von Aphel und Perihel ausgelöst werden. Wie kann es sein, dass es auf der Nordhalbkugel Winter ist, obgleich sich die Erde knapp 5 Millionen Kilometer näher als im Sommer an der Sonne befindet?

VERSTÄNDLICHKEIT: Wissenschaftler gehen davon aus, dass die Intensität solarer Strahlung vom Einstrahlungswinkel abhängt (5.2.3.1). Umso steiler dieser ist, desto mehr Energie trifft auf die Erdoberfläche. Die Luft in den Tropen erwärmt sich sehr stark, weil hier aufgrund der Kugelgestalt der Erde und der Schiefe der Ekliptik die steilsten Einstrahlungswinkel zwischen  $90^\circ$  und  $66,5^\circ$  vorherrschen (WEISCHET & ENDLICHER 2008, 32-38). Um Vorstellungen von Energie pro Fläche in Abhängigkeit vom Einstrahlungswinkel angemessen vermitteln zu können, bieten sich Modellexperimente mit Taschenlampe oder Tellurium an. Bestrahlt wird eine Fläche aus einem

rechten und einem sehr flachen Winkel. So kann aufgezeigt werden, dass sich die Größe der beschienenen Fläche unterscheidet. Ein Tellurium könnte herangezogen werden, um die Schiefe der Ekliptik und damit Veränderungen im Einstrahlungswinkel verständlich zu machen.

PLAUSIBILITÄT UND FRUCHTBARKEIT: Die neue Erklärung zeigt auf, warum nicht der Abstand zwischen Erde und Sonne relevant für das Verstehen der stärkeren Erwärmung tropischer Luft ist, sondern der Einstrahlungswinkel. Sie erklärt, warum Winter und Sommer zeitgleich auf Nord- und Südhalbkugel stattfinden können bzw. warum die Neigung der Erdachse und die Nähe der Tropen zur Sonne aufgrund der Kugelgestalt der Erde nicht entscheidend sind. Durch das Thematisieren und Veranschaulichen jahreszeitlicher Veränderungen des Einstrahlungswinkels am Tellurium können zudem die Grundlagen für ein Verständnis der Verlagerung der Passatzirkulation nach Norden bzw. Süden geschaffen werden.

7. *Den Einfluss der Erdrotation auf sich bewegende Luft angemessen erfassen:*

UNZUFRIEDENHEIT: Einige Lerner gehen davon aus, dass pol- oder äquatorwärts strömende Luft trägheitsbedingt gegenüber der sich bewegenden Erdoberfläche zurück bleibt, mit dem Resultat, dass sich die Luft nicht mehr parallel zum Meridian bewegt, sondern eine Ablenkung nach Westen erfährt (Typ 21, 33). Die Vorstellungen erinnern an die Aussagen Galileis. Dieser betrachtet die Passatwinde ebenfalls als Relativbewegung der tropischen Luft gegenüber der Erdoberfläche. Bereits in der Interviewsituation äußern die Lerner jedoch Zweifel. Sie sind mit dieser Vorstellung unzufrieden, da sie zur Folge haben müsste, dass Luft immer aus der gleichen Richtung weht, aus Osten. Dies steht im Widerspruch zu Alltagsbeobachtungen. Einige Lerner lehnen diese Erklärung daher ab und begründen, dass die Erdrotation keinen Einfluss auf sich bewegende Luft habe, da sie sich zu langsam drehe. Unzufriedenheit könnte durch einen Hinweis auf die Rotationsgeschwindigkeiten verschiedener Breitenkreise erzeugt werden, die deutlich höher als mögliche Windgeschwindigkeiten sind. Satelliten-Bilder könnten zudem herangezogen werden, um die Effekte der Erdrotation aufzuzeigen. So lassen sich im Bereich der mittleren Breiten beispielsweise Wolkenbänder erkennen, die offensichtlich auf der Nordhalbkugel gegen den Uhrzeigersinn rotieren. Diese Phänomene wirken ebenso rätselhaft, wie die Ostkomponente der Passatwinde, die die Schülerinnen und Schüler letztlich nicht erklären können.

VERSTÄNDLICHKEIT: Wissenschaftler gehen davon aus, dass die Luft aufgrund unterschiedlicher Umdrehungsgeschwindigkeiten verschiedener Breitenkreise abgelenkt wird, da sie die ursprüngliche Rotationsgeschwindigkeit beibehält, bei polwärtiger Bewegung also schneller, bei äquatorwärtiger Bewegung langsamer mitdreht, sodass eine Ablenkung in Bewegungsrichtung auf der Nordhalbkugel nach rechts und auf der Südhalbkugel nach links erfolgt (5.2.3.2 und 5.2.3.4). Auch

breitenkreisparallel strömende Luft wird durch die unterschiedlichen Rotationsgeschwindigkeiten nördlich und südlich entsprechend ablenkt. Die Wirkung der Corioliskraft lässt sich an zahlreichen Experimenten oder Animationen nachvollziehen (siehe STÖBER 2012, 45ff.). Sich meridional bewegend Luft könnte beispielsweise auf einem rotierenden Schreibglobus durch einen Strich angedeutet werden. Setzt man den Stift während der Drehbewegung an, lässt sich eine Ablenkung erkennen (SCHMIDTKE 1995, 124). Verständlich wird die Ursache der Corioliskraft dadurch, dass die Erde gedanklich in Breitenkreise aufgeteilt wird mit dem ausdrücklichen Verweis auf unterschiedliche Rotationsgeschwindigkeiten.

PLAUSIBILITÄT UND FRUCHTBARKEIT: Die wissenschaftliche Vorstellung zeigt auf, dass die Erdrotation Einfluss auf die sich bewegend Luft hat und wie sie wirkt. Mit dem Blick auf den Effekt in den mittleren Breiten, das zyklonale und antizyklonale Wettergeschehen, wird auch klar, warum hier keine konstanten Ostwinde vorherrschen. Sie bildet damit einen wichtigen Grundstein, um das dynamische Wettergeschehen in unseren Breiten zu verstehen.

### 8. *Die Passatzirkulation als komplexes System mit Wechselwirkungen angemessen erfassen:*

UNZUFRIEDENHEIT: Einige Lerner betrachten die Passatzirkulation als einfache Ursache-Wirkungs-Relationen (Typ 30) oder als lineares System (Typ 31). Schülerinnen und Schüler, die die Passatzirkulation als System mit Wechselwirkungen darstellen, erreichen bei weitem nicht die Komplexität der wissenschaftlichen Sicht (Typ 32). Unzufriedenheit mit der Vorstellung, dass Prozesse im Rahmen der Passatzirkulation linear, also zeitlich nacheinander stattfinden, oder sich gegenseitig nicht bedingen, könnte durch Beobachtungen bei Modellexperimenten hervorgerufen werden. Beispielsweise könnte eine thermische Zirkulation von Wasser in einem Glaskasten erzeugt werden, indem in der Mitte eine Wärmequelle (z.B. Teelichter) installiert wird (PERABO 2000, 30). Durch das Hinzufügen von Färbemitteln an verschiedenen Stellen in das Wasser wird deutlich, dass die gesamte Masse zirkuliert und sich die Bewegungen gegenseitig bedingen. Diese Beobachtung steht im Widerspruch zu den artikulierten Vorstellungen zur Passatzirkulation.

VERSTÄNDLICHKEIT: Wissenschaftler verstehen die komplexen Wechselwirkungen im Rahmen der Passatzirkulation mit Ziehen- und Drücken-Schemata (5.2.3.1-5.2.3.4). Luftbewegungen finden zeitgleich statt und bedingen sich gegenseitig. Zur Veranschaulichung könnten vertikale, längenkreisparallele Querschnitte herangezogen werden. Auf Pfeile als Visualisierungsmittel sollte jedoch verzichtet werden, da sie Vorstellungen von sich bewegend Luftkörpern evozieren könnten. Bei diesen Darstellungen sollten auch keine statischen Breitengradangaben verwendet werden, sondern dynamische: Im Bereich der ITCZ sollte beispielsweise vom Zenitstand der Sonne, nicht jedoch vom Äquator gesprochen werden. Auch der Begriff Zenitalregen (HÄCKEL 2012, 301) besitzt

didaktisches Potential, impliziert er doch einen Zusammenhang von Zenitstand der Sonne und den konvektiven Niederschlägen im Bereich der ITCZ. In einigen didaktischen Publikationen findet der Begriff Zenitalregen bereits Verwendung (z.B. LÜKENGA 1990, 67; BAUER ET AL. 2008, 22). Das Modellexperiment mit dem zirkulierenden Wasser kann zudem herangezogen werden, um zu veranschaulichen, wie Regenzeiten entstehen. Hierzu muss die Wärmequelle verschoben werden. Mit zeitlicher Verzögerung verlagert sich die gesamte Zirkulationszelle. Die Verlagerung der Passatzirkulation im jahreszeitlichen Verlauf nach Norden bzw. Süden lässt sich zudem über das Modell der tropischen Wettermaschine veranschaulichen (OBERMANN 1999, 26f.). Hierbei lässt sich ein vertikaler Querschnitt des tropischen Windsystems parallel zum Längengrad verschieben. Die ITCZ befindet sich so beispielsweise je nach Jahreszeit in einem bestimmten Bereich zwischen den Wendekreisen.

**PLAUSIBILITÄT UND FRUCHTBARKEIT:** Die wissenschaftliche Vorstellung erklärt, wie sich Luftbewegungen gegenseitig bedingen. Zudem kann sie herangezogen werden, um die Entstehung von Regen- und Trockenzeiten zu erklären.

### 9. *Inversionsbedingte Trockenheit in den Tropen angemessen erfassen:*

**UNZUFRIEDENHEIT:** Einige Lerner gehen davon aus, dass Regenzeiten durch einen Wechsel der Windrichtung entstehen (Typ 35). Niederschläge erfolgen dann, wenn der Wind aus Richtung Meer oder Ozean weht. Kommt er vom Land, herrscht Trockenheit. Unzufriedenheit könnte daher das Aufzeigen eines Raumes auslösen, der von großen offenen Wasserflächen umgeben ist, im Bereich der Tropen liegt und dennoch sehr trocken ist. Ein Beispiel für einen solchen Raum ist die Insel Ascension im Südatlantik (siehe BASTEN 2012, lff.). Einige Lerner gehen davon aus, dass Trockenheit durch Hitze bedingt wird (Typ 36, 37). Unzufriedenheit mit dieser Vorstellung könnten Raumbeispiele aus den immerfeuchten Tropen auslösen. Hier herrschen hohe Temperaturen bei gleichzeitig ganzjährig hohen Niederschlagssummen.

**VERSTÄNDLICHKEIT:** Wissenschaftler erklären die Trockenheit im Bereich der Randtropen durch die Passatinversion (5.2.3.5). Durch die Wechselwirkung von feuchtadiabatischer Abkühlung im Bereich der ITCZ und trockenadiabatischer Erwärmung im Bereich der trockenen Tropen bildet sich eine Inversionsschicht aus, das heißt mit der Höhe nimmt die Temperatur der Luft ab einem bestimmten Punkt nicht mehr ab. Es kommt zu einer Umkehrung, einer Zunahme der Lufttemperatur. Dies verhindert den weiteren Aufstieg warmer Luft und damit Kondensation, Wolkenbildung und Niederschlag. Wissenschaftler verstehen dies, indem sie Luftdichte und -temperatur relativ zur umgebenden Luft mit Hilfe des Behälter-Schemas betrachten. Zudem greifen sie auf Ziehen- und

Drücken-Schemata zurück, um die Wirkung von Auftriebs- und Gewichtskräften auf die sich vertikal bewegende Luft zu verstehen.

PLAUSIBILITÄT UND FRUCHTBARKEIT: Die wissenschaftliche Erklärung zeigt beispielsweise auf, warum die von riesigen Wasserflächen umgebende, tropische Insel Ascencion so trocken ist. Sie kann zudem herangezogen werden, um inversionsbedingte Trockenheit in den Randtropen zu erklären.

## 8.2 Metakognitiv ausgerichtete didaktische Empfehlungen

Die Bedeutung der *kinesthetic image schemes* und ihrer inhärenten basalen Logiken für Verstehensprozesse sollte mit Lernern explizit thematisiert werden. Sie ermöglichen es, Strukturen von Vorstellungen zu erfassen und miteinander zu vergleichen. Dieses Potential könnte an Beispielen, Vergleichen von Lerner- und Wissenschaftlernaussagen, aufgezeigt werden. Die kognitive Metapherntheorie geht davon aus, dass unser Denken durch Metaphern geleitet wird. Über dieses Verständnis und die damit verbundenen Implikationen sollte gesprochen werden mit dem Ziel, ein Bewusstsein für die Potentiale, aber auch die Gefahren von Metaphern zu entwickeln. Den Lernern sollte aufgezeigt werden, dass sie Prozesse und Phänomene bereits (bewusst oder unbewusst) mit Hilfe von Metaphern verstehen. So greifen einige Schülerinnen und Schüler beispielsweise das metaphorische Konzept 'Wind ist fließendes Wasser' auf, verstehen dies jedoch zu umfassend (Typ 15). Während Wissenschaftler die Art der Bewegung als Strömen oder Fließen veranschaulichen, nutzen Lerner dieses Bild, um die Ursache der Luftbewegung zu erfassen. Einige Lerner verorten Hochdruckgebiete in der Höhe und Tiefdruckgebiete in Bodennähe. Sie gehen davon aus, dass tatsächlich ein Gefälle vorhanden sein muss, damit sich Luft in Bewegung setzt. Das von Wissenschaftlern verwendete metaphorische Konzept 'Luft ist ein Körper', 'Wolken sind Körper', aber auch 'Atmosphäre ist Aufschichtung' wird von Lernern missverstanden. Sie stellen sich einen starren oder festen Luftkörper vor, der sich als eine Art Entität durch den Raum bewegt. Wolken werden als Behälter aufgefasst, die sich mit Wasser oder Wasserdampf füllen. Die Atmosphäre wird als aus Schichten bestehend betrachtet, die aufsteigende Luft, aber auch andere Objekte aufhalten können. Diese Interpretationen sind aus wissenschaftlicher Sicht unangemessen. Den Lernern sollte an Beispielen aufgezeigt werden, wie Wissenschaftler Metaphern nutzen, um bestimmte Phänomene zu beleuchten und zu verstehen. Gleichzeitig sollte aufgezeigt werden, dass dieses metaphorische Verstehen sich aus wissenschaftlicher Sicht nur auf wenige Aspekte beschränkt, während Lerner häufig Metaphern umfassender interpretieren.

Ein weiteres, wichtiges Instrument des Verstehens sind Analogiebildungen. Lerner ziehen häufig Vergleiche aus ihrem Alltag heran, um neue Phänomene oder Prozesse erklären zu können. Sich vertikal bewegende Luft wird mit Objekten im Wasser verglichen: mit Holz, Eis oder Öl. Diese Lerner veranschaulichen damit, dass warme Luft aufsteigt, weil sie leichter als die umgebende Luft ist (Typ

2, 23). Sie betrachten diese also bereits relativ. Problematisch an diesen Vergleichen ist, dass Wasser im Gegensatz zur Luft der Atmosphäre seine Dichte nicht ändert. Dass sich ein Objekt ausdehnt oder zusammenzieht, weil sich die Dichte des umgebenden Mediums verändert, die wissenschaftliche Vorstellung der adiabatischen Prozesse, lässt sich lebensweltlich nicht nachvollziehen. Es gibt keine angemessenen Vergleiche. Ein Lerner erklärt, dass Objekte schneller aufsteigen oder sinken, wenn sich die Dichte des umgebenden Mediums, im Beispiel Wasser, welches durch Gasblasen verdünnt wird, ändert (Typ 23). Auch dieser Vergleich erfasst die Situation aufsteigender oder absinkender Luft in der Atmosphäre nur unzureichend. Kondensation in der Atmosphäre kann ebenfalls nicht beobachtet oder mit Vergleichen angemessen veranschaulicht werden. Im Alltag lässt sich das Phänomen lediglich an kühlen Oberflächen wie Spiegeln im Badezimmer oder Deckeln von Kochtöpfen beobachten, sofern die entsprechenden Bedingungen gegeben sind. Die wissenschaftliche Vorstellung von der Intensität einer beschienenen Fläche in Abhängigkeit vom Einstrahlungswinkel lässt sich ebenfalls im Alltag kaum nachvollziehen. Diese Vorstellung ist sehr abstrakt im Gegensatz zur Auffassung, dass die Nähe zur Wärmequelle entscheidend für die Erwärmung von Objekten ist (Typ 10). Lerner ziehen im Kontext Passatzirkulation häufig einfache, monokausale Erklärungen heran (Typ 30) oder entwickeln Vorstellungen von linearen, zeitlich nacheinander ablaufenden Prozessen (Typ 31). Multikausalität und Wechselwirkungen lassen sich in der Regel im Alltag nicht direkt beobachten. Über diese Nicht-Erfahrbarkeit bestimmter Phänomene und Zusammenhänge sollte explizit gesprochen werden.

Der Rahmentheorieansatz (VOSNIADOU 2008) geht davon aus, dass Annahmen aus spezifischen Theorien abgeleitet werden, die wiederum eingebettet sind in grundlegende ontologische und epistemologische Überzeugungen (siehe Kapitel 2). Die Vorstellung, dass Luft nicht oder nur bedingt der Erdanziehungskraft unterliegt (Typ 21, 33) und sich daher relativ zur Erdoberfläche bewegt, könnte auf der grundlegenden Überzeugung basieren, dass Luft ein leichtes Element ist und sich eigenständig verhält. In Alltagssituationen lässt sich beobachten, dass vermeintlich leichte Objekte wie Rauch oder Nebel aufsteigen, während schwere Dinge wie etwa Steine zu Boden fallen. Auch die absolute Betrachtungsweise aufsteigender oder absinkender Luft (Typ 1, 22) und die Vorstellung, dass Wolken aus Wasserdampf und nicht aus Wasser bestehen (Typ 8, 38), könnten sich auf solche Grundüberzeugungen zurückführen lassen. Lerner tendieren zudem dazu, Luft als eine sich durch den Raum bewegende Entität aufzufassen, die mit anderen Objekten zusammenstoßen, sich aber auch teilen kann (Typ 14, 16, 20). Dass Luft allgegenwärtig ist, wird in den wenigsten Alltagssituationen bewusst wahrgenommen. Kinder lernen Luft als Entitäten kennen, wenn sie beispielsweise sich im Wind bewegende Blätter und Äste von Bäumen beobachten oder den Wind spüren können. Geräusche werden durch den Wind verursacht. Er erscheint irgendwie als Person, als Entität. Während Wind spürbar ist und sich indirekt beobachten lässt, kann ruhende Luft nicht ohne

Weiteres wahrgenommen werden. Dass sie existiert, ein Gewicht hat und einen Druck ausübt, ist nicht spürbar. Aufgrund dieser Erfahrungen könnten Menschen im Laufe ihrer Kindheit die (unbewusste) Überzeugung entwickeln, von einem luftleeren Raum umgeben zu sein. Die Annahme, dass dieser von Wind- oder Luftentitäten durchquert wird, verhält sich kompatibel zu dieser Grundüberzeugung. Im Rahmen der Interviewstudie konnten zahlreiche teleologische Vorstellungen identifiziert werden (Typ 9, 26, 29). Gemeinsam ist ihnen, dass sie den Vorgängen in der Natur Zwecke und Absichten unterstellen. Der Gebrauch zahlreicher Personifizierungen im Rahmen wissenschaftlicher Vorstellungen verstärkt diese Annahme bei Lernern, da sie diese Metaphern wörtlich interpretieren. Die artikulierten teleologischen Ideen basieren auf entsprechenden ontologischen und epistemologischen Grundüberzeugungen von einer Zweckbestimmung der Welt und einer Ausrichtung ihrer Strukturen auf diese Zwecke. Mit Hilfe des Kategorisierungsansatzes (CHI 2008) lässt sich aufzeigen, warum einige Lernende beispielsweise Schwierigkeiten haben, zu verstehen, warum Luft mit zunehmender Temperatur leichter wird (Typ1, 26). Sie betrachten Wärme, Energie oder Strahlung als etwas Stoffliches. Das Person-Schema verstärkt diese Vorstellung: Luft nimmt Wärme auf. Die Lerner schlussfolgern, dass sich hierdurch der Zustand der Luft ändert und sie schwerer wird, vergleichbar mit dem menschlichen Körper, der Nahrung aufnimmt. Es wird empfohlen, die Bedeutung von Erfahrungen für die Entwicklung von Vorstellungen zu thematisieren. Aus Gründen der Verständlichkeit sollten diese Zusammenhänge an Beispielen veranschaulicht werden. Dass Lerner bestimmte Phänomene oder Zusammenhänge nur schwer glauben können, liegt eben an diesen individuellen Rahmentheorien oder an aus wissenschaftlicher Sicht unzulässigen ontologischen Kategorisierungen.

Dass auch wissenschaftliche Vorstellungen stetig weiterentwickelt werden und letztlich keine absolute Wahrheit repräsentieren, könnte durch Einbinden der historischen Vorstellungen thematisiert werden. Francis Bacons Aussagen, dass Wind durch einen Anstoß angrenzender Luft initiiert wird (siehe Kapitel 5, Abschnitt 5.1.1) ähneln den Vorstellungen der Lerner, dass Luftentitäten gegeneinander stoßen können (Typ 20, 34) oder Wind durch ein Drücken entsteht (Typ 16). Galileis Vorstellung einer Relativbewegung der Luft gegenüber der sich rotationsbedingt bewegendem Erdoberfläche oder Halleys Erklärung des Einflusses des Tagesganges der Sonne auf die Passatwinde (siehe Kapitel 5, Abschnitt 5.1.2 und 5.1.3) könnten ähnlichen Lernaussagen (Typ 21, 30, 33) gegenüber gestellt werden.

Einige Lerner artikulieren Vorstellungen, die Ideen oder Aspekte des dynamischen Wettergeschehens aufgreifen und auf die Tropen projizieren. So verbinden sie beispielsweise mit einem Hoch gutes und mit einem Tief schlechtes Wetter (Typ 30). Diese Zusammenhänge werden durch alltägliche Wetterberichte suggeriert. Es sollte darüber gesprochen werden, dass die Zirkulation in den Tropen thermisch bedingt ist, während die Deutschland prägenden Wettervorgänge dynamische Ursachen

haben. Die Rolle von Modellen, ihre Funktionen und ihr Verhältnis zur Wirklichkeit sollten auf der Metaebene reflektiert werden.

### **8.3 Soziale und affektive Faktoren und didaktische Empfehlungen**

In Kapitel 2 wurde herausgearbeitet, dass die zielgerichtete Vorstellungsentwicklung im gemäßigt-konstruktivistisch orientierten Geographieunterricht immer auch soziale und affektive Aspekte berücksichtigen sollte. Lernumgebungen sollten so gestaltet sein, dass sie Lernen in sozialer Interaktion ermöglichen und zudem von aus Lernalternativen interessanten Problem- und Fragestellungen ausgehen. Mit Hilfe des Kontextmodells (CARRAVITA & HALLDÉN 1994, 108) kann die Perspektive, mit der Schülerinnen und Schüler die Passatzirkulation wahrnehmen, reflektiert und mit wissenschaftlichen Sichtweisen verglichen werden. Auf der Ebene der Praxis, also im Kontext konkreter Erfahrungen und Wahrnehmungen sind Luftbewegungen oder Wettererscheinungen für Lerner im Alltag dann relevant, wenn sie ihre Aktivitäten beeinflussen. So können extreme Wettererscheinungen wie Stürme oder Hitze dazu führen, dass Geplantes wie Wanderungen, Grill-, Sportaktivitäten oder sonstiges Hobbys, die im Freien verrichtete werden, abgesagt werden müssen. Luftbewegungen oder Wettererscheinungen können aus Lernalternativen auch rätselhaft sein, wenn beispielsweise während eines Urlaubs in den Tropen festgestellt wird, dass der Wind vorherrschend aus östlicher Richtung weht. In der Regel betrachten Lerner diese Erscheinungen jedoch nicht kausal-analytisch sondern eher phänomenologisch. Mögliche Erklärungen der Ursachen von Luftbewegungen oder Wettererscheinungen sind im Alltag kaum von Nutzen, da sich die Ereignisse trotz dieses Wissens nicht beeinflussen lassen würden. Unter Umständen werden sie jedoch in einen größeren Zusammenhang gestellt. So könnten Lerner davon ausgehen, dass sie mit dem schlechten Wetter für etwas bestraft werden. Sie würden dem ganzen also einen Zweck unterstellen, es in einen höheren, weltanschaulichen Kontext einbinden. Ein Indiz hierfür sind die zahlreichen erhobenen teleologischen Vorstellungen. Wissenschaftler hingegen betrachten Luftbewegungen und Wettererscheinungen kausal-analytisch. Sie gehen von wissenschaftlichen Theorien und Hypothesen aus, die überprüfbar sind und die nicht in ideologische oder weltanschauliche Zusammenhänge eingebettet sein sollten. Die Kenntnisse der Ursachen und Zusammenhänge global vorherrschender Windrichtungen helfen den Wissenschaftlern, die Veränderungen im System der Allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre vorhersagen zu können, was wiederum für konkrete Anwendungskontexte wie beispielsweise die Ausgestaltung von Flug- oder Schifffahrtsrouten nützlich ist. Es dient auch dazu, die Entwicklung von Wetter- und Klimabedingungen in Naturräumen vorherzusagen. Diese Kontexte und Anwendungsbezüge sollten Schülerinnen und Schülern aufgezeigt werden. Lerner betrachten die Passatzirkulation aus einer anderen Perspektive und mit

anderen Zielen als Wissenschaftler, was bei der konkreten Ausgestaltung von Lernangeboten zu beachten ist und zudem auf der Metaebene thematisiert werden sollte.

#### **8.4 Konkretisierung der didaktischen Empfehlungen**

Die didaktischen Empfehlungen sind als allgemeine Richtlinien oder Rahmenbedingungen zu verstehen. Sie sollen Lehrerinnen und Lehrer bei der konkreten Ausgestaltung von Lernumgebungen und Unterrichtsmaterialien helfen. Diese sollten so ausgelegt sein, dass sich Lernende zunächst ihrer Alltagsvorstellungen zu den Unterrichtsinhalten bewusst werden, diese überprüfen und mit Hilfe entsprechender Materialien oder Interventionen weiterentwickeln können (REINFRIED 2007, 19ff.). Doch wie können diese Empfehlungen nun unter Berücksichtigung der curricularen Vorgaben sinnvoll umgesetzt werden? Dies soll exemplarisch an den Vorgaben für das Grund- und Leistungsfach Erdkunde in Rheinland-Pfalz aufgezeigt werden. Sowohl im Grund- als auch im Leistungsfach Geographie wird die Passatzirkulation im Themenbereich 'Geozonen' in Jahrgangstufe 11 bzw. 12 betrachtet: Die Schülerinnen und Schüler sollen u. a. die Geozonen als globales System begreifen und dabei die Allgemeine Zirkulation der Atmosphäre und in Abhängigkeit davon die Verteilung von Klimazonen, Vegetationsgebieten und Landschaftsgürteln begründen. Zudem sollen die Lerner Geozonen als Ökosysteme mit labilem Gleichgewicht erkennen. Inhaltliche Aspekte, die hierzu verbindlich vorgegeben werden, sind u. a. die Passatzirkulation, Klimazonen, Klimatypen, Vegetationsgebiete und Landschaftsgürtel. Hierzu wird ein Zeitrichtwert von 25 bzw. 18 Unterrichtsstunden empfohlen (MBWJK 2011, 41 und 133).

Folgende lernprozessanregende Aufgabenstellungen (TULODZIECKI 2009, 88ff.) könnten den Rahmen von Unterrichtsreihen in der gymnasialen Oberstufe unter Berücksichtigung dieser curricularen Vorgaben und einem Zeitumfang von etwa 10 Unterrichtsstunden bilden: (1) Ein aus Lernaltersicht rätselhaftes Phänomen, beispielsweise eine Insel in der Zone der trockenen Randtropen, soll erklärt werden. Das für die Lerner Unstimmige oder Widersprüchliche stellt die geringe Jahresniederschlagssumme dar, liegen solche Inseln doch in den warmen Tropen und sind von hunderten Kilometern Ozean umgeben. Veranschaulicht werden könnte die Trockenheit durch Bilder der vegetationslosen, mondähnlichen Landschaften solcher Inseln, beispielsweise Ascensions (Basten 2012, 1ff.). Ein komplexes Problem hat die Eigenschaft, dass der Lösungsweg unbekannt ist und von den Lernern erarbeitet werden muss. (2) Die Lerner könnten auch mit einer Entscheidungsaufgabe konfrontiert werden. Auf einigen Schifffahrtsrouten kommen Hilfssegel für moderne Containerschiffe zur Treibstoffersparnis zum Einsatz. Auf bestimmten Strecken lassen sich diese Hilfssegel besonders effektiv einsetzen: Etwa im Frühjahr auf der Strecke von Los Angeles nach Singapur, da hier die Passatwinde beständig aus nordöstlicher Richtung wehen und die Passatinversion für Trockenheit sorgt, sodass die Segel nicht nass werden. Die Lerner könnten anhand von Karten mit den

wichtigsten Schifffahrtsrouten im globalen Containerverkehr vertraut gemacht werden und sollen dann entscheiden, auf welchen Strecken sich zu welcher Jahreszeit Hilfssegel besonders effektiv einsetzen lassen könnten. (3) Zahlreiche Urlaubsziele liegen in den Tropen. Etwa die kapverdischen Inseln. Diese werden von Oktober bis Juni durch den Nordostpassat geprägt, der große Mengen an Saharastaub mit sich bringt und Flug- sowie Schiffsverkehr beeinflussen sowie die Urlaubsqualität mindern kann. Von Juli bis September bestimmen konvektive Niederschläge das Wetter der Kapverden, da sie in dieser Zeit im Einflussbereich der ITCZ liegen. Die Lerner könnten mit einer komplexen Beurteilungsaufgabe konfrontiert werden: Sie sollen vor dem Hintergrund der klimatischen Rahmenbedingungen, die erarbeitet werden müssen, beurteilen, ob eine Urlaubsreise auf die Kapverden in den Weihnachtsferien sinnvoll erscheint. Ein solcher Kontext könnte auch als Gestaltungsaufgabe dargelegt werden: Welches Urlaubsprogramm wäre zwischen Dezember und Januar auf den Kapverden möglich? Welche Kleidung, welches sonstige Gepäck sollte mitgenommen werden? Die Lerner müssten also auch erarbeiten, mit welchen Lufttemperaturen zu rechnen ist und warum.

Unterrichtsreihe in einem komplexen Problem-, Entscheidungs-, Beurteilungs- oder Gestaltungskontext	
Baustein	Thema
1	Windentstehung und Folgen im Allgemeinen
2	Verdunstung, Kondensation, Wolkenbildung und Regen im Allgemeinen
3	Ursache hoher Lufttemperaturen in der Tropen
4	Passatzirkulation und Passatwinde
5	Inversionsbedingte Trockenheit in der Tropen
Abschluss: Zusammenführung der Erkenntnisse, Klärung des Problems, Treffen der Entscheidung, Beurteilung bzw. Gestaltung eines Urlaubsprogrammes	

**Tabelle 121:** Fünf Bausteine zur Erarbeitung naturwissenschaftlichen Hintergrundwissens im Überblick.

Das naturwissenschaftliche Hintergrundwissen für diese komplexen Problem-, Entscheidungs-, Beurteilungs- oder Gestaltungsaufgaben könnten sich die Lerner mit Hilfe von fünf Bausteinen mit einem Zeitrichtwert von jeweils etwa 90 Minuten erarbeiten. Diesen Bausteinen liegt jeweils eine Problemorientierung zugrunde. Sie verknüpfen inhaltliches und metakognitives Lernen (siehe Kapitel 2, Abschnitt 2.4). Ziel ist es, in einem Zeitumfang von etwa 10 Unterrichtsstunden die Entwicklung aus wissenschaftlicher Sicht angemessener, transferfähiger, modellhafter Vorstellungen u. a. zu Ursachen und Folgen horizontaler Luftbewegungen, himmelsmechanischen Einflüssen, adiabatischen Prozessen sowie Wolken- und Niederschlagsbildung im Kontext Passatzirkulation zu fördern, die auf andere Räume übertragen werden können und somit entsprechend der curricularen Vorgaben ein Verständnis der Allgemeine Zirkulation der Atmosphäre und der Zonalität der Erde (Klima-, Vegetationszonen, Landschaftsgürtel) ermöglichen (MBWJK 2011, 41 und 133).

Baustein 1: Windentstehung und Folgen im Allgemeinen		
Komplexe Probleme/ Leitfragen: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Welche Ursachen haben Luftbewegungen?</li> <li>• Inwiefern verändert sich Luft beim Bewegen?</li> <li>• Wie lange dauern Luftbewegungen an?</li> </ul>		
Kognitiv ausgerichtete Empfehlungen	Metakognitiv ausgerichtete Empfehlungen	
1,2,3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• metaphorische Konzepte 'Luft ist fester Körper', 'Atmosphäre ist Aufschichtung', 'Wind ist fließendes Wasser', 'Luft und Wind sind Personen'</li> <li>• Nichterfahrbarkeit adiabatischer Prozesse</li> <li>• Erfahrung: (unbewusste) Überzeugung luftleerer Raum</li> <li>• Funktion von Modellen</li> <li>• historische Vorstellung von Windentstehung als Anstoß von Luft durch Luft (Francis Bacon)</li> <li>• Wissenschaftler- und Lernerperspektiven auf atmosphärische Phänomene und Prozesse</li> </ul>	
Phase	Ziele	Methode
Einstieg	Bewusstwerden eigener Vorstellungen	Visualisieren eigener Vorstellungen über Texte, Skizzen, <i>concept maps</i> , etc.
Überleitung	Widersprüchlichkeit der eigenen Vorstellungen erkennen	Kognitive Konflikte erzeugen durch Beobachtungen bei Experimenten (z.B. Tee-Lichtkreis), Ansprechen von Alltagserfahrungen sowie das Aufzeigen des vertikalen Temperaturprofils der Atmosphäre
Erarbeitung	Ursachen und Folgen vertikaler und horizontaler Luftbewegungen erfassen, Lufttemperatur als Bewegungsenergie der Moleküle verstehen	Experimente und Einsatz schematischer Abbildungen zu Luftdichte, -druck, -temperatur, Gradientkraft, adiabatischen Prozessen; Thematisieren metaphorischer Konzepte, Nichterfahrbarkeit, Erfahrungen und Modellen auf der Metaebene
Sicherung	Festigen über Transfer	konkreten Raumbezug herstellen: z.B. Land-See-Windsystem

**Tabelle 122:** Baustein 1 'Windentstehung und Folgen im Allgemeinen' im Überblick.

Baustein 1 soll die Lerner dazu befähigen, Ursachen und Folgen vertikaler und horizontaler Luftbewegungen aus wissenschaftlicher Sicht angemessen zu erfassen sowie die Lufttemperatur als Bewegungsenergie der Moleküle zu verstehen. Die kognitiv ausgerichteten didaktischen Empfehlungen 1 bis 3 werden hier konkret umgesetzt. Die Lerner der Jahrgangsstufe 11 bzw. 12 könnten dabei von folgenden Vorstellungen ausgehen: (1) absolute Betrachtungsweise sich vertikal bewogender Luft (Typ 1, 7, 8, 9, 17, 22, 28), (2) Luft als sich bewogender fester Körper (Typ 3, 9, 14, 16, 20, 24, 29, 34), (3) Luft leitet Wärme an umgebende Luft und Luft wird durch Energie- oder Wärmeaufnahme schwerer (Typ 4, 10, 11, 25, 27). Unzufriedenheit bei den Lernern mit diesen aus wissenschaftlicher Sicht unangemessenen Vorstellungen könnten u. a. folgende Fragen bzw. Impulse erzeugen:

- *Wie sollen Grenzen, die aufsteigende Luft aufhalten, beschaffen sein?*
- *Ab welcher Temperatur steigt Luft nicht mehr auf?*
- *Warum befindet sich Luft nicht in einer permanenten Auf- und Abwärtsbewegung?*
- *Wieso drehen sich Windräder beständig?*
- *Wie lassen sich die Beobachtungen am Tee-Licht-Kreis erklären?*
- *Warum steigt warme Luft auf, wenn sie durch Wärme schwerer wird?*
- *Wenn Luft Wärme leitet und warme Luft aufsteigt, müsste sich die Luft in der Höhe erwärmen!*

Die Erarbeitung könnte mit Hilfe von Experimenten zu Luftdruck, -dichte- und -temperatur und unter Einsatz der im Rahmen der fachlichen Klärung entwickelten schematischen Abbildungen (siehe Kapitel 5, Abschnitt 5.2.2.2 und 5.2.2.5) erfolgen. Auf der Metaebene sollten die mit den metaphorischen Konzepten 'Luft ist fester Körper', 'Atmosphäre besteht aus Schichten', 'Wind ist fließendes Wasser', 'Luft und Wind sind Personen' einhergehenden Gefahren und Erklärungspotentiale in Hinblick auf das Verständnis horizontaler und vertikaler Luftbewegungen

thematisiert werden. Ebenso sollte in diesem Kontext die Nichterfahrbarkeit adiabatischer Prozesse sowie das daraus resultierende Problem fehlender angemessener lebensweltlicher Vergleiche angesprochen werden. Die Rolle (unbewusster) Überzeugungen, etwa die eines luftleeren Raumes, der von Luftentitäten durchquert wird, sollte angesprochen werden. Zudem könnte aufgezeigt werden, dass es sich um modellhafte Vorstellungen handelt, die herangezogen werden, um allgemeine Gesetzmäßigkeiten der Windentstehung zu erfassen und damit bestimmte Phänomene in verschiedenen räumlichen Kontexten zu erklären. Indem thematisiert wird, dass auch historische wissenschaftliche Vorstellungen Windentstehung als eine Art Impuls oder Anstoß auffassen (Francis Bacon), können Parallelen zu den Vorstellungen der Lerner und die Entwicklung wissenschaftlicher Vorstellungen aufgezeigt werden. Den Lernern sollte zudem bewusst gemacht werden, dass sie im Alltag atmosphärische Phänomene und Prozesse aus einer anderen Perspektive und mit anderen Intentionen betrachten als Wissenschaftler. Eine Sicherung könnte durch Herstellen eines konkreten geographischen Anwendungskontextes, etwa des Land-See-Windsystems, erfolgen.

Baustein 2: Wolken- und Niederschlagsbildung		
Komplexe Probleme/ Leitfragen: <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Wie entstehen Wolken?</i></li> <li>• <i>Woraus bestehen Wolken?</i></li> <li>• <i>Wie entsteht Regen?</i></li> </ul>		
<b>Kognitiv ausgerichtete Empfehlungen</b>	<b>Metakognitiv ausgerichtete Empfehlungen</b>	
4,5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• metaphorische Konzepte 'Wolken sind feste Körper', 'Wolken sind wachsende, organische Körper', 'Moleküle und Wasserdampf sind Personen'</li> <li>• Nichterfahrbarkeit von Kondensation in der Atmosphäre</li> <li>• Erfahrung: (unbewusste) Überzeugung von Wasser als schwerem Element</li> <li>• Funktion von Modellen</li> <li>• Wissenschaftler- und Lernerperspektiven auf atmosphärische Phänomene und Prozesse</li> </ul>	
Phase	Ziele	Methode
Einstieg	Bewusstwerden eigener Vorstellungen	Visualisieren eigener Vorstellungen über Texte, Skizzen, <i>concept maps</i> , etc.
Überleitung	Widersprüchlichkeit der eigenen Vorstellungen erkennen	Kognitive Konflikte erzeugen durch Beobachtungen im Alltag (z.B. beim Kochen) sowie Widersprüchen oder Phänomenen, die mit den Vorstellungen nicht erklärt werden können
Erarbeitung	Verdunstung und Kondensation auf molekularer Ebene verstehen; Wolken als aus Wasser bestehend verstehen (Gewichts- und Auftriebskräfte ausgeglichen), Regen als Folge eines Überwiegens der Gewichtskraft gegenüber der Auftriebskraft verstehen	Wasser in der Atmosphäre differenziert betrachten (Gas und Flüssigkeit) über Experimente und Einsatz schematischer Abbildungen; Thematisieren metaphorischer Konzepte, Nichterfahrbarkeit, Erfahrungen und Modellen auf der Metaebene
Sicherung	Festigen über Transfer	konkreten Raumbezug herstellen: z.B. thermische Konvektion und konvektive Niederschläge im Bereich der ITCZ

**Tabelle 123:** Baustein 2 'Wolken- und Niederschlagsbildung' im Überblick.

Mit Baustein 2 wird das Ziel verfolgt, Lernern ein aus wissenschaftlicher Sicht angemessenes Verständnis von Verdunstung und Kondensation auf molekularer Ebene zu ermöglichen. Zudem sollen Wolken als aus Wasser bestehend (Gewichts- und Auftriebskräfte ausgeglichen) und Regen als Folge eines Überwiegens der Gewichtskraft gegenüber der Auftriebskraft verstanden werden. Die kognitiv ausgerichteten didaktischen Empfehlungen 4 und 5 finden Berücksichtigung. Vorstellungen, die die Lerner zu Beginn artikulieren, könnten von folgendem ausgehen: (1) Luft wird durch Aufnahme von Wasserdampf schwer (Typ 5), (2) Wasser und Luft sind gleich bzw. Regen sinkt mit Luft ab (Typ 8), (3) Wolken sind Behälter, die sich mit Wasserdampf füllen, es regnet umso länger,

umso größer diese gefüllten Behälter sind (Typ 12, 13, 38). Mit folgenden Fragen und Impulsen könnte Unzufriedenheit bei den Lernern mit ihren Vorstellungen erzeugt werden:

- *Wieso lässt sich weißer Rauch (wie z.B. beim Kochen) nicht in der Natur beobachten?*
- *Wieso können Wolken nur gesehen werden, wenn sie bereits in der Höhe sind, warum nicht aufsteigend?*
- *Wo befindet sich das Wasser, bevor es als Regen zu Boden fällt?*
- *Wie schafft es die Wolke, das Wasser zu halten?*
- *Wann und wie wird aus Wasserdampf Wasser?*
- *Warum füllt sich die Wolke erst?*
- *Woraus bestehen die Grenzen dieses Behälters?*

Die Erarbeitung könnte mit Hilfe der im Rahmen der fachlichen Klärung erstellten schematischen Abbildungen (siehe Kapitel 5, Abschnitt 5.2.2.3) erfolgen. Zudem bieten sich Experimente an einem Wasserkreislauf-Modell an. Es handelt sich hierbei um einen geschlossenen Behälter, in dem Wasser an einer Stelle durch eine Wärmequelle zum Verdunsten gebracht wird und an einer anderen Stelle durch Abkühlung (in Form von Eiswürfeln außerhalb des Behälters) zum Kondensieren. Es lässt sich beobachten, dass der Wasserspiegel durch Verdunstung absinkt und Wassertröpfchen an der anderen Seite des Modells auftauchen. Der Wasserdampf lässt sich also nicht beobachten. Er ist unsichtbar. Entsprechend müssen Wolken aus flüssigem Wasser bestehen. Wichtig erscheint in diesem Kontext das Thematisieren der metaphorischen Konzepte 'Wolken sind feste Körper', 'Wolken sind wachsende, organische Körper' und 'Moleküle und Wasserdampf sind Personen' auf der Metaebene. Ebenso sollten die Nichterfahrbarkeit von Kondensation in der Atmosphäre sowie die (unbewusste) Überzeugung von Wasser als schwerem Element angesprochen werden. Dass es sich bei Vorstellungen von Verdunstung, Kondensation, Wolken- und Niederschlagsbildung um etwas Modellhaftes handelt, sollte aufgezeigt werden. Auch in diesem Kontext bietet es sich an, unterschiedliche Perspektiven von Lernern und Wissenschaftlern auf atmosphärische Phänomene und Prozesse zu thematisieren. Ein konkreter Raumbezug könnte durch einen Transfer zu thermischer Konvektion und konvektiven Niederschläge im Bereich der ITCZ hergestellt werden.

Baustein 3: Ursache hoher Lufttemperaturen in der Tropen		
Komplexe Probleme/ Leitfragen: <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Wie entstehen die Jahreszeiten?</i></li> <li>• <i>Warum herrschen in den Tropen höhere Lufttemperaturen?</i></li> </ul>		
Kognitiv ausgerichtete Empfehlungen	Metakognitiv ausgerichtete Empfehlungen	
6	<ul style="list-style-type: none"> <li>• metaphorische Konzepte 'Strahlung, Wärme und Energie sind fluide Körper', 'Strahlung, Wärme und Energie sind Nahrung', 'Energie und Wärme sind Ressource'</li> <li>• Nichterfahrbarkeit des Einstrahlungswinkels</li> <li>• Erfahrung: Nähe zur Wärmequelle; (unbewusste) Überzeugung: Wärme als etwas Stoffliches</li> <li>• Funktion von Modellen</li> <li>• Wissenschaftler- und Lernerperspektiven auf atmosphärische Phänomene und Prozesse</li> </ul>	
Phase	Ziele	Methode
Einstieg	Bewusstwerden eigener Vorstellungen	Visualisieren eigener Vorstellungen über Texte, Skizzen, <i>concept maps</i> , etc.
Überleitung	Widersprüchlichkeit der eigenen Vorstellungen erkennen	Kognitive Konflikte erzeugen durch Hinweise auf Zeitpunkte von Aphel und Perihel sowie den Wechsel von Winter und Sommer auf den beiden Halbkugeln
Erarbeitung	Zusammenhang zwischen Strahlungsintensität und Einstrahlungswinkel verstehen	Experimente zum Einstrahlungswinkel und zur Himmelsmechanik mit Taschenlampe oder Tellurium, Animationen zur Erdrotation und –revolution; Einsatz schematischer Abbildungen zur Himmelsmechanik und zum Strahlungshaushalt; Thematisieren metaphorischer Konzepte, Nichterfahrbarkeit, Erfahrungen und Modellen auf der Metaebene
Sicherung	Festigen über Transfer	konkreten Raumbezug herstellen: z.B. Klimazonen, Vegetationszonen, Landschaftsgürtel

**Tabelle 124:** Baustein 3 'Ursachen hoher Lufttemperaturen in den Tropen im Überblick'.

Baustein 3 dient dazu, himmelsmechanische Ursachen höherer Lufttemperaturen in den Tropen nachvollziehbar zu machen. Die Lerner sollen dabei den Zusammenhang zwischen solarer Strahlungsintensität und Einstrahlungswinkel verstehen. Hierbei wird auf die kognitiv ausgerichtete didaktische Empfehlung 6 zurückgegriffen. Zu erwartende Vorstellungen der Lerner in diesem Kontext sind: (1) Lufttemperaturen sind vom Abstand zwischen Erde und Sonne abhängig; (2) aufgrund der Kugelgestalt der Erde befinden sich die Tropen näher an der Sonne; (3) aufgrund der Neigung der Erdachse befinden sich jeweils die Nord- oder die Südhalbkugel näher an der Sonne (Typ 10). Unzufriedenheit könnte folgende Frage in Kombination mit entsprechenden Abbildungen zur Himmelsmechanik auslösen:

- *Wie kann es sein, dass es auf der Nordhalbkugel Winter ist, obgleich die Erde knapp 5 Millionen Kilometer näher an der Sonne ist als im Winter?*

Zur Erarbeitung könnten Experimente zum Einstrahlungswinkel und zur Himmelsmechanik mit Taschenlampe oder Tellurium, Animationen zur Erdrotation und –revolution sowie schematischer Abbildungen zur Himmelsmechanik und zum Strahlungshaushalt (siehe Kapitel 5, Abschnitt 5.2.2.1) zum Einsatz kommen. Auf der Metaebene sollten die metaphorische Konzepte 'Strahlung, Wärme und Energie sind fluide Körper', 'Strahlung, Wärme und Energie sind Nahrung' sowie 'Energie und Wärme sind Ressource' thematisiert werden. Dass es sich bei der Vorstellung der Strahlungsintensität in Abhängigkeit vom Einstrahlungswinkel um ein kaum erfahrbares, abstraktes Konzept handelt und die Erfahrung der Relevanz der Entfernung zur Wärmequelle im Alltag viel häufiger zu machen ist, sollte ebenfalls reflektiert werden. Zudem könnte Wärme (unbewusst) als etwas Stoffliches kategorisiert werden, was zu Verständnisproblemen führt und in diesem Kontext ebenfalls aufgezeigt werden sollte. Auch im Rahmen dieses Bausteines könnte die Funktion von

Modellen, in diesem Fall Modelle zur Himmelsmechanik und zum Strahlungshaushalt, thematisiert werden, ebenso wie unterschiedliche Perspektiven von Lernern und Wissenschaftlern auf atmosphärische Phänomene und Prozesse. In einer Sicherungsphase könnte das erarbeitete Wissen herangezogen werden, um die zonale Anordnung von Klima-, Vegetationszonen oder Landschaftsgürteln zu erklären.

Baustein 4: Passatzirkulation und Passatwinde		
Komplexe Probleme/ Leitfragen: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Welche Ursachen haben die Passatwinde?</li> <li>• Warum wehen sie auf der Nordhalbkugel aus nordöstlicher und auf der Südhalbkugel aus südöstlicher Richtung?</li> </ul>		
Kognitiv ausgerichtete Empfehlungen	Metakognitiv ausgerichtete Empfehlungen	
7,8	<ul style="list-style-type: none"> <li>• metaphorische Konzepte `Luft ist fester Körper`, `Atmosphäre ist Aufschichtung`, `Wind ist fließendes Wasser`, `Luft und Wind sind Personen`</li> <li>• Nichterfahrbarkeit von Multikausalität und Wechselwirkungen sowie adiabatischer Prozesse</li> <li>• Erfahrung: (unbewusste) Überzeugung von Luft als leichtem Element</li> <li>• Funktion von Modellen</li> <li>• historische Vorstellung einer Relativbewegung der Luft gegenüber der Erdoberfläche (Galilei) bzw. des Einflusses der Sonne auf die Bewegungsrichtung der Passatwinde (Halley)</li> <li>• Wissenschaftler- und Lernerperspektiven auf atmosphärische Phänomene und Prozesse</li> </ul>	
Phase	Ziele	Methode
Einstieg	Bewusstwerden eigener Vorstellungen	Visualisieren eigener Vorstellungen über Texte, Skizzen, <i>concept maps</i> , etc.
Überleitung	Widersprüchlichkeit der eigenen Vorstellungen erkennen	Kognitive Konflikte erzeugen durch Hinweise auf Rotationsgeschwindigkeiten der Breitenkreise oder Beobachtungen bei Experimenten zur thermischen Zirkulation von Wasser
Erarbeitung	Passatwinde als Teile einer thermischen Zirkulation mit himmelsmechanischen Einflüssen (Erdrotation, Kugelgestalt der Erde), Wechselwirkungen und Rückkopplungen verstehen	Experimente und Animationen zur Coriolisablenkung (z.B. Schreibglobus) sowie zur thermischen Zirkulation und dem Einfluss des sich verändernden Einstrahlungswinkels der Sonne; Einsatz schematischer Abbildungen zur Himmelsmechanik und zum Strahlungshaushalt, Modell der tropischen Wettermaschine; Thematisieren metaphorischer Konzepte, Nichterfahrbarkeit, Erfahrungen und Modellen auf der Metaebene
Sicherung	Festigen über Transfer	konkreten Raumbefug herstellen: z.B. Schifffahrtsroute Los Angeles-Singapur im Frühjahr oder Situation auf den Kapverden

**Tabelle 125:** Baustein 4 `Passatzirkulation und Passatwinde` im Überblick.

Baustein 4 `Passatzirkulation und Passatwinde` soll die Lerner dazu befähigen, die Passatwinde als Teile einer thermischen Zirkulation mit himmelsmechanischen Einflüssen (Erdrotation, Kugelgestalt der Erde), Wechselwirkungen und Rückkopplungen zu verstehen. Dieser Baustein berücksichtigt die kognitiv ausgerichteten didaktischen Empfehlungen 7 und 8. Mit folgenden Vorstellungen der Lerner zu Beginn kann gerechnet werden: (1) Passatwinde sind das Resultat einer Relativbewegung der Erdoberfläche gegenüber der Atmosphäre (Typ 21, 33), (2) Passatwinde können wie Festkörper zusammenstoßen und dadurch ihre Richtung ändern (Typ 14, 16, 20, 34), (3) die Passatzirkulation erscheint als einfache Ursache-Folge-Relation, als lineares System, bei dem Prozesse zeitlich nacheinander stattfinden, oder als komplexes System, jedoch aus wissenschaftlicher Sicht nicht angemessen (Typ 30, 31, 32). Unzufriedenheit mit diesen Vorstellungen könnte beispielsweise durch Beobachtungen bei Experimenten zur thermischen Zirkulation von Wasser erzeugt werden (PERABO 2000, 30). Hier ließe sich aufzeigen, dass sich Bewegungen gegenseitig bedingen, also keine einfachen Ursache-Folge-Relationen darstellen und auch nicht zeitlich nacheinander ablaufen. Die Vorstellung von Wind als Relativbewegung könnte durch Hinweise auf die Rotationsgeschwindigkeiten der niederen Breitenkreise in Frage gestellt werden: Wind als

Relativbewegung müsste am Äquator zum Beispiel über 1000km/h schnell sein, was offensichtlich nicht der Fall ist.

Die Erarbeitung könnte durch Experimente und Animationen zur Coriolisablenkung (STOBER 2012, 45ff.) sowie zur thermischen Zirkulation und dem Einfluss des sich verändernden Einstrahlungswinkels der Sonne, was durch das Verschieben der Wärmequelle simuliert werden könnte (PERABO 2000, 30), erfolgen. Wirkungszusammenhänge könnten in Form von *concept maps* veranschaulicht werden. Auf der Metaebene gilt es in diesem Kontext die metaphorischen Konzepte 'Luft ist fester Körper', 'Atmosphäre besteht aus Schichten', 'Wind ist fließendes Wasser', 'Luft und Wind sind Personen' zu thematisieren. Die Nichterfahrbarkeit adiabatischer Prozesse sowie der Umstand, dass Multikausalität und Wechselwirkungen im Alltag nur schwer erfahrbar sind, sollten ebenfalls aufgezeigt werden. Auch die mögliche (unbewusste) Überzeugung von Luft als leichtem Element könnte in diesem Rahmen thematisiert werden. Dass es sich bei der Passatzirkulation um eine schematisch-vereinfachte, modellhafte Vorstellung handelt, sollte mit Lernen auf der Metaebene reflektiert werden. Die historischen Vorstellungen einer Relativbewegung der Luft gegenüber der Erdoberfläche (Galilei) bzw. des Einflusses der Sonne auf die Bewegungsrichtung der Passatwinde (Halley) könnten herangezogen werden, um den Lernern die Entwicklung wissenschaftlicher Vorstellungen zu veranschaulichen. Unterschiedliche Perspektiven von Lernern und Wissenschaftlern auf atmosphärische Phänomene und Prozesse sollten auch hier thematisiert werden. In der Sicherungsphase könnte das Wissen in einem konkreten Kontext angewendet werden. So ließe sich nun ein Raumbezug herstellen, mögliche Schifffahrtsrouten mit Hilfssegeleinsatz könnten gesucht oder die klimatischen Bedingungen der Kapverden im jahreszeitlichen Verlauf erklärt werden.

Baustein 5: Inversionsbedingte Trockenheit in der Tropen		
Komplexe Probleme/ Leitfragen:		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wieso gibt es im Bereich der Passatwinde kaum Niederschläge?</li> <li>• Warum sind die tropischen Hitzewüsten, z.B. die Sahara, so trocken?</li> </ul>		
Kognitiv ausgerichtete Empfehlungen	Metakognitiv ausgerichtete Empfehlungen	
9	<ul style="list-style-type: none"> <li>• metaphorische Konzepte 'Wolken sind feste Körper', 'Wolken sind wachsende, organische Körper', 'Moleküle und Wasserdampf sind Personen', 'Luft ist fester Körper', 'Atmosphäre ist Aufschichtung', 'Wind ist fließendes Wasser', 'Luft und Wind sind Personen'</li> <li>• Nichterfahrbarkeit von Multikausalität und Wechselwirkungen sowie adiabatischer Prozesse</li> <li>• Erfahrung: Hitze und Trockenheit</li> <li>• Funktion von Modellen</li> <li>• Wissenschaftler- und Lernerperspektiven auf atmosphärische Phänomene und Prozesse</li> </ul>	
Phase	Ziele	Methode
Einstieg	Bewusstwerden eigener Vorstellungen	Visualisieren eigener Vorstellungen über Texte, Skizzen, <i>concept maps</i> , etc.
Überleitung	Widersprüchlichkeit der eigenen Vorstellungen erkennen	Kognitive Konflikte erzeugen durch Hinweise auf vorhandene, offene Wasserflächen oder Räume der immerfeuchten Tropen mit reichlich Niederschlägen und hohen Temperaturen
Erarbeitung	Wechselwirkung von feuchtadiabatischem Aufstieg und trockenadiabatischem Absinken als Ursache der Passatinversion und damit der Trockenheit erkennen	Einsatz schematischer Abbildungen zur Passatzirkulation und zu adiabatischen Prozessen; Thematisieren metaphorischer Konzepte, Nichterfahrbarkeit, Erfahrungen und Modellen auf der Metaebene
Sicherung	Festigen über Transfer	konkreten Raumbezug herstellen: z.B. Schifffahrtsroute Los Angeles-Singapur im Frühjahr, Trockenheit in den Randtropen

**Tabelle 126:** Baustein 5 'Inversionsbedingte Trockenheit in den Tropen' im Überblick.

Baustein 5 dient dazu, den Lernern ein Verständnis von Wechselwirkungen von feuchtadiabatischem Aufstieg und trockenadiabatischem Absinken als Ursache der Passatinversion und damit der Trockenheit zu ermöglichen. Berücksichtigt wird die kognitiv ausgerichtete didaktische Empfehlung 9. Mit folgenden Vorstellungen der Lerner zu Beginn ist zu rechnen: (1) Wenn der Wind aus Richtung Meer oder Ozean weht, herrscht Regenzeit, wenn er vom Land weht, Trockenzeit (Typ 35), (2) Trockenheit entsteht aufgrund von Hitze (Typ 36, 37), (3) Regenzeiten entstehen, weil sich etwas füllt oder anstaut (Typ 38). Unzufriedenheit könnte durch Aufzeigen von Raumbispielen erzeugt werden, die im Widerspruch zu den Vorstellungen der Lerner stehen, etwa Räume der immerfeuchten Tropen mit hohen Temperaturen und hohen jahreszeitlichen Niederschlagssummen oder trockene, tropische Inseln. Ebenso könnte danach gefragt werden, wie die Behälter, die sich füllen und leeren, beschaffen sein sollten (vgl. Baustein 2).

Die Erarbeitung könnte durch den Einsatz schematischer Abbildungen zur Passatzirkulation und zu adiabatischen Prozessen (siehe Kapitel 5, Abschnitt 5.2.2.4) erfolgen. Auf der Metaebene sollten die metaphorischen Konzepte 'Wolken sind feste Körper', 'Wolken sind wachsende, organische Körper', 'Moleküle und Wasserdampf sind Personen', 'Luft ist fester Körper', 'Atmosphäre besteht aus Schichten', 'Wind ist fließendes Wasser' sowie 'Luft und Wind sind Personen' thematisiert werden. Die Nichterfahrbarkeit adiabatischer Prozesse sowie fehlende Erfahrungsmöglichkeiten von Multikausalität und Wechselwirkungen im Alltag sowie Erfahrungen von Hitze und Trockenheit sollten angesprochen werden. Auch in diesem Kontext könnte die Funktion von Modellen am Beispiel der Passatzirkulation aufgezeigt werden. Unterschiedliche Perspektiven von Lernern und Wissenschaftlern könnten auch hier thematisiert werden. In der Sicherungsphase könnten konkrete Anwendungsbezüge geschaffen werden: So könnten nun die geringen Niederschläge auf der Schifffahrtsroute Los Angeles-Singapur im Frühjahr oder Trockenheit bestimmter tropischer Inseln wie Ascension erklärt werden.

### **8.5 Zusammenfassung**

Auf der Basis des wechselseitigen Vergleiches von erhobenen Alltagsvorstellungen und wissenschaftlichen Vorstellungen konnten didaktische Vermittlungsstrategien entwickelt werden. Diese sind als Bausteine oder Anregungen für einen Geographieunterricht der gymnasialen Oberstufe zu verstehen, der die Passatzirkulation zum Gegenstand hat.

Die kognitiv ausgerichteten didaktischen Empfehlungen bauen aufeinander auf. Sie orientieren sich am klassischen *Conceptual-Change-Modell* (POSNER ET AL. 1982). Zunächst werden die Vorstellungen der Lerner dargestellt und hinsichtlich der Frage reflektiert, inwiefern durch Aufzeigen von Widersprüchen Unzufriedenheit erzeugt werden könnte. Anschließend erfolgt die Darstellung der wissenschaftlichen Vorstellungen mit ihren direkt verständlichen, grundlegenden basale Logiken. Mit ihnen lassen sich die Widersprüche auflösen und neue weitere Aspekte erklären. Die Lerner sollten

die wissenschaftlichen Erklärungen also als verständlich, plausibel und fruchtbar empfinden. Insgesamt werden neun kognitiv ausgerichtete didaktische Leitlinien formuliert: (1) Sich vertikal bewegende Luft sollte als etwas Relatives betrachtet werden. (2) Sich bewegende Luft kann als ein sich in seiner Form verändernder Behälter begriffen werden. (3) Das Person-Schema ermöglicht ein aus wissenschaftlicher Sicht angemessenes Verstehen der Erwärmung von Luft. (4) Dieses sollte ebenso herangezogen werden, um das Verhältnis von Wasser und Luft zu verstehen. (5) Wolken und Regenentstehung können über das Ziehen- und Drücken-Schema angemessen verstanden werden. (6) Solare Strahlungsintensität ist als Energie pro Fläche zu verstehen. (7) Der Einfluss der Erdrotation auf sich bewegende Luft sollte angemessen erfasst und (8) die Passatzirkulation als komplexes System mit Wechselwirkungen verstanden werden. (9) Ein Verständnis von inversionsbedingter Trockenheit in den Tropen sollte entwickelt werden.

Die didaktischen Empfehlungen sind zudem metakognitiv ausgerichtet. Die Bedeutung der *kinesthetic image schemes* und ihrer inhärenten basalen Logiken für Verstehensprozesse sollte mit Lernern auf der Metaebene an Beispielen thematisiert werden. Im Rahmen der Interviewstudie konnte aufgezeigt werden, dass zahlreiche Lerner Metaphern umfassender verstehen als Wissenschaftler und damit zu aus wissenschaftlicher Sicht unzulässigen Schlussfolgerungen kommen. Wissenschaftler nutzen Metaphern, um abstrakte Zielbereiche mit Hilfe bekannter Quellbereiche verstehen zu können. Die Potentiale und Gefahren von Metaphern sollten Lernern an Beispielen aufgezeigt werden. Nicht alle Phänomene, die im Kontext Passatzirkulation eine Rolle spielen, sind lebensweltlich erfahrbar. Vergleiche, die Lerner aufgreifen, erscheinen nur bedingt zutreffend. Ihre Analogiebildungen sind häufig aus wissenschaftlicher Sicht falsch. Die Nicht-Erfahrbarkeit von Phänomenen oder Prozessen sollte thematisiert werden. Nach dem Rahmentheorieansatz (VOSNIADOU 2008) sind Vorstellungen vernetzt mit grundlegenden ontologischen oder epistemologischen Überzeugungen. Der Kategorisierungsansatz (CHI 2008) geht davon aus, dass ontologische Kategorisierungen die Vorstellungsentwicklung beeinflussen. Die erhobenen Lernaussagen wurden vor diesen Hintergründen reflektiert. Es wird empfohlen, mit Schülerinnen und Schülern an Beispielen über die Bedeutung von Alltagserfahrungen und grundlegenden Überzeugungen für das Lernen zu sprechen. Historische Erklärungen der Passatwinde könnten herangezogen werden, um die Entwicklung wissenschaftlicher Vorstellungen zu veranschaulichen. Zudem sollte die Rolle von Modellen, ihre Funktionen und ihr Verhältnis zur Wirklichkeit mit Lernern reflektiert werden.

Soziale und affektive Faktoren finden ebenfalls Berücksichtigung bei der Formulierung von didaktischen Empfehlungen. So sollten Lernumgebungen Lernen in sozialer Interaktion ermöglichen und zudem von aus Lernersicht interessanten Problem- und Fragestellungen ausgehen. Schülerinnen und Schüler betrachten die Passatzirkulation aus einer grundlegend anderen Perspektive als

Wissenschaftler. Mit Hilfe des Kontextmodells (CARRAVITA & HALLDÉN 1994, 108; HALLDÉN ET AL. 2008, 509ff.) konnten die Ursachen und Folgen dieser unterschiedlichen Sichtweisen analysiert, miteinander verglichen und auf dieser Basis didaktische Empfehlungen entwickelt werden.

Unter Berücksichtigung der inhaltlichen und zeitlichen curricularen Vorgaben für das Grund- und Leistungsfach Erdkunde in Rheinland-Pfalz wurden lernprozessanregende Kontexte einer Thematisierung der Passatzirkulation vorgeschlagen sowie fünf Bausteine zur Erarbeitung des naturwissenschaftlichen Hintergrundwissens mit einem Zeitumfang von jeweils etwa 90 Minuten vorgestellt: (1) Windentstehung und Folgen im Allgemeinen, (2) Verdunstung, Kondensation, Wolkenbildung und Regen im Allgemeinen, (3) Ursache hoher Lufttemperaturen in der Tropen, (4) Passatzirkulation und Passatwinde, (5) Inversionsbedingte Trockenheit in der Tropen.

## 9 Zusammenfassung der Ergebnisse, Diskussion und Ausblick

Luft und Wasserdampf sind unsichtbar und doch irgendwie allgegenwärtig. Wie lassen sich atmosphärische Prozesse gedanklich fassen? Wissenschaftler und Lerner verstehen diese mit Hilfe von Metaphern. Zudem greifen sie auf bestimmte basale Logiken zurück, sog. *kinethetic image schemes*, um ihre Vorstellungen zu strukturieren. Diese Arbeit setzte es sich zum Ziel, die Verfahren des Verstehens atmosphärischer Prozesse am Beispiel der Passatzirkulation herauszuarbeiten, Lerner- und Wissenschaftlervorstellungen miteinander zu vergleichen und unter Berücksichtigung der Erkenntnisse der didaktischen Vorstellungsforschung Vermittlungsstrategien für klimageographische Inhalte des Geographieunterrichts zu entwickeln. Abschließend sollen nun die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und diskutiert werden. Es gilt zu reflektieren, inwiefern die Forschungsfragen beantwortet werden konnten und welche weiterführenden Fragen sich ergeben.

### 9.1 Ergebnisse der fachlichen Klärung

Wissenschaftliche Vorstellungen zur Passatzirkulation sollten im Rahmen der fachlichen Klärung (Untersuchungsaufgabe 1) herausgearbeitet werden. Hierzu wurden vier historische Arbeiten und drei aktuelle Arbeiten mittels qualitativer Inhaltsanalyse (MAYRING 2008; GROPENIEßER 2008, 172ff.) unter Berücksichtigung der systematischen Metaphernanalyse (Schmitt 2005) und der Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens (GROPENIEßER 2006 und 2007) untersucht. Die Auswahl der Quellentexte wurde wie folgt begründet (siehe Kapitel 5, Abschnitte 5.1 und 5.2): Die historischen Texte widerlegen mit ihrer Veröffentlichung jeweils gängige Lehrmeinungen und gelten über einen bestimmten Zeitraum als wissenschaftlich anerkannt. Alltagsvorstellungen ähneln häufig den historischen Vorstellungen, da beide auf Erfahrungen im Mesokosmos basieren, Mikro- und Makrokosmos aufgrund fehlender technischer Hilfsmittel kaum zugänglich sind bzw. waren. Die aktuellen Quellentexte stellen gängige Lehrwerke dar. Im Sinne einer internen Validierung werden drei Perspektiven auf die Passatzirkulation berücksichtigt: die der Meteorologie (HÄCKEL 2012), der Klimatologie (WEISCHET & ENDLICHER 2008) und der Klimageographie (STRAHLER & STRAHLER 2009). Die fachliche Klärung orientierte sich an den folgenden Forschungsfragen:

*1. Wie stellen sich Wissenschaftler Phänomene und Prozesse im Rahmen der Passatzirkulation vor?*

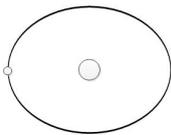
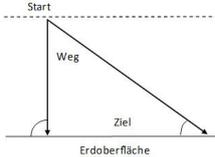
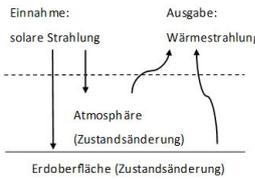
Aktuelle wissenschaftliche Vorstellungen betrachten die Passatzirkulation als komplexes System, mit dem vorherrschende Windrichtungen und klimatische Bedingungen der Tropen erklärt werden können. Diese Vorstellungen basieren auf Annahmen zur Himmelsmechanik, zum Strahlungshaushalt, zu Eigenschaften von Luft und Wasserdampf, die im Rahmen der fachlichen Klärung genauer untersucht werden konnten (siehe Kapitel 5, Abschnitt 5.2)

*1.1 Wie haben sich die wissenschaftlichen Vorstellungen historisch entwickelt?*

Im Rahmen der Analyse historischer Arbeiten konnten vielfältige Vorstellungen zur Passatzirkulation herausgearbeitet werden, die aufgrund von Alltagserfahrungen plausibel erscheinen könnten, aus aktueller wissenschaftlicher Sicht jedoch zum Teil unangemessen sind: Die damaligen Wissenschaftler gehen von tropischen Ostwinden aufgrund sich drehender Himmelsphären aus (BACON 1622), einer Art Dominoeffekt sich ausdehnender Luft aufgrund des Tagesganges der Sonne (BACON 1622) oder einer Relativbewegung zwischen Luft und sich rotationsbedingt bewegender Erdoberfläche (GALILEI 1632). Eine thermisch bedingte Zirkulation mit der Ausbildung von NO- bzw. SO-Passatwinden wird durch Strahlungsintensität und die Bewegung der Sonne von Ost nach West (HALLEY 1686) bzw. durch den Einfluss der unterschiedlichen Rotationsgeschwindigkeiten verschiedener Breitenkreise (HADLEY 1735) erklärt.

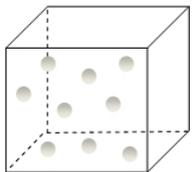
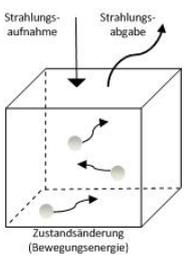
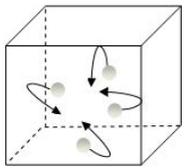
*1.2 Mit Hilfe welcher verkörperten Schemata verstehen Wissenschaftler diese Phänomene und Prozesse heute?*

Wissenschaftler begreifen Phänomene und Prozesse im Rahmen der Passatzirkulation mit Hilfe bestimmter verkörperter Schemata, sog. *kinesthetic image schemes*. Im Rahmen der fachlichen Klärung ist es gelungen, diese die Vorstellungen strukturierenden basalen Logiken herauszuarbeiten. Aussagen zur Himmelsmechanik und zu elektromagnetischer Strahlung werden mit Hilfe des Start-Weg-Ziel-, des Teil-Ganzes- und des Person-Schemas verstanden (siehe Abschnitt 5.2.2.1 und Tabelle 127).

Vorstellung	Schematische Abbildung	wichtige Schemata
Erdrevolution, Erdrotation		Start-Weg-Ziel-Schema Teil-Ganzes-Schema
Einstrahlungswinkel		Start-Weg-Ziel-Schema Teil-Ganzes-Schema
Strahlungshaushalt		Person-Schema

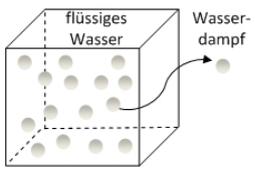
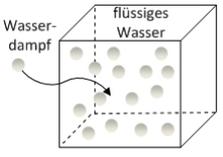
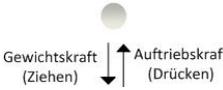
**Tabelle 127:** Aktuelle wissenschaftliche Vorstellungen zur Himmelsmechanik und zum Strahlungshaushalt (siehe 5.2.2.1).

Von zentraler Bedeutung für das Verstehen von Luft und ihren Eigenschaften ist das Behälter-Schema. Hinzu kommen das Teil-Ganzes-, das Start-Weg-Ziel- und das Person-Schema (siehe Abschnitt 5.2.2.2 und Tabelle 128).

Vorstellung	Schematische Abbildung	wichtige Schemata
Luftdichte		Behälter-Schema Teil-Ganzes-Schema
Lufttemperatur		Behälter-Schema Teil-Ganzes-Schema Start-Weg-Ziel-Schema Person-Schema
Luftdruck		Behälter-Schema Teil-Ganzes-Schema Start-Weg-Ziel-Schema

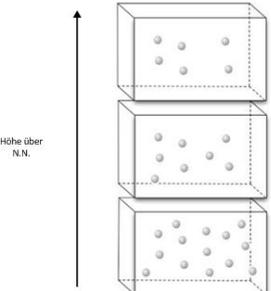
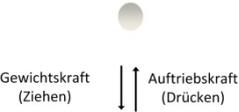
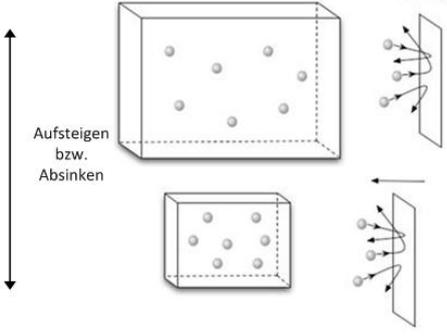
**Tabelle 128:** Aktuelle wissenschaftliche Vorstellungen zu Luftdichte, -temperatur und -druck (siehe 5.2.2.2).

Prozesse der Verdunstung, Kondensation und Niederschlagsbildung werden über das Behälter-, das Teil-Ganzes-, das Start-Weg-Ziel-Schema sowie über das Ziehen- und das Drücken-Schema verstanden (siehe Abschnitt 5.2.2.3 und Tabelle 129).

Vorstellung	Schematische Abbildung	wichtige Schemata
Verdunstung		Behälter-Schema Teil-Ganzes-Schema Start-Weg-Ziel-Schema
Kondensation		Behälter-Schema Teil-Ganzes-Schema Start-Weg-Ziel-Schema
Niederschlagsbildung		Ziehen-Schema Drücken-Schema

**Tabelle 129:** Aktuelle wissenschaftliche Vorstellungen zu Verdunstung, Kondensation und Niederschlagsbildung (siehe 5.2.2.3).

Die Veränderung der Luftdichte mit der Höhe sowie weitere Aspekte im Zusammenhang mit sich vertikal bewegender Luft verstehen Wissenschaftler über das Behälter-, das Teil-Ganzes-, das Start-Weg-Ziel-, das Ziehen- und das Drücken-Schema (siehe Abschnitt 5.2.2.4 und Tabelle 130).

Vorstellung	Schematische Abbildung	wichtige Schemata
Vertikaler Aufbau der Atmosphäre		Behälter-Schema Teil-Ganzes-Schema Start-Weg-Ziel-Schema
Auftriebs- und Gewichtskraft		Ziehen-Schema Drücken-Schema
Adiabatische Prozesse		Behälter-Schema Teil-Ganzes-Schema Start-Weg-Ziel-Schema Ziehen-Schema Drücken-Schema

**Tabelle 130:** Aktuelle wissenschaftliche Vorstellungen zum Aufbau der Atmosphäre und vertikalen Luftbewegungen (siehe 5.2.2.4).

Windentstehung und wirkende Kräfte werden mit Hilfe von Behälter-, Teil-Ganzes-, Start-Weg-Ziel- sowie Ziehen- und das Drücken-Schemata verstanden (siehe Abschnitt 5.2.2.5 und Tabelle 131).

Vorstellung	Schematische Abbildung	wichtige Schemata
Gradientkraft		Behälter-Schema Teil-Ganzes-Schema Start-Weg-Ziel-Schema Drücken-Schema
Gradient-, Reibungskraft, Coriolisablenkung		Ziehen-Schema Drücken-Schema

**Tabelle 131:** Aktuelle wissenschaftliche Vorstellungen zu horizontalen Luftbewegungen (siehe 5.2.2.5).

*1.2 Auf welche metaphorischen Konzepte greifen Wissenschaftler heute zurück? Was wird hierdurch beleuchtet (highlighting), was verdeckt (hiding)?*

In den aktuellen wissenschaftlichen Quellentexten konnten zahlreiche Metaphern identifiziert werden. Mit Hilfe der systematischen Metaphernanalyse (SCHMITT 2005) wurden hieraus metaphorische Konzepte rekonstruiert. Metaphern beleuchten im Sinne der kognitiven Metapherntheorie (GROPENGIEßER 2006; LAKOFF & JOHNSON 2008) bestimmte Aspekte eines unbekanntes Zielbereiches (*highlighting*) und ermöglichen damit ein Verstehen, können jedoch auch aus wissenschaftlicher Sicht nicht angemessene Vorstellungen evozieren (*hiding*). Entsprechende Erklärungspotentiale und Gefahren konnten umfassend herausgearbeitet werden. Wissenschaftliche Aussagen zur Himmelsmechanik und elektromagnetischer Strahlung beinhalten Metaphern, die die abstrakten Zielbereiche wie die Bewegungen von Sonne oder Erde im Weltraum, Strahlung, Energie oder Wärme durch bekannte Quellbereiche wie Person, fluide Körper, Nahrung, Transportmittel oder Ressource veranschaulichen (siehe Abschnitt 5.2.2.1 und Tabelle 132).

Metaphorisches Konzept (Zielbereich/e sind/ist Quellbereich)	Erklärungspotential ( <i>highlighting</i> )	Gefahr ( <i>hiding</i> )
Sonne & Erde sind Personen.	Bedeutung der Sonne für das Leben auf der Erde; Bewegung der Sonne am Horizont	Unterstellen von Absichten, Zwecken von Erde oder Sonne; Bewegung der Erde, nicht der Sonne
Strahlung & Energie sind fluide Körper.	Bewegung und Kohärenz elektromagnetischer Strahlung	elektromagnetische Strahlung nichts Stoffliches
Strahlung & Energie sind Nahrung.	Bedeutung von Strahlung für das Leben auf der Erde bzw. die Zustandsänderung von Objekten	elektromagnetische Strahlung nichts Stoffliches
Strahlung ist Transportmittel für Energie.	Eigenschaft von Strahlung, Energie räumlich zu bewegen	Unterstellen einer Zweckbestimmung
Energie & Wärme sind Ressource.	Verfügbarkeit und Notwendigkeit von Energie und Wärme	Energie und Wärme nichts Stoffliches

**Tabelle 132:** Metaphorische Konzepte zu Himmelsmechanik und elektromagnetischer Strahlung (siehe 5.2.2.1).

Wissenschaftliche Aussagen zu Luftdichte, -temperatur und -druck greifen auf Metaphern zurück, die die abstrakten Zielbereiche mit den Quellbereichen Behälter, Person oder Festkörper veranschaulichen (siehe 5.2.2.2 und Tabelle 133).

Metaphorisches Konzept (Zielbereich/e sind/ist Quellbereich)	Erklärungspotential ( <i>highlighting</i> )	Gefahr ( <i>hiding</i> )
Luft ist Behälter.	Verstehen von Eigenschaften wie Luftdichte, Luftdruck, Lufttemperatur	Luft kein fester Körper oder Behälter; sich bewegende Luft mit grundsätzlich anderen Eigenschaften als ein sich bewegendes Körper
Druckgebiet ist Person.	Zusammenhänge, Bestandteile und Bewegungen von Luftdruckgebieten	Unterstellen von etwas Organischem, von Absichten und Zwecke
Druckgebiet ist Festkörper.	idealtypische, schematische Form oder zonale Anordnung von Druckgebieten	Druckgebiete nichts Festes oder Statisches

**Tabelle 133:** Metaphorische Konzepte zu Luftdichte, -temperatur und -druck (siehe 5.2.2.2).

Vorgänge der Verdunstung, Kondensation und Niederschlagsbildung werden mit Hilfe metaphorischer Konzepte veranschaulicht, die ebenfalls auf die bekannten Quellbereiche Person und Körper zurückgreifen (siehe Abschnitt 5.2.2.3 und Tabelle 134).

Metaphorisches Konzept (Zielbereich/e sind/ist Quellbereich)	Erklärungspotential ( <i>highlighting</i> )	Gefahr ( <i>hiding</i> )
Moleküle sind Personen.	Verhalten von Wassermolekülen bei Verdunstungs- und Kondensationsvorgängen	Unterstellen von intendierten Handlungen, Absichten oder Zwecken
Wasserdampf ist Person.	Vorgänge beim Aggregatzustandswechsel und der Bewegung von Wasser in flüssiger bzw. gasförmiger Phase	Unterstellen von intendierten Handlungen, Absichten oder Zwecken
Wolken sind wachsende, organische Körper.	Vorgänge der Entstehung und Entwicklung von Wolken; Veranschaulichung der Form der Wolken	kein organisches Wachstum, eine Vielzahl von Kernen, von denen das Wachstum ausgeht; keine Festkörper
Wolken sind Festkörper.	Veranschaulichung der Form der Wolken	keine Festkörper

**Tabelle 134:** Metaphorische Konzepte zu Verdunstung, Kondensation und Niederschlagsbildung (siehe 5.2.2.3).

Aktuelle wissenschaftliche Aussagen zum Aufbau der Atmosphäre, zu vertikalen und horizontalen Luftbewegungen werden durch die Quellbereiche Gebäude, Behälter, Wasser und Person veranschaulicht (siehe Abschnitte 5.2.2.4 und 5.2.2.5 sowie Tabelle 135).

Metaphorisches Konzept (Zielbereich/e sind/ist Quellbereich)	Erklärungspotential ( <i>highlighting</i> )	Gefahr ( <i>hiding</i> )
Atmosphäre ist Gebäude.	Stockwerkbau der Atmosphäre; Atmosphäre keine homogene Masse	Suggestieren fester Grenzen, die nicht passierbar sind
Sich vertikal bewegende Luft ist ein Behälter.	Ursache vertikaler Luftbewegungen; adiabatische Prozesse	keine Festkörpereigenschaften; Volumen veränderbar
Wind ist fließendes Wasser.	Art und Bedingungen der Bewegung von Luft	keine tatsächliches Gefälle; Nichterfassbarkeit von Vorgängen von Kompression und Dilatation sowie der eigentlichen Ursachen von Luftbewegungen hierüber
Wind ist Person.	Art der Bewegung von Luft	Unterstellen von Absichten und Zwecken

**Tabelle 135:** Metaphorische Konzepte zum Aufbau der Atmosphäre, vertikalen und horizontalen Luftbewegungen (siehe 5.2.2.4 und 5.2.2.5).

## 9.2 Ergebnisse des Erfassens der Lernerperspektiven

Im Rahmen der Untersuchungsaufgabe 2 sollten bisherige empirische Arbeiten zu Alltagsvorstellungen mit Bezug zur Passatzirkulation vor dem Hintergrund der Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens (GROPENGIÉBER 2006 und 2007) reanalysiert werden. Es wurde festgestellt, dass derzeit keine Arbeiten zu Alltagsvorstellungen zur Passatzirkulation vorliegen. Daher wurden insgesamt 23 Arbeiten zu Vorstellungen herangezogen, die einen thematischen Bezug zur Passatzirkulation besitzen. Hierbei konnten Forschungsdesiderata in den Bereichen Himmelsmechanik, adiabatische Prozesse, Windentstehung sowie Modellbildung und systemischem Denken aufgezeigt werden (siehe Kapitel 6). Die Untersuchungsaufgabe 2 diente einerseits dazu, mögliche Alltagsvorstellungen herauszuarbeiten, um diese im Rahmen der Untersuchungsaufgabe 3 zu validieren und andererseits dazu, die Empirie vorzubereiten, da diese auf die Forschungsdesiderata hin ausgerichtet werden sollte. Um die Alltagsvorstellungen von Lernern der Jahrgangsstufe 10 des Gymnasiums zu erheben, wurde eine Interviewstudie mit insgesamt 30 Schülerinnen und Schülern (18w, 12m) durchgeführt. Die Anzahl der Interviews ergab sich aus dem Prinzip der Sättigung. Insgesamt wurden 10 qualitative Leitfadeninterviews mit je drei Schülerinnen und Schülern durchgeführt (siehe Kapitel 7). Die Jahrgangsstufe wurde gewählt, da atmosphärische Prozesse zu Beginn in der Sekundarstufe II in Rheinland-Pfalz thematisiert werden (vgl. MBWJK 2011, 41 und 133) und die Lernervoraussetzungen hierfür erfasst werden sollten. Gütekriterien qualitativer Forschung wurden bei der Auswahl der Probanden, der Durchführung und Dokumentation sowie der Auswertung der Interviewstudie beachtet. Die Probanden wurden nach bestimmten Kriterien ausgewählt, um ein mittleres Interesse und einen mittleren Leistungsstand zu gewährleisten. Die

Auswertung erfolgte mittels qualitativer Inhaltsanalyse (MAYRING 2008; GROßENGIEßER 2008, 172ff.) unter Berücksichtigung der systematischen Metaphernanalyse (SCHMITT 2005) und der Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens (GROßENGIEßER 2006 und 2007). Folgende Forschungsfragen leiteten die Untersuchung:

*2. Wie stellen sich Lerner Phänomene und Prozesse im Rahmen der Passatzirkulation vor?*

Im Rahmen der Auswertung der Interviewstudie konnten insgesamt 38 Typen von Alltagsvorstellungen zur Passatzirkulation identifiziert und vor dem theoretischen Hintergrund analysiert werden. Diese Typen von Vorstellungen basieren auf strukturierten Lerneraussagen, die gemeinsame Merkmale aufweisen.

*2.1 Mit Hilfe welcher verkörperten Schemata verstehen Lerner diese Phänomene und Prozesse?*

Leitfrage	Typ (Nr.)	Verwendete Schemata (sofern relevant)
Wie stellen sich Lerner die Bedingungen vor, unter denen Luft aufsteigt?	Luft steigt unter der Bedingung auf, dass sie warm ist.(1)	Teil-Ganzes-Schema
	Luft steigt unter der Bedingung auf, dass sie wärmer als etwas ist. (2)	Person-Schema, Behälter-Schema, Teil-Ganzes-Schema
	Luft steigt unter der Bedingung auf, dass etwas anderes sie dazu bringt.(3)	Drücken-Schema
Inwiefern stellen sich Lerner vor, dass sich die Luft beim Aufsteigen verändert?	Aufsteigende Luft kühlt ab.(4)	Person-Schema, Behälter-Schema, Start-Weg-Ziel-Schema
	Aufsteigende Luft wird schwerer.(5)	Person-Schema
	Aufsteigende Luft wird leichter.(6)	Person-Schema
Welche Vorstellungen haben Lerner darüber, wie weit Luft aufsteigt?	Luft steigt auf, solange bestimmte Bedingungen gegeben sind.(7)	Drücken-Schema, Behälter-Schema
	Luft steigt bis zu den Wolken oder bis es regnet auf.(8)	Person-Schema
	Luft steigt bis zu sonstigen Grenzen auf oder bis sie Hindernisse überquert hat.(9)	Behälter-Schema

**Tabelle 136:** Vorstellungen von Lernern zu Aufwinden (siehe Abschnitt 7.1).

Mit Hilfe von drei Leitfragen konnten neun Typen von Alltagsvorstellungen zu Aufwinden identifiziert werden. Lerner betrachten aufsteigende Luft als etwas Absolutes (Typ1). Sie gehen davon aus, dass warme Luft die Eigenschaft hat, aufzusteigen. Umso wärmer Luft ist, desto schneller steigt sie auf. Das Teil-Ganzes-Schema wird herangezogen, um die Dichte warmer Luft zu beschreiben, ohne sie jedoch im Vergleich zur umgebenden Luft zu betrachten. Andere Lerner sehen Luft als etwas Relatives (Typ2) an. Die Temperatur der aufsteigenden Luft wird im Verhältnis zu der umgebenden Luft betrachtet. Luft steigt auf unter der Bedingung, dass sie wärmer als die umgebende Luft ist. Von zentraler Bedeutung für das Verstehen dieser Relativität ist das Behälter-Schema: Die aufsteigende Luft wird als das Innere des Behälters, die umgebene Luft als das Äußere begriffen. Diese Lerner nutzen das Teil-Ganzes-Schema, um Luftdichte zu beschreiben und das Person-Schema, um Veränderung der Lufttemperatur zu erfassen. Vorstellungen vom Typ 3 begreifen Luft als eine Art Entität, die durch Drücken zum Aufsteigen veranlasst werden kann. Einige

Lerner gehen davon aus, dass aufsteigende Luft abkühlt (Typ 4). Verstanden wird dies über das Person- oder über das Behälter- bzw. Start-Weg-Ziel-Schema: Luft verbraucht Energie, um aufzusteigen bzw. aufsteigende Luft kühlt durch Kontakt mit kälterer Luft in der Höhe ab. Mit Hilfe des Person-Schemas wird die Vorstellung, dass aufsteigende Luft schwerer wird (Typ 5), verstanden: Luft nimmt Wasserdampf oder Feuchtigkeit auf. Auch die Vorstellung, dass aufsteigende Luft leichter wird (Typ 6), begreifen einige Lerner über das Person-Schema: Es befindet sich weniger Sauerstoff in der Luft, da dieser verbraucht wurde. Luft steigt auf, solange bestimmte Bedingungen gegeben sind (Typ 7): Luft wird hier als Entität begriffen, die nach oben gedrückt wird bzw. Luft wird als relativ zur umgebenden Luft mit Hilfe des Behälter-Schemas verstanden. Das Person-Schema nutzen Lerner bei Vorstellungen vom Typ 8: Luft scheidet Regen aus, ihr Zustand verändert sich dahingehend, dass sie nicht mehr aufsteigen kann. Die Vorstellung, dass Luft bis zu bestimmten Grenzen aufsteigt (Typ 9), wird über das Behälter-Schema und die basale Logik Inneres-Grenze-Äußeres begriffen.

Leitfrage	Typ (Nr.)	Verwendete Schemata (sofern relevant)
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)	Start-Weg-Ziel-Schema, Person-Schema
	Die Luft in den Tropen ist wärmer – Folgen. (11)	Start-Weg-Ziel-Schema, Teil-Ganzes-Schema
	Die Luft in den Tropen enthält mehr Wasserdampf – Ursachen. (12)	Person-Schema, Teil-Ganzes-Schema
	Die Luft in den Tropen enthält mehr Wasserdampf – Folgen. (13)	Behälter-Schema, Person-Schema, Teil-Ganzes-Schema

**Tabelle 137:** Vorstellungen von Lernern zu Aufwinden in den Tropen (siehe Abschnitt 7.2).

Zu Besonderheiten von Aufwinden in den Tropen konnten vier Typen von Alltagsvorstellungen rekonstruiert werden. Vorstellungen vom Typ 10 gehen auf himmelsmechanische Einflüsse ein, um höhere Ausgangstemperaturen aufsteigender Luft in den Tropen zu erklären. Strahlung wird über das Person- und das Start-Weg-Ziel-Schema verstanden: Umso weiter ihr Weg ist, umso mehr Energie verbraucht sie. Höhere Lufttemperaturen in den Tropen werden auf einen geringeren Abstand zwischen Erde und Sonne, zwischen Tropen und Sonne aufgrund der Kugelgestalt der Erde und kürzere Wege der Strahlung durch die Atmosphäre aufgrund steilerer Einstrahlungswinkel zurückgeführt. Die Folgen höherer Lufttemperaturen in den Tropen (Typ 11) sind ein schnellerer oder höherer Aufstieg bzw. das Aufsteigen von mehr Luft. Die Lerner verwenden hier das Start-Weg-Ziel- sowie das Teil-Ganzes-Schema. Auf die Ursachen eines höheren Wasserdampfgehaltes tropischer Luft gehen Vorstellungen vom Typ 12 ein: Dies wird auf das Vorhandensein größerer offener Wasserflächen zurückgeführt, einen intensiveren Wasserkreislauf bzw. die Fähigkeit warmer Luft, viel Wasserdampf aufnehmen zu können. Die Lerner greifen auf das Person- oder das Teil-Ganzes-Schema zurück. Als Folgen eines höheren Wasserdampfgehaltes tropischer Luft (Typ 13) stellen sich Lerner vor, dass diese schwerer wird und dadurch langsamer aufsteigt oder dass diese schnell aufsteigt, da Wasserdampf sehr heiß ist. Zur Erläuterung ziehen sie das Behälter-, das Person- und das Teil-Ganzes-Schema heran.

Leitfrage	Typ (Nr.)	Verwendete Schemata (sofern relevant)
Welche Vorstellungen haben Lerner zur Ursache horizontaler Luftbewegungen? (Windentstehung)	Wind entsteht durch ein Aufeinandertreffen.(14)	Start-Weg-Ziel-Schema
	Wind entsteht als Folge eines Ausgleichs.(15)	Teil-Ganzes-Schema, Behälter-Schema
	Wind entsteht aufgrund eines Drückens oder aufgrund von Stößen. (16)	Drücken-Schema

**Tabelle 138:** Vorstellungen von Lernern zur Ursache horizontaler Luftbewegungen (siehe Abschnitt 7.3).

Die erhobenen Aussagen zur Ursache horizontaler Luftbewegungen erlaubten die Rekonstruktion von vier Typen von Alltagsvorstellungen. Lerner gehen davon aus, dass Wind durch ein Aufeinandertreffen von warmer und kalter Luft oder tiefem und hohem Druck entsteht, was über das Start-Weg-Ziel-Schema begriffen wird (Typ 14). Andere verstehen Windentstehung als Folge eines Ausgleichs zwischen Hoch und Tief mit Hilfe von Teil-Ganzes- und Behälter-Schema (Typ 15). Über das Drücken-Schema wird die Vorstellung verstanden, dass Wind entsteht, weil Luft andere Luft wegdrückt bzw. Luftdruck als eine Art Entität Luft wegdrückt (Typ 16).

Leitfrage	Typ (Nr.)	Verwendete Schemata (sofern relevant)
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)	Teil-Ganzes-Schema, Person-Schema
	Die aufgestiegene Luft sinkt allmählich, nach polwärtiger Bewegung wieder ab.(18)	Drücken-Schema
	Die aufsteigende Luft weht als Wind auf gleichbleibender Höhe.(19)	Person-Schema
	Die sich in der Höhe bewegende Luft ändert ihre Richtung, weil sie auf etwas stößt oder von etwas angezogen wird. (20)	Drücken-Schema, Ziehen-Schema
	Die sich in der Höhe bewegende Luft ändert ihre Richtung aufgrund der Erdrotation.(21)	Teil-Ganzes-Schema, Start-Weg-Ziel-Schema

**Tabelle 139:** Vorstellungen von Lernern zum Antipassat (siehe Abschnitt 7.4).

Fünf Typen von Vorstellungen beschäftigen sich mit der Frage, was mit der aufgestiegenen Luft in den Tropen passiert. Lerner, die Aufwinde als etwas Absolutes betrachten, gehen davon aus, dass die tropische Luft vor Ort wieder absinkt (Typ 17). Sie beschreiben die Dichte der Luft bzw. die Schwere oder Kälte mit Hilfe des Teil-Ganzes-Schema oder des Person-Schemas. Andere Lerner gehen von einem allmählichen Absinken der Luft aus, die sich polwärts bewegt. Ursache dieser Bewegung sei ein Impuls, der über das Drücken-Schema verstanden wird (Typ 18). Vorstellungen vom Typ 19 beschreiben einen Wind, der auf gleichbleibender Höhe weht. Ursächlich sei ein Hochdruckgebiet, dessen Entstehung über das Person-Schema begriffen wird. Sich in der Höhe bewegende Luft wird als Entität verstanden, die von etwas angezogen werden oder auf etwas stoßen kann und dadurch ihre Richtung ändert (Typ 20). Andere Lerner erklären eine Richtungsänderung mit einer Relativbewegung der Luft gegenüber der sich rotationsbedingt bewegenden Erdoberfläche (Typ 21), was sie über das Teil-Ganzes-Schema und das Start-Weg-Ziel-Schema verstehen.

Leitfrage	Typ (Nr.)	Verwendete Schemata (sofern relevant)
Wie stellen sich Lerner die Bedingungen vor, unter denen Luft in der Höhe absinkt?	Luft sinkt ab unter der Bedingung, dass sie schwer ist.(22)	Teil-Ganzes-Schema
	Luft sinkt ab unter der Bedingung, dass sie schwerer oder kälter als etwas ist.(23)	Behälter-Schema
	Luft sinkt aus sonstigen Gründen ab.(24)	Teil-Ganzes-Schema
Inwiefern stellen sich die Lerner vor, dass sich die Luft beim Absinken verändert?	Die absinkende Luft erwärmt sich – Ursachen.(25)	Person-Schema, Behälter-Schema, Teil-Ganzes-Schema
	Die absinkende Luft erwärmt sich – Folgen.(26)	Start-Weg-Ziel, Teil-Ganzes-Schema, Person-Schema
	Die absinkende Luft erwärmt sich nicht – Ursachen.(27)	Person-Schema
Welche Vorstellungen haben die Lerner darüber, wie weit Luft absinkt?	Die Luft sinkt bis zum Boden ab – Ursachen.(28)	Start-Weg-Ziel-Schema
	Luft sinkt nur bis zu einer bestimmten Höhe ab – Ursachen.(29)	Behälter-Schema, Start-Weg-Ziel-Schema

**Tabelle 140:** Vorstellungen von Lernern zum Urpassat (siehe Abschnitt 7.5).

Insgesamt acht Typen von Alltagsvorstellungen zu absinkender Luft konnten rekonstruiert werden. Lerner, die sich vertikal bewegende Luft als etwas Absolutes betrachten, artikulieren die Vorstellung, dass Luft absinkt, wenn sie schwer ist (Typ 22). Das Teil-Ganzes-Schema wird herangezogen, um die Dichte der Luft zu beschreiben. Einige Lerner erklären, dass Bewegungen durch einen Temperatur- oder Dichteunterschied zwischen absinkender und umgebender Luft bedingt werden. Sie begreifen die sich bewegende Luft als etwas Relatives mit Hilfe des Behälter-Schemas (Typ 23). Vorstellungen vom Typ 24 gehen davon aus, dass Luft von Druckgebieten zum Absinken gebracht wird oder Luft in Form von Regen absinkt, wenn sich genügend Wasserteilchen gesammelt haben. Zu den Ursachen der Erwärmung absinkender Luft (Typ 25) gibt es vielfältige Erklärungen. Einige Lerner äußern die Vorstellung, dass sich die absinkende Luft durch die Wärme der umgebenden Luft erwärmt, weil sie reicher an Sauerstoff wird oder mehr Sonnenstrahlung mit geringerer Höhe aufnehmen kann. Diese Vorgänge werden mit Hilfe des Person-, des Behälter- und des Teil-Ganzes-Schemas verstanden. Vorstellungen vom Typ 26 beschäftigen sich mit den Folgen der Erwärmung absinkender Luft. So äußern Lerner, die Luft als etwas Absolutes betrachten, die Vorstellung, dass die Dichte der Luft zunimmt oder die Luft sich erst über der Erdoberfläche wieder erwärmt, da sie sonst nicht absinken würde. Sie begreifen dies mit Hilfe von Start-Weg-Ziel, Teil-Ganzes- und Person-Schema. Wiederum andere Lerner gehen davon aus, dass sich absinkende Luft nicht erwärmt (Typ 27) und begründen dies mit Hilfe des Person-Schemas: So nimmt die Luft beim Absinken keine Energie auf, die zu einer Erwärmung führen könnte. Die Vorstellung, dass Luft bis zum Boden absinkt (Typ 28) äußern Lerner, die von einem absoluten Verständnis der sich bewegenden Luft ausgehen. Andere Lerner betrachten die absinkende Luft relativ zur umgebenden Luft (Typ 29). Sie artikulieren die Vorstellungen, dass Luft absinkt, bis Dichte oder Temperatur der umgebenden Luft entspricht oder dass die umgebende Luft bestimmte Eigenschaften entwickelt, die die absinkende Luft stoppt. Von zentraler Bedeutung für das Verstehen dieser Vorgänge sind das Behälter und das Start-Weg-Ziel-Schema.

Leitfrage	Typ (Nr.)	Verwendete Schemata (sofern relevant)
Welche Vorstellungen haben die Lerner zur Passatzirkulation?	Ursachen und Folgen ohne Wechselwirkungen.(30)	Start-Weg-Ziel-Schema, Person-Schema, Ziehen-Schema, Drücken-Schema
	Die Passatzirkulation als lineares System.(31)	Start-Weg-Ziel-Schema, Drücken-Schema, Ziehen-Schema
	Der Passatzirkulation als komplexes System mit Wechselwirkungen.(32)	Start-Weg-Ziel-Schema, Drücken-Schema, Ziehen-Schema
	Der Passatwind ändert seine Richtung aufgrund der Erdrotation.(33)	Teil-Ganzes-Schema, Start-Weg-Ziel-Schema
	Der Passatwind ändert seine Richtung aufgrund von Zusammenstößen.(34)	Drücken-Schema, Start-Weg-Ziel-Schema

**Tabelle 141:** Vorstellungen von Lernern zur Passatzirkulation (siehe Abschnitt 7.6).

Unter der Passatzirkulation stellen sich Lerner Unterschiedliches vor. Einige beschreiben Ursachen und Folgen ohne Wechselwirkungen (Typ 30), wobei sie auf das Start-Weg-Ziel, das Person- sowie Ziehen- und Drücken-Schema zurückgreifen. So nimmt die Luft etwa aufsteigende oder absinkende Luft mit, wodurch sie sich langsamer bewegt oder sie wird durch absinkende Luft weggedrückt bzw. durch aufsteigende Luft angezogen. Andere Lerner beschreiben die Passatzirkulation als lineares System, bei dem Prozesse zeitlich nacheinander ablaufen und sich wiederholen (Typ 31). Der Passatwind erscheint als eine Art Entität, die sich durch einen vermeintlich luftleeren Raum auf einer Kreisbahn bewegt. Die Ursache dieser Bewegung wird über Ziehen- und Drücken-Schema begriffen. Eine differenzierte Vorstellung artikulieren Lerner, die ein komplexes System mit Wechselwirkungen beschreiben. Sie greifen ebenfalls auf das Start-Weg-Ziel-, das Ziehen- und das Drücken-Schema zurück. Eine Richtungsänderung des Passatwindes mit Annäherung an den Äquator führen Lerner auf den Einfluss der Erdrotation (Typ 33) oder Zusammenstöße (Typ 34) zurück, was sie über das Teil-Ganzes-, das Drücken- und das Start-Weg-Ziel-Schema begreifen.

Leitfrage	Typ (Nr.)	Verwendete Schemata
Welche Vorstellungen haben die Lerner zur Entstehung von Regenzeiten in den wechselfeuchten Tropen?	Regenzeiten entstehen durch einen Wechsel der Windrichtung.(35)	Start-Weg-Ziel-Schema
	Regenzeiten entstehen aufgrund eines sich ändernden Abstands Erde-Sonne.(36)	Person-Schema, Start-Weg-Ziel-Schema
	Regenzeiten entstehen aufgrund eines sich ändernden Einstrahlungswinkels der Sonne.(37)	Start-Weg-Ziel-Schema
	Regenzeiten entstehen, weil sich etwas füllt oder anstaut.(38)	Person-Schema, Behälter-Schema

**Tabelle 142:** Vorstellungen von Lernern zur Ursache von Regenzeiten in den wechselfeuchten Tropen (siehe Abschnitt 7.7).

Zur Ursache von Regenzeiten in den wechselfeuchten Tropen konnten vier Typen von Alltagsvorstellungen erhoben werden. Einige Lerner äußern die Vorstellung, dass Regenzeiten durch einen Wechsel der Windrichtung entstehen (Typ 35), was sie über das Start-Weg-Ziel-Schema begreifen. Während der Regenzeit weht der Wind aus Richtung Ozean, während der Trockenzeit aus Richtung Land. Andere Lerner gehen davon aus, dass Regenzeiten durch einen sich im jahreszeitlichen Verlauf ändernden Abstand von Erde und Sonne verursacht werden (Typ 36). Das Start-Weg-Ziel-Schema spielt hier eine Rolle. Je näher die Erde der Sonne ist, umso trockener ist es. Sonnenstrahlen kühlen umso mehr ab, je länger sie unterwegs zur Erde sind. Letzteres wird mit Hilfe des Person-Schemas begriffen. Andere Lerner beschreiben einen intensiveren Wasserkreislauf, der

Regenzeiten verursacht. Dieser wird auf den Einstrahlungswinkel zurückgeführt (Typ 37). Verstanden werden diese Vorgänge mit Hilfe des Start-Weg-Ziel-Schemas. Andere Vorstellungen zur Ursache von Regenzeiten gehen davon aus, dass sich heiße Luft oder Wasserdampf anstauen bzw. auffüllen (Typ 38), was über das Behälter- und das Person-Schema begriffen wird. Regenzeiten werden also als eine Art Entleeren eines Behälters begriffen.

## 2.2 Auf welche metaphorischen Konzepte greifen Lerner zurück?

Metaphorisches Konzept (Zielbereich ist Quellbereich)	Erklärungspotential (aus Lernersicht)
Luft & Wind sind Personen	Art der Bewegung von Luft (Typ 2, 4, 32)
	Ursache der Bewegung von Luft (Typ 1, 15, 16, 19, 20, 22, 30, 31)
	Veränderungen von Luft (Typ 6, 12, 24; 29)
Wind ist fließendes Wasser	Art der Bewegung von Luft (Typ 15, 25, 29, 31, 32)
	Ursache der Bewegung von Luft (Typ 3, 7, 15, 16, 18, 22, 32)
Luft ist fester Körper	Ursache der Bewegung von Luft (Typ 14, 20, 25)
Atmosphäre ist Aufschichtung	Begrenzung vertikaler Luftbewegungen, Schutzfunktion (Typ 8, 9)

**Tabelle 143:** Beispiele von metaphorischen Konzepten von Lernern (siehe Kapitel 7).

Im Rahmen der Auswertung der Interviewstudie konnte zahlreiche Metaphern identifiziert und analysiert werden. Die Rekonstruktion metaphorischer Konzepte erwies sich als schwierig, da die Lerner selten mehrere Metaphern mit gleichem Ziel- und Quellbereich benutzt haben. Eine Ausnahme stellen die metaphorischen Konzepte 'Luft & Wind sind Personen' und 'Wind ist fließendes Wasser' dar. Die Personifizierung von Luft oder Wind wurden von Lernern eingesetzt, um die Art der Luftbewegung zu veranschaulichen: Warme Luft wird von kalter Luft „verdrängt“ und „legt sich über die kältere“ (Typ 2), sie wird von kalter Luft „ummantelt“ (Typ 4) oder Luft „berührt“ andere Luft (Typ 32). Noch häufiger wird das metaphorische Konzept herangezogen, um die Ursache der Luftbewegung zu verstehen: Luft mit hoher Dichte „geht runter“ (Typ 1), sie wird „abgelenkt“ und möchte etwas ausgleichen (Typ 15). Luft „drückt“ andere Luft weg (Typ 16), Luft „pustet“, „geht hoch“ oder „weicht aus“ (Typ 19). Luft „geht sich aus dem Weg“ oder kann sich bezüglich der Bewegungsrichtung „nicht entscheiden“ (Typ 20). Wind nimmt Luft mit (Typ 22, 30) oder Luft wird vom Wind „getragen“ (Typ 31). Auch Veränderungen von Luft oder Wind werden über Personifizierungen veranschaulicht: Die Dichte aufsteigender Luft nimmt ab, weil sie sich an die umgebende Luft anpasst (Typ 6). Warme Luft „trägt“ viel Wasser mit sich bzw. sie kann mehr Wasser „aufnehmen“ (Typ 12). Sie entlädt sich ihres Wasserdampfes und braucht neuen Wasserdampf (Typ 24). Luft sinkt nur bis zu einer bestimmten Höhe ab, weil sie sich nicht an die Luft darunter anpassen kann (Typ 29). Das metaphorische Konzept 'Wind ist fließendes Wasser' wird von einigen Lernern verwendet, um die Art von Luftbewegungen zu veranschaulichen: Luft strömt oder fließt (Typ 15, 25) oder sie staut sich (Typ 29, 32). Es gibt einen „Rückfluss“ (Typ 31). Es wird jedoch auch verwendet,

um die Ursache von Luftbewegungen zu verstehen: Aufwinde entstehen, weil Luftströme aufeinander treffen (Typ 3) und sie von nachströmender Luft nach oben gedrückt werden (Typ 7). Umgekehrt wird absinkende Luft von nachströmender Luft in der Höhe runtergedrückt (Typ 22). Es wird angenommen, dass Luft entlang eines Gefälles vom Hoch zum Tief fließt: Hochdruckgebiete werden in der Höhe verortet, Tiefdruckgebiete in Bodennähe (Typ 15). Oder Luft wird in Folge einer Stauung verdrängt (Typ 16, 18, 32).

Weitere Metaphern werden herangezogen, um den vertikalen Aufbau der Atmosphäre zu veranschaulichen. Die Lerner nehmen dabei an, dass die Atmosphäre in Schichten aufgeteilt ist, deren Grenzen nur bedingt passierbar sind. Wolken erscheinen beispielsweise als Personen mit bestimmten Zwecken und Absichten: Sie halten warme Luft davon ab, weiter aufzusteigen (Typ 8). Lerner sprechen von einem „Schutzmantel“, einer „Schutzschicht“, von Schranken oder Übergängen, die verhindern sollen, dass Gase in den Weltraum entweichen oder Meteoriten auf die Erde einschlagen (Typ 9). Sich bewegende Luft scheint zudem als eine Art fester Körper angesehen zu werden: Verschiedene Luft-Entitäten können „aufeinander crashen“ oder „aneinander prallen“(Typ 14). Sie können zusammenstoßen oder sich gegenseitig abstoßen (Typ 20). Ein Lerner spricht von Luftsäulen (Typ 25). Zahlreiche weitere Metaphern mit anderen Ziel- und Quellbereichen konnten identifiziert werden, auf die an dieser Stelle jedoch nicht im Einzelnen eingegangen werden kann.

### *2.3 Inwiefern gibt es geschlechtsspezifische Unterschiede bei den Vorstellungen der Lerner?*

Um mögliche geschlechtsspezifische Unterschiede bei den Vorstellungen der Lerner besser erfassen zu können, wurden ausschließlich Gruppen gleichen Geschlechts gebildet. Aufgrund von Ergebnissen der Interessensforschung wird angenommen, dass männliche Probanden eher an physisch-geographischen Themen und Fragestellungen interessiert sind (siehe Kapitel 3, Abschnitt 3.2). Eine Studie, die im Rahmen der Untersuchungsaufgabe 2 analysiert wurde, kommt zum Ergebnis, dass Schülerinnen unter bestimmten Bedingungen eher die Fähigkeit entwickeln, Systeme zu erkennen und zu verstehen (SOMMER 2005, 215ff.). Entsprechend interessant erscheint die Frage, inwiefern es bei den Vorstellungen zur Passatzirkulation geschlechtsspezifische Unterschiede gibt. Diese konnten jedoch nicht nachgewiesen werden. Sowohl männliche als auch weibliche Probanden äußerten ähnliche Vorstellungen und belegten diese mit vergleichbaren lebensweltlichen Erfahrungen. Die Verteilung der Typen von Vorstellungen nach dem Geschlecht (siehe Tabelle 144) wird lediglich herangezogen, um zu belegen, dass sich alle Typen jeweils auf Äußerungen von Mädchen und Jungen zurückführen lassen. Eine quantitative Auswertung der Verteilung erscheint nicht sinnvoll, da der Umfang der Studie (n=30) nicht repräsentativ ist und zudem mehr weibliche als männliche Probanden befragt (18w, 12m) wurden. Sowohl Mädchen als auch Jungen nutzen Personifizierungen

und Metaphern, etwa in Form des metaphorischen Konzeptes 'Wind ist fließendes Wasser'. Beide kommen zu aus wissenschaftlicher Sicht unangemessenen Schlussfolgerungen, da sie Metaphern umfassender als Wissenschaftler interpretieren (siehe oben). Erklärt werden könnten die Ähnlichkeiten der Vorstellungen damit, dass sie auf grundlegenden Erfahrungen mit der physisch-materiellen Umwelt beruhen, die beide Geschlechter in ähnlicher Weise erleben (WANDERSEE ET AL. 1994, 177ff.; REUTLINGER 2008, 333ff.).

Typ-Nr.	Anzahl weiblich (w), männlich (m)	Typ-Nr.	Anzahl weiblich (w), männlich (m)
1	13w 5m	20	9w 4m
2	5w 6m	21	6w 4m
3	3w 2m	22	11w 6m
4	17w 9m	23	1w 5m
5	4w 2m	24	8w 1m
6	9w 1m	25	11w 8m
7	6w7m	26	4w 5m
8	7w2m	27	3w 1m
9	9w2m	28	15w, 5m
10	16w11m	29	10w 7m
11	17w, 11m	30	9w 1m
12	16w, 11m	31	6w 7m
13	18w, 12m	32	3m 1w
14	12w 2m	33	4w 2m
15	4w 4m	34	6w 3m
16	4w 7w	35	10w 5m
17	1w 4m	36	3w 1m
18	1w 3m	37	7w 1m
19	6w 1m	38	2w 5m

**Tabelle 144:** Typen von Vorstellungen und Verteilung nach Geschlecht (siehe Anhang).

### 9.3 Ergebnisse der didaktischen Strukturierung

Im Rahmen der Untersuchungsaufgabe 4 konnten didaktische Empfehlungen auf der Basis eines wechselseitigen Vergleichens von Lerner- und Wissenschaftlerraussagen entwickelt werden. Folgende Fragen leiteten die Untersuchung:

3. *Welche Gemeinsamkeiten und Unterschiede lassen sich aus dem wechselseitigen Vergleich von Wissenschaftler- und Lernervorstellungen herausarbeiten?*

Es wurde zunächst untersucht, welche Lernervorstellungen aus wissenschaftlicher Sicht angemessen, welche bedingt angemessen und welche unangemessen erscheinen. Anschließend wurden Parallelen zwischen historischen wissenschaftlichen Vorstellungen und aktuellen Vorstellungen von Lernern herausgearbeitet.

3.1 Welche Lernervorstellungen sind aus wissenschaftlicher Sicht angemessen, welche bedingt angemessen und welche unangemessen?

Leitfrage	Erhobene Vorstellungen der Lerner (Typ-Nr.)	Beurteilung aus wissenschaftlicher Sicht	Relevante wissenschaftliche Vorstellungen
Wie stellen sich Lerner die Bedingungen vor, unter denen Luft aufsteigt?	Luft steigt unter der Bedingung auf, dass sie warm ist.(1)	Unangemessen	Luftdichte, Luftdruck, Lufttemperatur, Gewicht-, Auftriebskraft
	Luft steigt unter der Bedingung auf, dass sie wärmer als etwas ist. (2)	Angemessen	
	Luft steigt unter der Bedingung auf, dass etwas anderes sie dazu bringt.(3)	Bedingt angemessen	
Inwiefern stellen sich die Lerner vor, dass sich die Luft beim Aufsteigen verändert?	Aufsteigende Luft kühlt ab.(4)	Bedingt angemessen	Vertikaler Aufbau der Atmosphäre, adiabatische Prozesse, Luftdichte, Luftdruck, Lufttemperatur, Gewicht-, Auftriebskraft
	Aufsteigende Luft wird schwerer.(5)	Unangemessen	
	Aufsteigende Luft wird leichter.(6)	Bedingt angemessen	
Welche Vorstellungen haben die Lerner darüber, wie weit Luft aufsteigt?	Luft steigt auf, solange bestimmte Bedingungen gegeben sind.(7)	Bedingt angemessen	Vertikaler Aufbau der Atmosphäre, adiabatische Prozesse, Luftdichte, Luftdruck, Lufttemperatur, Gewicht-, Auftriebskraft
	Luft steigt bis zu den Wolken oder bis es regnet auf.(8)	Unangemessen	
	Luft steigt bis zu sonstigen Grenzen auf oder bis sie Hindernisse überquert hat.(9)	Unangemessen	

**Tabelle 145:** Lerner- und Wissenschaftlernaussagen zu Aufwinden im Vergleich (siehe Kapitel 8).

Wissenschaftler betrachten sich vertikal bewegende Luft als etwas Relatives. Druck, Dichte oder Temperatur der aufsteigenden oder absinkenden Luft werden im Verhältnis zur umgebenden Luft betrachtet. Die Abkühlung aufsteigender bzw. die Erwärmung absinkender Luft erklären sie als adiabatische Dilatation bzw. Kompression. Wie weit Luft aufsteigt oder absinkt hängt davon ab, in welchem Verhältnis Gewicht- und Auftriebskraft zueinander stehen. Entsprechend erscheinen die erhobenen Alltagsvorstellungen vom Typ 1, 5, 8 und 9 als aus wissenschaftlicher Sicht unangemessen. Lerner, die Vorstellungen vom Typ 3 und 7 artikulieren, führen die vertikale Luftbewegung auf dynamische Aspekte zurück, was unter bestimmten Bedingungen angemessen ist. Bei den Vorstellungen vom Typ 4 und 6 sind die beschriebenen Veränderungen aufsteigender Luft angemessen, nicht jedoch ihre Erklärungen.

Leitfrage	Erhobene Vorstellungen der Lerner (Typ-Nr.)	Beurteilung aus wissenschaftlicher Sicht	Relevante wissenschaftliche Vorstellungen
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)	Bedingt angemessen	Erdrevolution, Einstrahlungswinkel, Strahlungshaushalt
	Die Luft in den Tropen ist wärmer – Folgen. (11)	Bedingt angemessen	Luftdichte, Lufttemperatur, Luftdruck, Gewicht- und Auftriebskraft, vertikaler Aufbau der Atmosphäre, adiabatische Prozesse
	Die Luft in den Tropen enthält mehr Wasserdampf – Ursachen.(12)	Bedingt angemessen	Lufttemperatur, Verdunstung, Kondensation
	Die Luft in den Tropen enthält mehr Wasserdampf – Folgen. (13)	Bedingt angemessen	Luftdichte, Lufttemperatur, Luftdruck, Gewicht- und Auftriebskraft, vertikaler Aufbau der Atmosphäre, adiabatische Prozesse, Verdunstung, Kondensation

**Tabelle 146:** Lerner- und Wissenschaftlernaussagen zu Aufwinden in den Tropen im Vergleich (siehe Kapitel 8).

Wissenschaftler gehen von einer intensiveren solaren Einstrahlung in den Tropen aufgrund eines steileren Einstrahlungswinkels der Sonne bedingt durch die Schiefe der Ekliptik aus. Die tropische Luft wird sehr stark erwärmt, insbesondere im Bereich des Zenitstandes der Sonne und kann aufgrund der hohen Lufttemperaturen großen Mengen an Wasserdampf enthalten. Weit reichende

Aufwinde und konvektive Niederschläge im Bereich der ITCZ sind die Folge. Vorstellungen vom Typ 10 und 11 führen unterschiedlichste Ursachen und Folgen höherer Lufttemperaturen in den Tropen an, die nur zum Teil aus wissenschaftlicher Sicht angemessen erscheinen. Ebenso verhält es sich mit den Vorstellungen vom Typ 12 und 13.

Leitfrage	Erhobene Vorstellungen der Lerner (Typ-Nr.)	Beurteilung aus wissenschaftlicher Sicht	Relevante wissenschaftliche Vorstellungen
Welche Vorstellungen haben Lerner zur Ursache horizontaler Luftbewegungen (Windentstehung)?	Wind entsteht durch ein Aufeinandertreffen.(14)	Bedingt angemessen	Gradientkraft
	Wind entsteht als Folge eines Ausgleichs.(15)	Bedingt angemessen	
	Wind entsteht aufgrund eines Drückens oder aufgrund von Stößen. (16)	Bedingt angemessen	

**Tabelle 147:** Lerner- und Wissenschaftlernaussagen zur Ursache horizontaler Luftbewegungen im Vergleich (siehe Kapitel 8).

Wissenschaftler stellen sich Windentstehung als Folge unterschiedlicher Luftdruckverhältnisse vor. Die Gradientkraft wird dabei veranschaulicht durch zwei Behälter, zwischen denen sich eine imaginäre Wand durch die Stöße von Luftmolekülen in Richtung des niedrigeren Luftdrucks bewegt. Die Alltagsvorstellungen vom Typ 14, 15 und 16 erscheinen aus wissenschaftlicher Sicht nur bedingt angemessen, d.h. einige Aussagen sind unter bestimmten Bedingungen aus wissenschaftlicher Sicht angemessen. Unangemessen erscheinen beispielsweise Vorstellungen, die von sich bewegenden Luft- oder Druckentitäten ausgehen, die miteinander kollidieren können, wodurch Bewegungsimpulse übertragen werden, die Hochdruckgebiete in der Höhe und Tiefdruckgebiete in Bodennähe verorten oder Windentstehung dadurch erklären, dass sich Luftdruck bildet, der die Luft wegdrückt.

Leitfrage	Erhobene Vorstellungen der Lerner (Typ-Nr.)	Beurteilung aus wissenschaftlicher Sicht	Relevante wissenschaftliche Vorstellungen
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)	Unangemessen	Luftdichte, Lufttemperatur, Luftdruck, Gradient-, Gewicht- und Auftriebskraft
	Die aufgestiegene Luft sinkt allmählich, nach polwärtiger Bewegung wieder ab.(18)	Angemessen	
	Die aufsteigende Luft weht als Wind auf gleichbleibender Höhe.(19)	Unangemessen	
	Die sich in der Höhe bewegende Luft ändert ihre Richtung, weil sie auf etwas stößt oder von etwas angezogen wird. (20)	Unangemessen	Erdrotation, Coriolisablenkung
	Die sich in der Höhe bewegende Luft ändert ihre Richtung aufgrund der Erdrotation.(21)	Bedingt angemessen	

**Tabelle 148:** Lerner- und Wissenschaftlernaussagen zum Antipassat im Vergleich (siehe Kapitel 8).

Wissenschaftler gehen davon aus, dass die aufgestiegene Luft in den Tropen polwärts weht und allmählich wieder absinkt. Als Ursache der horizontalen Luftbewegung in der Höhe wird die Gradientkraft angesehen. Gewicht- und Auftriebskräfte befinden sich in einem Gleichgewichtszustand, bei weiterer Abkühlung überwiegt die Gewichtskraft und die Luft sinkt ab. Die Coriolisablenkung bewirkt eine Ablenkung der sich bewegenden Luft auf der Nordhalbkugel in Bewegungsrichtung nach rechts, auf der Südhalbkugel nach links. Lerner, die Luft als etwas Absolutes betrachten, gehen davon aus, dass die aufgestiegene Luft vor Ort absinkt, da sie abgekühlt ist (Typ

17). Andere beschreiben einen Höhenwind ohne vertikale Komponente (Typ 19). Vorstellungen, dass sich bewegende Luft als eine Art Entität durch Zusammenstöße mit anderen Entitäten ihre Richtung ändert, erscheinen aus wissenschaftlicher Sicht unangemessen. Vorstellungen vom Typ 21 stellen einen Zusammenhang zur Erdrotation her, erklären das Phänomen jedoch aus wissenschaftlicher Sicht zum Teil unangemessen.

Leitfrage	Erhobene Vorstellungen der Lerner (Typ-Nr.)	Beurteilung aus wissenschaftlicher Sicht	Relevante wissenschaftliche Vorstellungen
Wie stellen sich Lerner die Bedingungen vor, unter denen Luft in der Höhe absinkt?	Luft sinkt ab unter der Bedingung, dass sie schwer ist.(22)	Unangemessen	Luftdichte, Luftdruck, Lufttemperatur, Gewichts-, Auftriebskraft
	Luft sinkt ab unter der Bedingung, dass sie schwerer oder kälter als etwas ist.(23)	Angemessen	
	Luft sinkt aus sonstigen Gründen ab.(24)	Bedingt angemessen	
Inwiefern stellen sich die Lerner vor, dass sich die Luft beim Absinken verändert?	Die absinkende Luft erwärmt sich – Ursachen.(25)	Bedingt angemessen	Vertikaler Aufbau der Atmosphäre, adiabatische Prozesse, Luftdichte, Luftdruck, Lufttemperatur, Gewichts-, Auftriebskraft
	Die absinkende Luft erwärmt sich – Folgen.(26)	Bedingt angemessen	
	Die absinkende Luft erwärmt sich nicht – Ursachen.(27)	Unangemessen	
Welche Vorstellungen haben Lerner darüber, wie weit Luft absinkt?	Die Luft sinkt bis zum Boden ab – Ursachen.(28)	Unangemessen	Vertikaler Aufbau der Atmosphäre, adiabatische Prozesse, Luftdichte, Luftdruck, Lufttemperatur, Gewichts-, Auftriebskraft
	Luft sinkt nur bis zu einer bestimmten Höhe ab – Ursachen.(29)	Bedingt angemessen	

**Tabelle 149:** Lerner- und Wissenschaftlernaussagen zum Urpassat im Vergleich (siehe Kapitel 8).

Dass Wissenschaftler sich vertikal bewegende Luft als etwas Relatives betrachten und Veränderungen von Temperatur, Dichte oder Druck als adiabatische Prozesse verstehen, wurde bereits erläutert. Entsprechend erscheinen die erhobenen Vorstellungen vom Typ 22, 27 und 28 als unangemessen. Bei den Vorstellungen vom Typ 25, 26 und 29 ziehen Lerner zum Teil aus wissenschaftlicher Sicht falsche Erklärungen heran.

Leitfrage	Erhobene Vorstellungen der Lerner (Typ-Nr.)	Beurteilung aus wissenschaftlicher Sicht	Relevante wissenschaftliche Vorstellungen
Welche Vorstellungen haben Lerner zur Passatzirkulation?	Ursachen und Folgen ohne Wechselwirkungen.(30)	Unangemessen	Erdrevolution, Erdrotation, Einstrahlungswinkel, Strahlungshaushalt, Luftdichte, Luftdruck, Lufttemperatur, Verdunstung, Kondensation, Niederschlagsbildung, Vertikaler Aufbau der Atmosphäre, adiabatische Prozesse, Gewichts-, Auftriebs-, Gradient-, Reibungskraft, Coriolisablenkung
	Der Passatzirkulation als lineares System.(31)	Unangemessen	
	Der Passatzirkulation als komplexes System mit Wechselwirkungen.(32)	Bedingt angemessen	
	Der Passatwind ändert seine Richtung aufgrund der Erdrotation.(33)	Bedingt angemessen	
	Der Passatwind ändert seine Richtung aufgrund von Zusammenstößen.(34)	Unangemessen	

**Tabelle 150:** Lerner- und Wissenschaftlernaussagen zur Passatzirkulation im Vergleich (siehe Kapitel 8).

Wissenschaftler stellen sich die Passatzirkulation als komplexes System mit Wechselwirkungen vor. Entsprechend erscheinen Lernaussagen vom Typ 30 und 31 aus wissenschaftlicher Perspektive unangemessen. Darstellungen von Wechselwirkungen, die im Rahmen von Vorstellungen vom Typ 32 artikuliert werden, stimmen nur bedingt mit wissenschaftlichen Aussagen überein. Ein Einfluss der Erdrotation auf die Bewegungsrichtung des Passatwindes wird angenommen, jedoch zum Teil falsch

erklärt. Die Vorstellung, dass der Passatwinde als eine Art Entität mit anderen Entitäten zusammenstoßen kann und daher seine Richtung ändert (Typ 34), erscheint aus wissenschaftlicher Sicht unangemessen.

Leitfrage	Erhobene Vorstellungen der Lerner (Typ-Nr.)	Beurteilung aus wissenschaftlicher Sicht	Relevante wissenschaftliche Vorstellungen
Welche Vorstellungen haben die Lerner zur Entstehung der Regenzeiten in den wechselfeuchten Tropen?	Regenzeiten entstehen durch einen Wechsel der Windrichtung.(35)	Bedingt angemessen	Erdrevolution, Erdrotation, Einstrahlungswinkel, Strahlungshaushalt, Luftdichte, Luftdruck, Lufttemperatur, Verdunstung, Kondensation, Niederschlagsbildung, Vertikaler Aufbau der Atmosphäre, adiabatische Prozesse, Gewichts-, Auftriebs-, Gradient-, Reibungskraft, Coriolisablenkung
	Regenzeiten entstehen aufgrund eines sich ändernden Abstands der Erde zur Sonne.(36)	Unangemessen	
	Regenzeiten entstehen aufgrund eines sich ändernden Einstrahlungswinkels der Sonne.(37)	Bedingt angemessen	
	Regenzeiten entstehen, weil sich etwas füllt oder anstaut.(38)	Unangemessen	

**Tabelle 151:** Lerner- und Wissenschaftlernaussagen zur Ursachen von Regenzeiten in den wechselfeuchten Tropen im Vergleich (siehe Kapitel 8).

Die Entstehung von Regenzeiten in den wechselfeuchten Tropen führen Wissenschaftler auf eine Verschiebung der ITCZ zurück, bedingt durch die jahreszeitliche Veränderung des Einstrahlungswinkels der Sonne. Trockenheit wird durch die Passatinversion erklärt. Vorstellungen vom Typ 35 erinnern an einen Sonderfall der Passatzirkulation, den Monsun. Unter bestimmten Bedingungen erscheinen diese Vorstellungen aus wissenschaftlicher Perspektive angemessen, im Gegensatz zu Vorstellungen vom Typ 36 und 38. Der Einfluss des Einstrahlungswinkels der Sonne auf die Entstehung von Regenzeiten wird zum Teil aus wissenschaftlicher Sicht unangemessen gedeutet (Typ 37).

### *3.2 Welche inhaltlichen Parallelen lassen sich zwischen historischen wissenschaftlichen Vorstellungen und aktuellen Vorstellungen der Lerner nachweisen?*

Francis Bacon stellt sich Windentstehung als eine Art Kettenreaktion vor: Luft dehnt sich aus und stößt andere Luft an, die wiederum andere Luft in Bewegung versetzt (siehe Kapitel 5, Abschnitt 5.1.1). Lerner gehen ebenfalls davon aus, dass Luft mit anderer Luft zusammenstoßen kann, wodurch ein Impuls von einer Luftentität auf die andere übertragen wird. Sie verstehen Luft hierbei als eine Art Festkörper. Richtungsänderungen sich bewegender Luft werden durch Zusammenstöße erklärt (Typ 16, 20, 34). Das von Wissenschaftlern angeführte metaphorische Konzept 'Luft ist Behälter' könnte solche Vorstellungen evozieren. Einige Lerner betrachten die Passatwinde als Resultat einer Relativbewegung der Erdoberfläche gegenüber der Luft (Typ 33). Diese Erklärung führt auch Galilei an (siehe Kapitel 5, Abschnitt 5.1.2). Hier könnten (unbewusste) Überzeugungen von Luft als leichtem Element (vgl. Rahmentheorieansatz) eine Rolle spielen. Auch der mögliche Einfluss des Tagesganges der Sonne auf die Richtung der Passatwinde, die historische Vorstellung Halleys (siehe Kapitel 5, Abschnitt 5.1.3) wird von einigen Lernern diskutiert (Typ 30).

4. Welche Vermittlungsstrategien lassen sich unter Berücksichtigung der Erkenntnisse der didaktischen Vorstellungsforschung ableiten?

Im Rahmen der Untersuchungsaufgabe 4 wurden didaktische Empfehlungen auf der Basis des wechselseitigen Vergleichens von Lerner- und Wissenschaftlervorstellungen entwickelt. Hierbei konnten zentrale Schwierigkeiten der Lerner beim Verstehen der wissenschaftlichen Vorstellungen benannt sowie für das Verstehen der Passatzirkulation zentrale wissenschaftliche Konzepte herausgearbeitet werden.

4.1 Welches sind die zentralen Schwierigkeiten der Lerner beim Verstehen der wissenschaftlichen Vorstellungen?

Bestimmte Annahmen der Lerner erschweren ein Verstehen wissenschaftlicher Vorstellungen. Diese konnten identifiziert und fünf Bereichen zugeordnet werden (siehe Tabelle 152).

Bereich	Zentrale Schwierigkeiten der Lerner	Vorstellungstypen
Windentstehung und Folgen im Allgemeinen	Verstehen vertikaler Luftbewegungen als etwas Relatives: Lerner betrachten sich vertikal bewegende Luft als etwas Absolutes.	1, 7, 8, 9, 17, 22, 28
	Verstehen von Luft als sich bewegendem Körper: Lerner ordnen diesem Festkörpereigenschaften zu.	3, 9, 14, 16, 20, 24, 29, 34
	Verstehen von adiabatischen Prozessen: Lerner gehen davon aus, dass Luft Wärme an umgebende Luft leitet und durch Energie- oder Wärmeaufnahme schwerer wird.	4, 10, 11, 25, 27
Verdunstung, Kondensation, Wolkenbildung und Regen im Allgemeinen	Verstehen der Verhaltens von Wasser in der Atmosphäre: Lerner gehen davon aus, dass Luft wird durch Aufnahme von Wasserdampf schwerer wird, Luft mit dem Regen absinkt oder Wolken Behälter sind, die sich mit Wasserdampf füllen, wobei es umso länger regnet, umso größer diese gefüllten Behälter sind.	5, 8, 12, 13, 38
Entstehung der Jahreszeiten und Ursache hoher Lufttemperaturen in den Tropen	Verstehen der Abhängigkeit solarer Strahlungsintensität vom Einstrahlungswinkel: Lerner gehen davon aus, dass Lufttemperaturen vom Abstand zwischen Erde und Sonne abhängig sind. Sie erachten eine größere Nähe im jahreszeitlichen Verlauf aufgrund der elliptischen Erdbahn als relevant, größere Nähe der Nord- bzw. Südhalbkugel aufgrund der Neigung der Erdachse zur Sonne oder größere Nähe der Tropen zur Sonne aufgrund der Kugelgestalt der Erde	10
Passatzirkulation und Passatwinde	Verstehen der Wechselwirkungen und Rückkopplungen im Rahmen der Passatzirkulation: Lerner erklären die Passatwinde als Resultat einer Relativbewegung der Erdoberfläche gegenüber der Atmosphäre. Passatwinde können wie Festkörper zusammenstoßen und dadurch ihre Richtung ändern. Sie begreifen die Passatzirkulation als einfache Ursache-Folge-Relation, als lineares System, bei dem Prozesse zeitlich nacheinander stattfinden, oder als komplexes System, jedoch aus wissenschaftlicher Sicht nicht angemessen.	14, 16, 20, 21, 30, 31, 32, 33, 34,
Entstehung von Regen- und Trockenzeiten in den wechselfeuchten Tropen	Verstehen der inversionsbedingten Trockenheit in den wechselfeuchten Tropen: Lerner erklären Regen- und Trockenzeiten als Folge einer Änderung der Windrichtung, Trockenheit aufgrund von Hitze oder Regenzeiten als Folge eines Füllens oder Stauens	35, 36, 37, 38

**Tabelle 152:** Zentralen Schwierigkeiten der Lerner beim Verstehen der wissenschaftlichen Vorstellungen.

*4.2 Welches sind die aus wissenschaftlicher Sicht zentralen Konzepte, die für ein angemessenes Verstehen der Passatzirkulation notwendig erscheinen?*

Im Rahmen des wechselseitigen Vergleichens von Wissenschaftler- und Lernervorstellungen wurden zentrale Konzepte identifiziert, die für ein angemessenes Verstehen der Passatzirkulation notwendig sind. Es handelt sich hierbei um das Erfassen

1. der Ursachen vertikaler Luftbewegungen durch relative Betrachtung,
2. der Lufttemperatur als Bewegung von Teilchen,
3. der Veränderungen von Luftdruck, -temperatur und -dichte bei horizontalen und vertikalen Luftbewegungen,
4. von Wasser in der Atmosphäre und Wolken mit Hilfe der basalen Logik 'Aufnahme-Zustandsänderung-Ausscheidung',
5. von Wasser in der Atmosphäre, Wolken und Regenentstehung als Wirken von Gewicht- und Auftriebskräften,
6. von himmelsmechanischen Ursachen stärkerer Erwärmung der Luft in den Tropen,
7. der Wirkungsweise der Coriolisablenkung,
8. der Passatzirkulation als komplexes System mit Wechselwirkungen,
9. der Entstehung von Regenzeiten in den wechselfeuchten Tropen und Ursache von Trockenheit.

*4.3 Wie lassen sich diese zentralen Konzepte unter Berücksichtigung der zentralen Schwierigkeiten der Lerner erfolgreich vermitteln?*

Insgesamt konnten neun kognitiv ausgerichtete didaktische Empfehlungen entwickelt werden, die aufeinander aufbauen (siehe Tabelle 153). Sie orientieren sich am klassischen *Conceptual-Change-Modell* (POSNER ET AL. 1982). Es wird zunächst Unzufriedenheit bei den Lernern mit ihren Alltagsvorstellungen erzeugt, indem Widersprüche innerhalb von Vorstellungen, zwischen verschiedenen Vorstellungen oder Beobachtungen aufgezeigt werden. Anschließend wird eine neue Erklärung eingeführt, die verständlich und plausibel sein sollte und zudem in weiteren Kontexten fruchtbar einsetzbar.

(Nr.) Didaktische Empfehlungen	Unzufriedenheit mit Alltagsvorstellungen	Erklärungspotential
(1) Sich vertikal bewegende Luft als etwas Relatives betrachten.	Typ 1, 7, 8, 9, 17, 22, 28	Ursache von vertikalen Luftbewegungen
(2) Sich bewegende Luft als einen sich in seiner Form verändernden Behälter begreifen.	Typ 3, 9, 14, 16, 20, 24, 29, 34	Veränderung von Luftdruck, -temperatur und -dichte bei horizontalen und vertikalen Luftbewegungen
(3) Erwärmung von Luft über die basale Logik 'Aufnahme-Zustandsänderung-Ausscheidung' angemessen verstehen.	Typ 4, 10, 11, 25, 27	Lufttemperatur
(4) Wasser in der Luft mit Hilfe der basalen Logik 'Aufnahme-Zustandsänderung-Ausscheidung' angemessen verstehen.	Typ 5, 8, 12, 13, 38	Wolken, Wasser in der Atmosphäre
(5) Wolken und Regenentstehung als Wirken von Gewicht- und Auftriebskräften über Ziehen- und Drücken-Schema angemessen verstehen.	Typ 8, 13	Wolken, Wasser in der Atmosphäre, Regenentstehung
(6) Solare Strahlungsintensität als Energie pro Fläche angemessen verstehen.	Typ 10	Himmelsmechanische Ursache stärkerer Erwärmung der Luft in den Tropen
(7) Den Einfluss der Erdrotation auf sich bewegende Luft angemessen erfassen.	Typ 21, 33	Wirkungsweise der Coriolisablenkung
(8) Die Passatzirkulation als komplexes System mit Wechselwirkungen angemessen erfassen.	Typ 30, 31, 32	Passatzirkulation als komplexes System mit Wechselwirkungen
(9) Inversionsbedingte Trockenheit in den Tropen angemessen erfassen.	Typ 35, 36, 37	Entstehung von Regenzeiten in den wechselfeuchten Tropen und Ursache von Trockenheit

**Tabelle 153:** Kognitiv ausgerichtete didaktische Empfehlungen im Überblick (siehe Kapitel 8, Abschnitt 8.1).

Zudem wurden metakognitiv ausgerichtete Empfehlungen formuliert. Es wird geraten, die Rolle von Metaphern für das Lernen und Verstehen im Sinne der kognitiven Metapherntheorie zu thematisieren, um ein Bewusstsein für die Erklärungspotentiale, aber auch die Gefahren, die mit Metaphern einhergehen, zu schaffen. Lerner interpretieren Metaphern häufig aus wissenschaftlicher Sicht unangemessen. So besitzen metaphorische Konzepte wie 'Wind ist fließendes Wasser' oder 'Luft & Wind sind Personen' beispielsweise aus wissenschaftlicher Sicht kein Erklärungspotential hinsichtlich der Ursachen von Luftbewegungen. Auch das Verstehen von sich bewegender Luft als festem Körper aufgrund von Metaphern wie Luftsäule, Walze, etc. oder Stockwerken der Atmosphäre als festen Grenzen erscheint aus wissenschaftlicher Sicht unangemessen. Lernern sollte auf der Metaebene an Beispielen aufgezeigt werden, dass sich wissenschaftlich angemessenes metaphorisches Verstehen auf wenige Aspekte beschränkt. Bestimmte Phänomene und Prozesse, die im Rahmen der Passatzirkulation stattfinden, sind lebensweltlich nicht oder kaum erfahrbar. Dies sind beispielsweise adiabatische Prozesse, Kondensation in der Atmosphäre, die Abhängigkeit der Intensität solarer Strahlung vom Einstrahlungswinkel sowie Multikausalität und Wechselwirkungen. Auf der Metaebene sollte an Beispielen thematisiert werden, dass solche Phänomene und Prozesse nur bedingt durch Vergleiche veranschaulicht werden können. Die Bedeutung von Erfahrungen für die Entwicklung von Vorstellungen sollte ebenfalls auf der Metaebene an Beispielen veranschaulicht werden. Zahlreiche erhobene Lerner aussagen erscheinen aufgrund von Alltagserfahrungen plausibel, obgleich sie aus wissenschaftlicher Perspektive falsch sind. Hierzu gehören die Vorstellungen, dass Luft nicht oder nur bedingt der Erdanziehungskraft unterliegt (Typ 21, 33), dass leichte Objekte

aufsteigen, während schwere sinken (Typ 1, 22), dass Wolken aus Wasserdampf bestehen (Typ 8, 38) oder Luft mit anderen Luftentitäten zusammenstoßen kann (Typ 14, 16, 20). Historische Vorstellungen könnten genutzt werden, um Lernern die Entwicklung wissenschaftlicher Vorstellungen zu veranschaulichen. Lerner übertragen zudem häufig Ideen oder Aspekte des dynamischen Wettergeschehens in den mittleren Breiten auf die Tropen. So verbinden Lerner etwa mit einem Hoch gutes und mit einem Tief schlechtes Wetter (Typ 30). Es wird empfohlen, auf der Metaebene die Rolle von Modellen, ihre Funktionen und ihr Verhältnis zur Wirklichkeit zu thematisieren.

Didaktische Empfehlungen	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
Parallelen zwischen historischen wissenschaftlichen und heutigen Vorstellungen von Lernern aufzeigen.	Entwicklung wissenschaftlicher Vorstellungen veranschaulichen; Vorstellungen über Wissenschaft reflektieren
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

**Tabelle 154:** Metakognitiv ausgerichtete didaktische Empfehlungen im Überblick (siehe Kapitel 8, Abschnitt 8.2).

Soziale und affektive Faktoren wurden ebenfalls bei der Formulierung didaktischer Empfehlungen reflektiert. Unter Berücksichtigung des Kontextmodells (CARRAVITA & HALLDÉN 1994, 108) wurden die Perspektiven herausgearbeitet, unter denen Lerner und Wissenschaftler Luftbewegungen und Wettererscheinungen betrachten. Es wird geraten, Lernern wissenschaftliche Kontexte und Anwendungsbezüge aufzuzeigen, um die Notwendigkeit einer kausal-analytischen Betrachtung atmosphärischer Prozesse nachvollziehbar zu machen und gleichzeitig Faszination und intellektuelle Neugier der Schülerinnen und Schülern beim Erkennen allgemeinen, übertragbarer Regeln oder Gesetzmäßigkeiten zu wecken (siehe Tabelle 155).

Perspektiven	Art der Betrachtungen	Begründung
Lernerperspektive	deskriptiv, phänomenologisch, teleologisch	Wetter beeinflusst Aktivitäten, lässt sich jedoch selbst nicht manipulieren
Wissenschaftlerperspektive	kausal-analytisch	Kenntnisse von Ursachen und Zusammenhängen global vorherrschender Windrichtungen, um u.a. die Entwicklung von Wetter- und Klimabedingungen in Naturräumen vorherzusagen; konkrete Anwendungsbezüge wie die Ausgestaltung von Flug- oder Schifffahrtsrouten

**Tabelle 155:** Lerner- und Wissenschaftlerperspektiven auf atmosphärische Prozesse (siehe Kapitel 8, Abschnitt 8.3).

Da es sich um eine Studie mit Schülerinnen und der Schülern aus Rheinland-Pfalz handelt, wurden die inhaltlichen und zeitlichen curricularen Vorgaben dieses Bundeslandes für das Grund- und Leistungsfach Erdkunde in Rheinland-Pfalz herangezogen und bei der Entwicklung von fünf Bausteinen mit einem Zeitumfang von jeweils etwa 90 Minuten berücksichtigt, die für eine Thematisierung der Passatzirkulation, beispielsweise im Kontext lernprozessanregender Aufgabenstellungen, herangezogen werden könnten. Diesen Bausteinen liegt jeweils eine

Problemorientierung zugrunde. Sie sollen die didaktischen Überlegungen konkretisieren, indem sie Vorschläge machen, in welchen thematischen Blöcken die kognitiv und metakognitiv ausgerichteten Empfehlungen jeweils umgesetzt werden könnten (siehe Kapitel 8, Abschnitt 8.4).

## 9.4 Ausblick

Klimageographische Inhalte im Geographieunterricht gelten unter Lehrenden und Lernenden als schwierig. Zentrale Bestandteile wie Luft oder Wasserdampf sind unsichtbar und gedanklich schwer zu fassen. Dass wissenschaftliche Vorstellungen zu atmosphärischen Prozessen auf bestimmten *kinesthetic image schemes* basieren, die direkt verstanden werden können, konnte im Rahmen der Arbeit herausgearbeitet werden. Zugleich wurden die Vorstellungen von Lernenden auf diese grundlegenden basalen Logiken hin untersucht. Hieraus konnten didaktische Leitlinien entwickelt werden, die Alltagsvorstellungen aufgreifen und die direkt verständlich sind. Für die Schulpraxis ergeben sich einige Wünsche und Empfehlungen:

1. Lernende und Lehrende sollten sich der Bedeutung von Alltagsvorstellungen für das Lernen bewusst werden. Konstruktivistisch ausgerichtete Lehr-Lernumgebungen ermöglichen es Lernenden, ihre Alltagsvorstellungen zu erkennen und diese mit Hilfe entsprechender Interventionen überprüfen und weiterentwickeln zu können. Lehrende sollten bei der Konzeption von Unterricht und entsprechender Lernangebote die Alltagsvorstellungen ihrer Schüler berücksichtigen (REINFRIED 2007). Hier bietet es sich an, im Vorfeld der Unterrichtsplanung Vorstellungen durch entsprechende Fragestellungen in Form von Texten, *concept maps* oder Skizzen zu erheben. Die Arbeit leistet hierzu einen Beitrag, indem sie mögliche Alltagsvorstellungen von Lernern zu atmosphärischen Prozessen darstellt und darauf aufbauend didaktischen Empfehlungen formuliert und fünf Bausteine zur konkreten Umsetzung entwickelt.
2. Lehrende und Lernende sollten für die Gefahren sensibilisiert werden, die mit einem unreflektierten Gebrauch von Metaphern einhergehen. Im Rahmen der Arbeit konnte nachgewiesen werden, dass Lernende auf ähnliche metaphorische Konzepte wie Wissenschaftler zurückgreifen, diese jedoch umfassender interpretieren. So wird das metaphorische Konzept 'Wind ist fließendes Wasser' von Lernern beispielsweise herangezogen, um die Ursache von Luftbewegungen zu erklären. Sie nehmen, wie bei einem Fließgewässer, ein Gefälle an und lokalisieren das Hochdruckgebiet in der Höhe und das Tiefdruckgebiet in Bodennähe. Erklärungspotentiale (*highlighting*) und Gefahren (*hiding*) von Metaphern sollten daher an Beispielen auf einer Metaebene reflektiert werden.
3. Lehrende sollten kritisch mit Unterrichtsmedien umgehen. Ein Blick in aktuelle Schulbücher offenbart zahlreiche Metaphern und Abbildungen, die aus wissenschaftlicher Sicht

unangemessene Vorstellungen evozieren könnten. Hier empfiehlt es sich in Abhängigkeit von den erhobenen Alltagsvorstellungen mögliche Verständnisprobleme auf der Metaebene zu thematisieren.

Weiterführende Forschungsarbeiten könnten sich mit einer systematischen Untersuchung von Schulbüchern und anderen Unterrichtsmedien befassen. Inwiefern evozieren darin enthaltene Metaphern oder Abbildungen Vorstellungen zu atmosphärischen Prozessen, die aus wissenschaftlicher Perspektive unangemessen sind? Im Sinne einer Validierung könnte geprüft werden, inwiefern diese mit den im Rahmen dieser Arbeit erhobenen Vorstellungen übereinstimmen. Die didaktischen Empfehlungen könnten in konkrete Lernangebote überführt und evaluiert werden. Hierzu würden sich Vergleichsstudien anbieten. Um den Einfluss des Alters auf Vorstellungen zu atmosphärischen Prozessen zu untersuchen, könnten Vorstellungen zur Passatzirkulation von Lernern früherer Jahrgangsstufen erhoben und mit den Ergebnissen dieser Arbeit verglichen werden. Welche Vorstellungen haben Lernende zum Wettergeschehen in unseren Breiten? Diese komplexe Thematik lässt sich nun besser erforschen, da mit dieser Arbeit grundlegende Alltagsvorstellungen zur Himmelsmechanik, den Ursachen und Folgen horizontaler und vertikaler Luftbewegungen, zu adiabatischen Prozessen sowie zu Wolken- und Niederschlagsbildung herausgearbeitet werden konnten, die auch in anderen Kontexten im Rahmen des Modells der Allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre relevant sind.

Im Rahmen dieser Arbeit sollten Vermittlungsstrategien zu klimageographischen Inhalten des Geographieunterrichts in Form didaktischer Empfehlungen entwickelt werden. Hierzu wurden Alltagsvorstellungen und wissenschaftliche Vorstellungen zum Modell der Passatzirkulation untersucht. Dieses wird als System mit hohem Transferpotential betrachtet, da grundlegende Einsichten zu den Ursachen und Folgen von Luftbewegungen, ihrem systemischen Zusammenwirken, zu adiabatischen Prozessen, zu Regentstehung oder zum Wirken der Coriolisablenkung ermöglicht werden, die auch in anderen räumlichen Kontexten im Rahmen der Allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre eine Rolle spielen. Ein angemessenes Verständnis atmosphärischer Vorgänge ermöglicht es, die Komplexität und Fragilität des Systems Erde zu erahnen und Lerner für einen nachhaltigen Umgang mit der Erde und ihren Ressourcen zu sensibilisieren.

Mit dieser Arbeit geht der Wunsch einher, naturwissenschaftliches Lernen zu ermöglichen, das unter Berücksichtigung von Alltagsvorstellungen Erstaunen, Neugier und Forscherdrang bei Schülerinnen und Schülern weckt. Es wurden Empfehlungen zur Gestaltung von Lernumgebungen formuliert, die es Lernenden ermöglichen sollen, sich ihrer Alltagsvorstellungen zur Passatzirkulation bewusst zu werden, diese zu prüfen und weiterentwickeln zu können. Damit werden die Lerner zu Forschern, die ihre eigenen Ideen und Hypothesen überprüfen, motiviert durch die Erkenntnis, dass ihre bisherigen Vorstellungen bestimmte Phänomene oder Prozesse nicht vollständig erklären konnten.

## Literatur

- AMIN, T. (2009): Conceptual metaphor meets conceptual change. In: *Human development*, 52(1), 165-197.
- ARON, R. ET AL. (1994): Atmospheric misconceptions. In: *The science teacher*, 61(1), 31-33.
- ASSARF, O. & N. ORION (2005a): A study of junior high students' perceptions of the water cycle. In: *Journal of geoscience education*, 53(4), 366-373.
- ASSARF, O. & N. ORION (2005b): Development of system thinking skills in the context of earth system education. In: *Journal of research in science teaching*, 42(5), 518-560.
- AUSUBEL, D. (1974): *Psychologie des Unterrichts*. Weinheim.
- BAUER, F. (2006): Johann Heinrich Lambert (1728–1777). In: *Akademie aktuell – Zeitschrift der Bayerischen Akademie der Wissenschaften*, 16(1), 12–15.
- 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.: *Wetterkunde, Wetterforschung. Geschichte ihrer Probleme und Erkenntnisse in Dokumenten aus drei Jahrtausenden*. München. 1955, 56-57.
- BASER, M. (2006): Fostering conceptual change by cognitive conflict based instruction on students' understanding of heat and temperature concepts. In: *Eurasia journal of mathematics, science and technology education*, 2(2), 96-113.
- BASTEN, T. (2012): Ascension-Inland – rätselhafte Trockenheit. Eine Lernaufgabe zur Ursache von Trockenheit unter Berücksichtigung lebensweltlicher Vorstellungen. In: *Geographie und Schule*, 34(198), I-IV.
- BAUER, J., S. HALLERMANN & F. MORGENEYER (2008): *Geographie. Rheinland-Pfalz*. SII. Braunschweig.
- BÄUMER-SCHLEINKOFER, Ä. (1999): Sir Francis Bacon. In: Fritz Krafft (Hg.): *Vorstoß ins Unerkannte. Lexikon großer Naturwissenschaftler*. Weinheim, 37.
- BAYRAKTAR, S. (2009): Misconceptions of turkish pre-service teachers about force and motion. In: *International journal of science and mathematics education*, 23(7), 273-291.
- BERNHARDT, K. (1997): Zur Entwicklung der Vorstellungen von der atmosphärischen Grundschicht vom 19. bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts. In: *Meteorologische Zeitschrift*, 6(6), 249-260.
- BESSON, U. (2004): Students' conceptions of fluids. In: *International journal of science education*, 26 (14), 1683-1714.
- BOHNSACK, R. (2010): *Rekonstruktive Sozialforschung. Einführung in qualitative Methoden*. Opladen.

BORSODORF, A. (<sup>2</sup>2007): Geographisch denken und wissenschaftlich arbeiten. Berlin.

BRUNER, J.S. (1971): Studien zur kognitiven Entwicklung. Stuttgart.

BRUTSAERT, W. (1991): Evaporation into the atmosphere: Theory, history and application. Boston.

BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG (BMBF) (2002): Bericht der Bundesregierung zur Bildung für eine nachhaltige Entwicklung. Bonn.

CARAVITA, S. & O. HALLDÉN (1994): Reframing the problem of conceptual change. In: Learning and instruction, 4, 89-111.

CASSEL-GINTZ, M. & M. BAHR (2008): Syndrome globalen Wandels. In: Praxis Geographie, 38(6), 2-12.

CHALMERS, A. (<sup>6</sup>2007): Wege der Wissenschaft. Berlin.

CHANG, J. (1999): Teachers college students' conceptions about evaporation, condensation, and boiling. In: Science education, 83(5), 511-526.

CHI, M. (2008): Three types of conceptual change: belief revision, mental model transformation, and categorical shift. In: S. VOSNIADOU (HG.): International handbook of research on conceptual change, New York, 61-82.

CHINN, C. & W. BREWER (1993): The role of anomalous data in knowledge acquisition: a theoretical framework and implications for science education. In: Review of educational research, 63, 1-49.

DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOGRAPHIE (DGFG) (Hg.) (<sup>6</sup>2010): Bildungsstandards im Fach Geographie für den Mittleren Schulabschluss. Bonn.

DILTHEY, W. (1883): Einleitung in die Geisteswissenschaften. In: W. DILTHEY (Nachdruck 2006): Gesammelte Schriften, Bd.1., Göttingen.

DISSA, A. (2008): A bird's eye view of the pieces vs. coherence controversy. In: S. VOSNIADOU (Hg.): International handbook of research on conceptual change, New York, 35-60.

DRIELING, K. (2008): Erde oder Boden, Horizonte oder Schichten? Alltagsvorstellungen zum Aufbau des Bodens. In: Geographie heute, 29(265), 34-39.

DUIT, R. (1995): Zur Rolle der konstruktivistischen Sichtweise in der naturwissenschaftsdidaktischen Lehr- und Lernforschung. In: Zeitschrift für Pädagogik 41(6), 905-923.

DUIT, R. (2000): Konzeptwechsel und Lernen in den Naturwissenschaften in einem mehrperspektivischen Ansatz. In: R. DUIT (HG.): Ergebnisse fachdidaktischer und psychologischer Lehr-Lern-Forschung, Kiel, 77-103.

DUIT, R. (2008): Zur Rolle von Schülervorstellungen im Unterricht. In: *Geographie heute*, 29(265), 2-6.

DUIT, R. & D. TREAGUST (1998): Learning in Science – from behaviourism towards social constructivism and beyond. In: B. FRASER & K. TOBIN (HG.): *International Handbook of science education*, 3-26.

DUIT, R. & D. TREAGUST (2003): Conceptual change – a powerful framework for improving science teaching and learning. In: *International journal of science education*, 25(6), 671-688.

EGNER, H. (2010): *Theoretische Geographie*. Darmstadt.

EMEIS, S. (1998): Wie kommt das Wasser in die Wolken? – Oder warum der Stand der Thermodynamik vor dem Ende des 18. Jahrhunderts kaum Gedanken über die dritte Dimension aufkommen ließ. In: *Annalen der Meteorologie*, 37, 215-216.

FELZMANN, D. (2010): Wenn Gletscher und Schülervorstellungen in Bewegung geraten – Analyse der Vorstellungsentwicklung zum Thema Gletscherbewegung in einem Vermittlungsexperiment. In: S. REINFRIED (HG.): *Schülervorstellungen und geographisches Lernen. Aktuelle Conceptual-Change-Forschung und Stand der theoretischen Diskussion*. Berlin, 87-122.

FLICK, U. (<sup>3</sup>2011): *Triangulation. Eine Einführung*. Wiesbaden.

FRAEDRICH, W. (1997): Wetter und Klima. In: *Geographie heute*, 18(147), 4-39.

FREUDIG, D., S. GANTER & R. SAUERMOST (1996): *Lexikon der Naturwissenschaftler*. Heidelberg.

GALILEI, G. (1632): *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo* (dt.: Dialog über die beiden hauptsächlichen Weltsysteme, das ptolemäische und das copernicanische). Reprint in Auszügen in: G. HELLMANN: *Neudrucke von Schriften und Karten über die Meteorologie*, Bd. 6, 1896, S.10f., deutsche Übersetzung (mit Kürzungen) in: SCHNEIDER-CARIUS, K: *Wetterkunde, Wetterforschung. Geschichte ihrer Probleme und Erkenntnisse in Dokumenten aus drei Jahrtausenden*. München. 1955, 57-58.

GAPP, S. & Y. SCHLEICHER (2010): Alltagsvorstellungen von Grundschulkindern – Erhebungsmethoden und Ergebnisse, dargestellt anhand der Thematik Schalenbau Erde. In: S. REINFRIED (Hg.): *Schülervorstellungen und geographisches Lernen*. Berlin, 33-54.

GEBHARDT, H., R. GLASER, U. RADTKE & P. REUBER (HG.) (<sup>2</sup>2011): *Geographie. Physische Geographie und Humangeographie*. Heidelberg.

GERSTENMAIER, J. & H. MANDL (1995): Wissenserwerb unter konstruktivistischer Perspektive. In: *Zeitschrift für Pädagogik*, 41(6), 867-888.

GOPAL, H., J. KLEINSCHMIDT, J. CASE & P. MUSONGE (2004): An investigation of tertiary students' understanding of evaporation, condensation and vapour pressure. In: *International Journal of science education*, 26 (13), 1597-1620.

GROEBEN, N., D. WAHL, J. SCHLEE . & B. SCHEELE (1988): Das Forschungsprogramm Subjektive Theorien. Tübingen.

GROPENGIEßER, H. (<sup>2</sup>2006): Wie man Vorstellungen der Lerner verstehen kann. Lebenswelten, Denkwelten, Sprechwelten. Oldenburg.

GROPENGIEßER, H. (2007): Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens. In: D. KRÜGER & H. VOGT (HG.): Theorien in der biologiedidaktischen Forschung. Berlin, 105-116.

GROPENGIEßER, H. (<sup>3</sup>2008): Qualitative Inhaltsanalyse in der fachdidaktischen Lehr-Lernforschung. In: P. MAYRING & M. GLAESER-ZIKUDA (HG.): Die Praxis der Qualitativen Inhaltsanalyse. Weinheim und Basel, 172-189.

HÄCKEL, H. (<sup>7</sup>2012): Meteorologie. Stuttgart.

HADLEY, G. (1735): Concerning the cause of the trade winds. In: Philosophical Transactions of the Royal Society, 19, 58-62. - Reprint in: G. HELLMANN: Neudrucke von Schriften und Karten über die Meteorologie, Bd. 6, 1896, 17-21.

HALLDÉN, O. (1999): Conceptual change and contextualization. In: W. SCHNOTZ ET AL. (HG.): New Perspectives on conceptual change. Amsterdam, 53-66.

HALLDÉN, O, M. SCHEJA & L. HAGLUND (2008): The contextuality of knowledge: an intentional approach to meaning, making and conceptual change. In: S. VOSNIADOU (HG.): International handbook of research on conceptual change, New York, 509-532.

HALLEY, E. (1686): An historical account of the trade einds, and monsoons, observable in the seas between and near the tropicks, with an attempt to assign the phisical cause of the said winds. In: Philosphical Transactions of the Royal Society, 16,153-168 - gekürzt in: G. HELLMANN: Neudrucke von Schriften und Karten über die Meteorologie, Bd. 6, 1896, 13.

HAMEL, J. (<sup>2</sup>2002): Die Astronomischen Forschungen in Kassel unter Wilhelm IV. Mit einer wissenschaftlichen Teiledition der Übersetzung des Hauptwerkes von Copernikus 1586. Frankfurt am Main.

HARRISON, A. ET AL. (1999): Investigating a grade 11 students' evolving conceptions of heat and temperature. In: Journal of research in science teaching, 36(1), 55-87.

HELFFERICH, C. (<sup>4</sup>2011): Die Qualität qualitativer Daten. Manual für die Durchführung qualitativer Interviews. Wiesbaden.

HELLMANN, H. (2000): Zoff im Elfenbeinturm. Große Wissenschaftsdispute. Weinheim.

HEMMER, I. & M. HEMMER (2010A): Interesse von Schülerinnen und Schülern an einzelnen Themen, Regionen und Arbeitsweisen des Geographieunterrichts – ein Vergleich zweier empirischer Studien aus den Jahren 1995 und 2005. In: I. HEMMER & M. HEMMER (HG.): Schülerinteresse an Themen,

Regionen und Arbeitsweisen des Geographieunterrichts. Ergebnisse der empirischen Forschung und deren Konsequenzen für die Unterrichtspraxis. Eichstätt, 65-148.

HEMMER, I. & M. HEMMER (2010b): Perspektiven für die geographiedidaktische Interessenforschung. In: I. HEMMER & M. HEMMER (HG.): Schülerinteresse an Themen, Regionen und Arbeitsweisen des Geographieunterrichts. Ergebnisse der empirischen Forschung und deren Konsequenzen für die Unterrichtspraxis. Eichstätt, 239-248.

HEMMER, I. & M. HEMMER (2010c): Wie kann man Schülerinteressen im Geographieunterricht berücksichtigen? Empfehlungen für die Lehrplanarbeit und den Unterrichtsalltag. In: I. HEMMER & M. HEMMER (HG.): Schülerinteresse an Themen, Regionen und Arbeitsweisen des Geographieunterrichts. Ergebnisse der empirischen Forschung und deren Konsequenzen für die Unterrichtspraxis. Eichstätt, 273-282.

HODSON, D. & J. HODSON (1998): From constructivism to social constructivism: a vygotskian perspective on teaching and learning science. In: School science review, 79, 33-41.

HOPF, C. (2012): Qualitative Interviews. In: U. Flick et al. (Hg.): Qualitative Forschung. Ein Handbuch. Reinbek, 349-359.

HSU, Y., H. WU & F. HWANG (2008): Fostering high school students' conceptual understandings about seasons. In: Research in science education, 38(2), 127-148.

HUMBOLDT, A. (1845/2004): Kosmos. Entwurf einer physischen Weltbeschreibung. Erster Band. Frankfurt am Main.

HURRELMANN, K. (2006): Einführung in die Sozialisationstheorie. Weinheim.

JOHNSON, M. (1987): The body in the mind. The bodily basis of meaning, grammar, evolution. Oxford.

JUNG, W. (1993): Hilft die Entwicklungspsychologie dem Physikdidaktiker? In: R. DUIT & W. GRÄBER (HG.): Kognitive Entwicklung und naturwissenschaftlicher Unterricht, 86-107.

KARIOTOGLOU, P., A. SPYRTOU & V. TSELFES (2009): How student teachers understand distance force interactions in different contexts. In: International journal of science and mathematics education, 23(7), 851-873.

KATTMANN, U., R. DUIT, H. GROPENIEßER & M. KOMOREK (1997): Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion – Ein Rahmen für naturwissenschaftsdidaktische Forschung und Entwicklung. In: Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften, 3(3), 3-18.

KATTMANN, U. (2007): Didaktische Rekonstruktion – eine praktische Theorie. In: D. KRÜGER & H. VOGT (Hg.): Theorien in der biologiedidaktischen Forschung. Berlin, 93-104.

KLAFFKI, W. (1996): Neue Studien zur Bildungstheorie und Didaktik. Zeitgemäße Allgemeinbildung und kritisch-konstruktive Didaktik. Weinheim.

KLATETZKI (2008): Sozialisation in Gruppen und Organisationen. In: HURRELMANN, K. ET AL. (HG.): Handbuch Sozialisationsforschung. Weinheim, 351-371.

KLUGE, F. (1999): Etymologisches Wörterbuch der deutschen Sprache. Berlin.

KOMOREK, M. & R. DUIT (2004): The teaching experiment as a powerful method to develop and evaluate teaching and learning sequences in the domain of non-linear systems. In: International Journal of science education, 26(5), 619-633.

KÖRBER, H. (1987): Vom Wetterglauben zur Wetterforschung. Leipzig.

KOVECSSES, Z. (1986): Metaphors of anger, pride, and love. Amsterdam.

KRAFFT, F. (1999a): Archimedes. In: F. KRAFFT (HG.): Vorstoß ins Unerkannte. Lexikon großer Naturwissenschaftler. Weinheim, 20-22.

KRAFFT, F. (1999b): Edmond Halley. In: F. KRAFFT (HG.): Vorstoß ins Unerkannte. Lexikon großer Naturwissenschaftler. Weinheim, 191-193.

KRAFFT, F. (1999c): Galileo Galilei. In: F. KRAFFT (HG.): Vorstoß ins Unerkannte. Lexikon großer Naturwissenschaftler. Weinheim, 162-165.

KRAFFT, F. (1999d): Klaudios Ptolemaios. In: F. KRAFFT (HG.): Vorstoß ins Unerkannte. Lexikon großer Naturwissenschaftler. Weinheim, 348-351.

KRAFFT, F. (1999e): Rudolf Clausius. In: F. KRAFFT (HG.): Vorstoß ins Unerkannte. Lexikon großer Naturwissenschaftler. Weinheim, 98f.

KRAPP, A. (2010): Die Bedeutung von Interessen für die Lernmotivation und das schulische Lernen. Eine Einführung. In: I. HEMMER & M. HEMMER (HG.): Schülerinteresse an Themen, Regionen und Arbeitsweisen des Geographieunterrichts. Ergebnisse der empirischen Forschung und deren Konsequenzen für die Unterrichtspraxis. Eichstätt, 9-26.

KRÜGER, D. (2007): Die Conceptual-change-Theorie. In: D. KRÜGER & H. VOGT (HG.): Theorien in der biologiedidaktischen Forschung. Berlin, 81-92.

KUHN, T. (1962): The structure of scientific revolutions. Chicago.

LAKOFF, G. (1987): Women, fire and dangerous things. What categories reveal about the mind. Chicago.

LAKOFF, G. & M. JOHNSON (2008): Leben in Metaphern. Heidelberg.

LANGE, D. (2007): Politikdidaktische Rekonstruktion. In: V. Reinhardt (Hg.): Forschung und Bildungsbedingungen, Baltmannsweiler, 58-64.

- LEACH, J. & P. SCOTT (2002): Designing and evaluating science teaching sequences: an approach drawing upon the concept of learning demand and social constructivist perspective on learning. In: *Studies in science education*, 38, 115-142.
- LETHMATE, J. (2006): Experimentelle Lehrformen und Scientific Literacy. In: *Praxis Geographie*, 36(11), 4-11.
- LETHMATE, J. (2007): Didaktische Rekonstruktion als Forschungsrahmen der Geographiedidaktik. In: *Geographische Rundschau*, 59(7/8), 54-59.
- LOVERUDE, M., C. KAUTZ & P. HERON (2002): Student understanding of the first law of thermodynamics: relating work to the adiabatic compression of an ideal gas. In: *American journal of physics*, 70(2), 137-148.
- LÜKENGA, W. (1990): *Wetter und Klima*. Köln.
- LUKESCH, H. (2008): Sozialisation durch Massenmedien. In: HURRELMANN, K., M. GRUNDMANN & S. WALPER (HG.): *Handbuch Sozialisationsforschung*. Weinheim, 384-397.
- MAYRING, P. (2008): *Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken*. Weinheim.
- MERKENS, H. (2012): Auswahlverfahren, Sampling, Fallkonstruktionen. In: U. FLICK, E. KARDORFF & I. STEINKE (HG.): *Qualitative Forschung. Ein Handbuch*. Reinbek, 286-298.
- MIETZEL, G. (2007): *Pädagogische Psychologie des Lernens und Lehrens*. Göttingen.
- MINISTERIUM FÜR BILDUNG, WISSENSCHAFT, JUGEND UND KULTUR RHEINLAND-PFALZ (MBWJK) (HG.) (2010): *Rahmenlehrplan Naturwissenschaften für die weiterführenden Schulen in Rheinland-Pfalz. Klassenstufen 5 und 6*. Mainz.
- MINISTERIUM FÜR BILDUNG, WISSENSCHAFT, JUGEND UND KULTUR RHEINLAND-PFALZ (MBWJK) (HG.) (2011): *Lehrplananpassung. Gesellschaftliches Aufgabenfeld. Jahrgangsstufen 11 bis 13 der gymnasialen Oberstufe*. Mainz.
- MINISTERIUM FÜR BILDUNG, WISSENSCHAFT UND WEITERBILDUNG RHEINLAND-PFALZ (MBWW) (HG.) (1998a): *Lehrpläne Lernbereich Gesellschaftswissenschaften. Erdkunde, Geschichte, Sozialkunde. Hauptschule, Realschule, Gymnasium, Regionale Schule, Klassen 7-9/10*. Mainz.
- MINISTERIUM FÜR BILDUNG, WISSENSCHAFT UND WEITERBILDUNG RHEINLAND-PFALZ (MBWW) (HG.) (1998b): *Lehrpläne Lernbereich Naturwissenschaften. Biologie, Physik, Chemie. Hauptschule, Realschule, Gymnasium, Regionale Schule, Orientierungsstufe und Klassen 7-9/10*. Mainz.
- NIEBERT, K. (2010): *Den Klimawandel verstehen. Eine didaktische Rekonstruktion der globalen Erwärmung*. Oldenburg.
- 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(5), 849-877.

- OBERMANN, H.(1999):Wetter - ein zentrales Thema im Unterricht. In: Praxis Geographie 29 (4), 4.
- OSSIMITZ, G. (2000): Entwicklung systemischen Denkens. Theoretische Konzepte und empirische Untersuchungen. Wien.
- OTTO, K. (2009): Experimentieren als Arbeitsweise im Geographieunterricht. In: Geographie und Schule, 31(180), 4-14.
- OTTO, K. & S. SCHULER (2012): Pädagogisch-psychologische Ansätze. In: J. HAVERSATH (HG.): Geographiedidaktik. Braunschweig, 133-164.
- PAIK, S., B. CHO & Y. Go (2007): Korean 4- to 11 year-old student conceptions of heat and temperature. In: Journal of research in science teaching, 44(2), 284-302.
- PAULUS, R. (1995): Zur Entwicklung der Meteorologie zu einer physikalischen Wissenschaft bis zum Beginn des 20.Jahrhunderts. In: Meteorologische Zeitschrift, 4, 129-131.
- PERABO, M. (2000): Das Land-Seewind-System, ein Modellexperiment. In: Praxis Geographie, 30(9), 30.
- PERSSON, A. (2005): The Coriolis Effect: Four centuries of conflict between common sense and mathematics. In: History of meteorology, 2, 1-24.
- PERSSON, A. (2006): Hadley's principle: Understanding and misunderstanding the trade winds. In: History of meteorology, 3, 17-42.
- PLÖGER, W. (2003): Grundkurs Wissenschaftstheorie für Pädagogen. Paderborn.
- POPPER, K. (1979): The bucket and the searchlight: Two theories of knowledge. In: K. POPPER (HG.): Objektive knowledge. An evolutionary approach. Oxford, 341-362.
- POSNER, G., K. STRIKE, P. HEWSON & W. GERTZOG (1982): Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. In: Science Education 66(2), 211-227.
- REA-RAMIREZ, M. & M. NÚÑEZ-OVIEDO (2008): Role of discrepant questioning leading to model element modification. In: J. CLEMENT & M. REA-RAMIREZ (HG.): Model based learning and instruction in science, VI.2. New York, 195-213.
- REINFRIED, S. (2006a): Alltagsvorstellungen und wie man sie verändern kann. Das Beispiel Grundwasser. In: Geographie heute, 27(243), 38-43.
- REINFRIED, S. (2006b): Interessen, Vorwissen, Fähigkeiten und Einstellungen von Schülerinnen und Schülern berücksichtigen. In: H. HAUBRICH (HG.): Geographie unterrichten lernen. München, 49-78.

- REINFRIED, S. (2007): Alltagsvorstellungen und Lernen im Fach Geographie. Zur Bedeutung der konstruktivistischen Lehr-Lern-Theorie am Beispiel des Conceptual Change. In: Geographie und Schule, 29(168), 19-28.
- REINFRIED, S. (2008): Schülervorstellungen und Lernen von Geographie. In: Geographie heute, 30(265), 8-13.
- REINFRIED, S. (2010): Lernen als Vorstellungsänderung: Aspekte der Vorstellungsforschung mit Bezügen zur Geographiedidaktik. In: S. REINFRIED (HG.): Schülervorstellungen und geographisches Lernen. Berlin, 1-32.
- REINFRIED, S., U. AESCHBACHER, E. HUBER & B. ROTTERMANN. (2010): Den Treibhauseffekt zeigen und erklären. In: S. REINFRIED (HG.): Schülervorstellungen und geographisches Lernen. Berlin, 123-156.
- REINMANN-ROTHMEIER, G. & H. MANDL (2001): Unterrichten und Lernumgebungen gestalten. In: KRAPP, A. & B. WEIDEMANN (HG.): Pädagogische Psychologie, Weinheim, 601-646.
- REMPFLER, A. (2007): Moderater Konstruktivismus im Geographieunterricht. In: Geographie und Schule, 29(168), 29-35.
- REMPFLER, A. (2009): Systemkompetenz: Forschungsstand und Forschungsfragen. In: Geographie und ihre Didaktik, 37(2), 58-79.
- REMPFLER, A. & R. UPHUES (2011A): Für ein adäquates Verständnis von Geosystemen. In: Geographie und Schule, 33(189), 4-10.
- REMPFLER, A. & R. UPHUES (2011B): Systemkompetenz und ihre Förderung im Geographieunterricht. In: Geographie und Schule, 33(189), 22-33.
- REMPFLER, A. & R. UPHUES (2011C): Systemkompetenz im Geographieunterricht – die Entwicklung eines Kompetenzmodells. In: C.MEYER ET AL. (HG.): Geographische Bildung. Kompetenzen in didaktischer Forschung und Schulpraxis. Braunschweig, 36-48.
- REUTLINGER, C. (2008): Sozialisation in räumlichen Umwelten. In: HURRELMANN, K. ET AL. (HG.): Handbuch Sozialisationsforschung. Weinheim, 333-350.
- RHODE-JÜCHTERN, T. (2009): Eckpunkte einer modernen Geographiedidaktik. Hintergrundbegriffe und Denkfiguren. Seelze.
- RICKHEIT, G., S. WEISS & H. EIKMEYER (2010): Kognitive Linguistik. Theorien, Modelle, Methoden. Tübingen.
- RIEMEIER, T. (2007): Moderater Konstruktivismus. In: D. KRÜGER & H. VOGT (HG.): Theorien in der biologiedidaktischen Forschung. Berlin, 69-79.
- ROLLNICK, M. & M. RUTHERFORD (1993): The use of a conceptual change model and mixed language strategy for remediating misconceptions on air pressure. In: International journal of science education, 15(4), 363-381.

- ROSCH, E. (1978): Principles of categorization. In: ROSCH, E. & B. LLOYD (HG.): Cognition and categorization. Hillsdale, 27-48.
- ROTH, W., K. LUCAS & C. McROBBIE (2001): Students' talk about rotational motion within and across contexts and implications for future learning. In: International journal of science education, 23(2), 151-180.
- SCHINDLER, J. (2005): Syndromansatz - ein praktisches Instrument für die Geographiedidaktik. Münster.
- SCHMEINCK, D. (2008): Mäander, Delta, Durchbruchstal. Alltagskonzepte von Schülern zu Fließgewässern. In: Geographie heute, 29(265), 20-23.
- SCHMIDT, C. (2012): Analyse von Leitfadeninterviews. In: U. FLICK ET AL. (HG.): Qualitative Forschung. Ein Handbuch. Reinbek, 447-455.
- SCHMIDTKE, K.-D. (1995): Fünf-Minuten-Experimente für den Geographieunterricht. Köln.
- SCHMIDT-WULFFEN, W. (2010): Das Interesse von Schülerinnen und Schülern an Afrika und Entwicklungsländern. In: I. HEMMER & M. HEMMER (HG.): Schülerinteresse an Themen, Regionen und Arbeitsweisen des Geographieunterrichts. Ergebnisse der empirischen Forschung und deren Konsequenzen für die Unterrichtspraxis. Eichstätt, 209-222.
- SCHMITT, R. (2005): Systematic metaphor analysis as a method of qualitative research. In: The qualitative report, 10 (2), 358-394.
- SCHNEIDER-CARIUS, K. (1955): Wetterkunde, Wetterforschung. Geschichte ihrer Probleme und Erkenntnisse in Dokumenten aus drei Jahrtausenden. München.
- SCHNOTZ, W. (2001): Conceptual change. In: ROST, H.D. (HG.): Handwörterbuch Pädagogische Psychologie. Weinheim, 75-80.
- SCHÜLEIN, J. & REITZE (2012): Wissenschaftstheorie für Einsteiger. Stuttgart.
- SCHULER, S. (2010): Wie entstehen Schülervorstellungen? – Erklärungsansätze und didaktische Konsequenzen am Beispiel des globalen Klimawandels. In: S. REINFRIED (HG.): Schülervorstellungen und geographisches Lernen. Aktuelle Conceptual-Change-Forschung und Stand der theoretischen Diskussion. Berlin, 157-188.
- SCHULER, S. (2011): Alltagstheorien zu den Ursachen und Folgen des globalen Klimawandels. Erhebung und Analyse von Schülervorstellungen aus geographiedidaktischer Perspektive. Bochum.
- SCRIBA, D. (1999): Newton. In: FRITZ KRAFFT (HG.): Vorstoß ins Unerkannte. Lexikon großer Naturwissenschaftler. Weinheim, 312f.
- SHAPIN, S. (1998): Die wissenschaftliche Revolution. Frankfurt am Main.
- SOMMER, C. (2005): Untersuchung der Systemkompetenz von Grundschulern im Bereich Biologie. Kiel.

SPÄNKUCH, D. (2002): Zur Entwicklung der Meteorologie in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts. In: Sitzungsberichte der Leipziger-Sozietät, 52(1), 11-62.

STARK, R. (2003): Conceptual change: kognitiv oder situiert? In: Zeitschrift für Pädagogische Psychologie, 17(2), 133-144.

STEINKE, I. (2012): Gütekriterien qualitativer Forschung. In: U. FLICK ET AL. (HG.): Qualitative Forschung. Ein Handbuch. Reinbek, 319-331.

STOBER, M. (2012): Rahmenkriterien für die didaktische Umsetzbarkeit von Modellen und Modell-Experimenten im Geographieunterricht. München.

STRAHLER, A. & A. STRAHLER (2009): Physische Geographie. Stuttgart.

THEIBEN, U. (2003): Experimente zum Thema Luft. In: Geographie heute, 24(208), 8-13.

TREAGUST, D., A. CHANDRASEGARAN, J. CROWLEY, & B. YUNG (2010): Evaluating students' understanding of kinetic particle theory concepts relating to the states of matter, changes of state and diffusion: a cross-national study. In: International journal of science and mathematics education, 24(8), 141-164.

TSAI, C.-C. & J.-Y. CHANG (2005): Lasting effects of instruction guided by the conflict map: Experimental study of learning about the cause of the seasons. In: Journal of research in science teaching, 42(10), 1089-1111.

TULODZIECKI, G., B. HERZIG & S. BLÖMEKE (2009): Gestaltung von Unterricht. Bad Heilbrunn.

TYTLER, R. (1998): Childrens' conceptions of air pressure: exploring the nature of conceptual change. In: International journal of science education, 20(8), 929-958.

VANKAN, L., G. ROHWER & S. SCHULER. (2007): Diercke Methoden. Denken lernen mit Geographie. Braunschweig.

VOSNIADOU, S. (2008): Conceptual change research: an introduction. In: S. VOSNIADOU (HG.): International handbook of research on conceptual change, New York, 13-28.

VOSNIADOU, S. (2009): Conceptual metaphor meets conceptual change: yes to embodiment, no to fragmentation. In: Human development, 52, 198-204.

VOSNIADOU, S. & W. BREWER (1992): Mental models of the earth: a study of conceptual change in childhood. In: Cognitive Psychology, 24, 535-585.

VYGOTSKY, L. (1978): Mind in society: the development of higher psychological processes. Cambridge.

WANDERSEE, J., H. JAMES; M. MINTZES, J. JOEL & J. NOVAK (1994): Research on alternative conceptions in science. In: D. GABEL (HG.): Handbook of research on science teaching and learning. New York, 177-210.

WARDENGA, U. (2002): Räume der Geographie – zu Raumbegriffen im Geographieunterricht. In: Geographie heute, 23(200), 8-10.

- WEFER, G. (HG.) (2010): Dynamische Erde – Zukunftsaufgaben der Geowissenschaften. Bremen.
- WEISCHET, W. & W. ENDLICHER (<sup>7</sup>2008): Einführung in die Allgemeine Klimatologie. Stuttgart.
- WHITE, R. & R. GUNSTONE (1992): Probing understanding. London.
- WIEDERKEHR, H. (1999a): Clerk Maxwell. In: F. KRAFFT (HG.): Vorstoß ins Unerkannte. Lexikon großer Naturwissenschaftler. Weinheim, 285-287.
- WIEDERKEHR, H. (1999b): John Dalton. In: F. KRAFFT (HG.): Vorstoß ins Unerkannte. Lexikon großer Naturwissenschaftler. Weinheim, 111-113.
- WIEDERKEHR, H. (1999c): Ludwig Boltzmann. In: F. KRAFFT (HG.): Vorstoß ins Unerkannte. Lexikon großer Naturwissenschaftler. Weinheim, 61f.
- WIEDERKEHR, H. (1999d): Robert Boyle. In: F. KRAFFT (HG.): Vorstoß ins Unerkannte. Lexikon großer Naturwissenschaftler. Weinheim, 70f.
- WIEDERKEHR, H. (1999e): Robert Hooke. In: F. KRAFFT (HG.): Vorstoß ins Unerkannte. Lexikon großer Naturwissenschaftler. Weinheim, 217-219.
- WIETZEL, G. (<sup>8</sup>2007): Pädagogische Psychologie des Lernens und Lehrens. Göttingen.
- WILDGEN, W. (2008): Kognitive Grammatik. Berlin.
- WILHELMI, V. (2012): Die experimentelle Lernform. In: Praxis Geographie, 42(7/8), 4-9.
- WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT DER BUNDESREGIERUNG GLOBALE UMWELTVERÄNDERUNGEN (WBGU) (1996): Welt im Wandel – Herausforderungen für die deutsche Wissenschaft. Berlin.

## Anhang

### Geordnete Lernaussagen

**Leitfrage: Wie stellen sich Lerner die Bedingungen vor, unter denen Luft aufsteigt?**

#### INTERVIEW 1:

**Kerstin** (3, 16, 40-42, 45, 54-57, 66-72, 107-109, 255-256):

Luft steigt unter der Bedingung auf, dass sie warm ist. Je wärmer die Luft ist, desto enger sind die Moleküle aneinander, desto größer ist ihre Dichte, desto schwerer ist sie. Kalte Luft ist leicht. **(Typ 1)**

**Frankziska** (2, 4, 40-42, 50, 54-57, 62, 66-72, 76-77, 107-109, 131):

Luft steigt unter der Bedingung auf, dass die Sonne scheint und die Luft heiß wird. Die Temperatur von Luft spielt eine Rolle, denn je wärmer die Luft ist, umso schneller steigt sie auf. Die Dichte von Luft spielt bei Aufwinden eine Rolle. Luft ist leicht, wenn sie warm ist. **(Typ 1)**

**Verena** (54-57, 66-72, 76-77, 86, 89, 107-109, 255-256):

Warme Luft steigt auf, weil sie leichter ist. Beim Abkühlen wird sie schwer und kommt wieder runter. Luft kann auch aufsteigen, wenn sie auf etwas trifft. **(Typ 1, 3)**

#### INTERVIEW 2:

**Julian** (1-7, 10, 24-30, 31-33, 35, 84-86):

Wenn Luft heißer als die umgebende Luft ist, dann steigt sie auf. Luft wird erwärmt, wenn sie sich über irgendetwas befindet, über dem sie gut Wärme aufnehmen kann, beispielsweise einem dunklen Untergrund. Die Sonnenstrahlen erwärmen dies. Ein Überdruck kommt durch die Temperaturunterschiede zustande. Luft hat ein Gewicht, eine Masse und deswegen gibt es auch den Luftdruck. Luftmoleküle, die warm sind, bewegen sich nach oben, weil sie frei sind. Und die, die kälter sind, können nach unten fallen. Warme Luft steigt auf, weil sie eine geringere Dichte hat und deswegen sozusagen vom Druck der kälteren Luft, die eine höhere Dichte hat, verdrängt wird. **(Typ 2)**

**Björn** (1-7, 24-30, 31-33, 84-86):

Wenn Luft heißer als die umgebende Luft ist, dann steigt sie auf. Beispielsweise wird beim Heißluftballon mit einem Gasbrenner die Luft erhitzt, damit dieser aufsteigt. Sonnenstrahlen verursachen einen natürlichen Aufstieg der Luft. Luft hat ein Gewicht, nämlich die Dichte der Luft. Die Luft besteht aus Sauerstoffmolekülen und verschiedenen Gasen, wobei die Moleküle so frei sind, dass sie eben viel Platz einnehmen. **(Typ 2)**

**Tim** (24-30, 35, 84-86):

Wenn Luft heißer als die umgebende Luft ist, dann steigt sie auf. Heiße Luft ist leichter als kalte, d.h. sie hat ein Gewicht. Die Luftdichte spielt eine Rolle. Wenn Moleküle verteilt und nicht so nah aneinander sind, dann können sie aufsteigen. Wenn sie näher aneinander sind, dann sinken sie. **(Typ 2)**

### **INTERVIEW 3:**

**Judith** (1-14, 69-78, 80-89, 92-100, 182):

Luft steigt auf unter der Bedingung, dass sich darunter eine dunkle Fläche befindet. Dunkle Ackerböden, die brach liegen. Dunkle Flächen heizen ja mehr auf und deswegen heizt ja auch die Luft mehr auf und deswegen kriegen Vögel über dunklen Flächen eher einen Auftrieb. *(Stimmt Katrin zu, die sagt, dass sich Sandflächen gut erwärmen.)* Luft hat auf jeden Fall ein Gewicht. Warme Luft dehnt sich aus, wodurch sie leichter wird, da sich auf der gleichen Fläche nun weniger Sauerstoffmoleküle befinden. Sie steigt auf und legt sich über die kältere. **(Typ 2)**

**Katja** (1-14, 69-78, 80-89, 92-100):

Luft steigt auf, wenn sich darunter dunkle Flächen befinden, die die Luft erwärmen. Wenn Luft sich erhitzt, dann dehnt sie sich aus. Das heißt, sie braucht mehr Fläche. Dadurch ist die warme Luft leichter als die kalte Luft und steigt nach oben. Die Luft an den Polargebieten ist zum Beispiel schwerer als am Äquator, wobei der Unterschied vielleicht minimal ist. Ich würde den Unterschied zwischen heißer und kalter Luft auch irgendwie so beschreiben wie Wasser und Öl. Öl schwimmt ja auch immer auf der Wasseroberfläche. Und das Öl ist dann in dem Fall einfach die warme Luft und das Wasser die kalte. Es hat ja auch eine unterschiedliche Dichte. **(Typ 2)**

**Katrin** (1-14, 80-89, 92-100):

Luft steigt unter der Bedingung auf, dass es darunter Flächen gibt, die sich stark erwärmen, zum Beispiel Sand- oder rotbraune Ackerflächen, über denen Aufwinde existieren, die ich beim Segelfliegen nutze. Warme Luft ist leichter als kalte Luft, sie steigt auf. *(Stimmt Katja zu, die sagt, dass dies mit der Ausdehnung zusammenhängt.)* **(Typ 1)**

### **INTERVIEW 4:**

**Sophie** (1-11, 16-19, 28-38, 65-66, 77-79):

Luft steigt auf, wenn sie warm ist. Warme Luft ist leichter als kalte Luft. Ansonsten würde es ja nicht hoch gehen. Schwere Sachen gehen ja runter. Ich glaube jetzt weniger, dass die Dichte von Luft bei Aufwinden eine Rolle spielt. Weil die Dichte von Luft ist ja immer gleich. Warum sollte sie eine geringere Dichte haben, wenn sie wärmer wird? *(Stimmt Amelie zu, dass die Luftdichte mit der Höhe abnimmt.)* Wenn du ein hohes Gebirge hochläufst, brauchst du ein Atemgerät. Eigentlich steht ja die Luft gar nicht. Es steigt ja ständig auf oder sinkt. Da ist die Dichte jetzt, glaube ich, nicht so verantwortlich, weil auf einer Höhe *(zeigt Horizontale mit Hand)* ist ja die Dichte von jeder Luft gleich. **(Typ 1)**

**Amelie** (1-11, 16-19, 27, 28-38, 65-66, 77-79):

*(Stimmt Sophie zu, die sagt, dass Luft aufsteigt, wenn sie warm ist und dass warme Luft leichter als kalte Luft ist und dass schwere Sachen runter gehen.)* Aufwind ist ja eigentlich warme Luft, die nach

oben steigt. Beim Heißluftballon ist es ja so, dass warme Luft oder eben Hitze ihn nach oben steigen lässt, weil er einfach leichter ist durch diesen großen Raum, der gefüllt wird mit warmer Luft. Hat warme Luft eine geringere Dichte? Weiß ich nicht. Vielleicht sind die Molekülchen weniger? Vielleicht kriegst du deswegen auch schlechter Luft oben, wenn du irgendwie einen Berg hochläufst. Oder wenn man ein hohes Gebirge aufsteigt, heißt es ja auch, du kriegst schlechter Luft. Vielleicht weil die Dichte der Luft eben abnimmt. *(Stimmt Sophie zu, dass die Luft ständig sinkt oder aufsteigt; die Dichte auf einer Höhe jedoch gleich ist.)* **(Typ 1)**

**Anne** (77-79):

Luft steigt unter der Bedingung auf, dass sie warm wird. **(Typ 1)**

#### **INTERVIEW 5:**

**Emma** (1-3, 27, 31-35, 38-53, 54-60):

Damit Luft aufsteigt, muss sie warm sein. Sie muss leichter als die kalte Luft sein. *(Stimmt Elena zu, dass warme Luft mehr Dichte als kühle hat.)* *(Später:)* Je größer die Dichte ist, umso schwerer ist die Luft. *(Stimmt Elena zu, dass warme Luft weniger Dichte als kalte hat, weswegen warme Luft auch hoch steigt.)* Ja das macht ja auch Sinn, weil die Teilchen sich mehr bewegen und die gehen ja auseinander. Wenn Wolken da sind, dann wird die warme Luft abgehalten, damit sie nicht in die Atmosphäre dringt, glaube ich. Wenn zum Beispiel nachts Wolken da sind, dann wird es ja am nächsten Tag morgens auch wärmer. Weil die warme Luft halt nicht weggeht. Die Wolken halten die aufsteigende Luft halt. Am nächsten Morgen, wenn der Himmel ganz klar ist, dann ist es total kalt. *(Stimmt Elena zu, dass Wasser Wärme eher speichert als Land.)* Das Land wird dann schneller kühl deswegen. Weil über Gewässern steigt die Luft ja viel schneller auf und es steigt mehr auf. **(Typ 2)**

**Elena** (1-3, 24-25, 31-35, 38-53, 54-60):

Luft steigt durch Wärme auf. Was hochsteigt, muss einfach wärmer sein als die Umgebung. Hat nicht warme Luft mehr Dichte als kühle, weil die Dichte schwerer ist? *(Später:)* Warme Luft hat weniger Dichte als kalte Luft. Deswegen steigt sie auch hoch. Über Tag steigt die warme Luft auf. *(Stimmt Emma zu, dass die Wolken verhindern, dass warme Luft aufsteigt.)* *(Stimmt Emma zu, dass von einem See viel Luft aufsteigt.)* Wasser speichert die Wärme eher als Land. Über Nacht ist das Wasser auch viel länger warm. **(Typ 2)**

**Lea** (38-53):

Warme Luft steigt hoch. **(Typ 1)**

#### **INTERVIEW 6:**

**Annika** (1-19, 55-57):

Warme Luft steigt auf, weil ihre Dichte geringer ist und sie leichter ist als irgendwas anderes. **(Typ 2)**

**Nele** (1-19):

Luft steigt auf, wenn sie warm ist. **(Typ 1)**

**Lara (1-19):**

Luft steigt auf, wenn sie warm ist. **(Typ 1)**

**INTERVIEW 7:**

**Hannah (1-18, 67-78):**

Luft steigt auf, wenn sie warm ist, durch Wärme. Durch warm und kalt entsteht der Wind. Ich glaube nur, dass Luft nach oben steigt, wenn sie warm ist und durch das Abkühlen in der Entfernung entstehen Winde (*Gestik: Kreisbewegung mit Armen*). Ja, wenn die Luft nicht warm ist, kann sie nicht aufsteigen. Wenn die Luft warm ist, steigt sie auf, weil sie leichter ist. **(Typ 1)**

**Jana (1-18, 67-78):**

Luft steigt durch Winde auf (*Gestik: Kreisbewegung mit Armen*). (*Zu Hannah:*) Ja stimmt, warme Luft steigt auf. Wenn es irgendwie so, wenn es so stürmisch ist, dann wird die Luft ja geteilt. (*In Bezug auf Hannahs Vorstellung, dass warme Luft aufsteigt und ihre, dass Luft durch Wind aufsteigt:*) Ich glaube, beides. Warme Luft steigt auf, weil sie leichter ist. **(Typ 1, 3)**

**Alina (1-18, 67-78):**

Ja, unter welchen Bedingungen steigt Luft auf? (*Stimmt Hannah zu, die sagt, dass Luft aufsteigt, wenn sie warm ist.*)(*In Bezug auf Hannahs Vorstellung, dass warme Luft aufsteigt und ihre, dass Luft durch Wind aufsteigt:*) Ich glaube auch, beides. **(Typ 1, 3)**

**INTERVIEW 8:**

**Paul (1-3, 33-38, 57):**

Heiße Luft steigt nach oben. Das heißt, die Dichte von Luft müsste, wenn sie warm wird, weil sie wieder aufsteigt, recht gering sein. Die Luft wird ja durch die Sonneneinstrahlung erwärmt, das heißt, dann wird die Dichte geringer, weil es ja dann aufsteigt, wenn es warm ist und so spielt dann die Temperatur schon eine große Rolle. **(Typ 1)**

**Stefan (1-3, 33-38):**

Ja, heiße Luft steigt nach oben. (*Stimmt Paul zu, dass die Dichte warmer Luft recht gering ist, weil sie aufsteigt.*) **(Typ 1)**

**Tobias (33-38):**

Ja, wie wir eben ja gesagt haben, wenn die Luft eine geringere Dichte hat, steigt die ja wieder auf, und darum denke ich, dass es dann so eine Rolle spielt, wie warm die Luft ist bzw. welche Dichte die Luft hat. **(Typ 1)**

**INTERVIEW 9:**

**Simon (2-7, 21-22, 27-28):**

Luft steigt dort auf, wo es warm ist. Warme Luft steigt auf, weil sie leichter ist als die kühle Luft außen rum. Dort ist dann ein Tiefdruckgebiet. Wenn zwei Luftströme aufeinander kommen, geht Luft auch hoch. **(Typ 2,3)**

**Jonas (2-7):**

*(Stimmt Simon zu, dass Luft aufsteigt, wenn sie leichter als die kühle Luft außen rum ist.) (Typ 2)*

**Fabian (--):**

*(keine Aussage)*

#### **INTERVIEW 10:**

**Jan (1-8, 38-40, 42-49):**

Warme Luft steigt auf, weil sie eine geringere Dichte hat. Die Teilchen sind weiter verteilt. *(Stimmt Bernd zu, dass auch in der Nähe von Bergen Luft aufgrund der Reliefs aufsteigen kann).* Unter Wolken steigt Luft nicht auf. **(Typ 1)**

**Bernd (1-8, 38-40, 42-49):**

Luft steigt auf, wenn ein Unterschied zwischen kalter und warmer Luft vorhanden ist. *(Stimmt Jan zu, dass wärmere Luft eine geringere Dichte hat als kältere).* Deswegen steigt sie auf. Wie bei Wasser und Eis. Auch in der Nähe von Bergen kann Luft aufgrund der Reliefs aufsteigen. *(Stimmt Jan zu, dass unter Wolken Luft nicht aufsteigt.) (Typ 2)*

**Rainer (1-8, 38-40, 42-49):**

Thermik hat etwas mit Wärme zu tun, also wie warm es ist, wie hoch der Luftdruck ist. *(Stimmt Jan zu, dass warme Luft aufsteigt.)* Damit Luft aufsteigt, müssen unterschiedliche Drücke vorhanden sein. **(Typ 1,3)**

**Leitfrage: Inwiefern stellen sich Lerner vor, dass sich die Luft beim Aufsteigen verändert?**

#### **INTERVIEW 1:**

**Kerstin (5, 9-13, 29-31, 79-82, 87, 90-96, 99-100, 120-129, 131-133, 206-228, 363-366):**

Luft wird während des Aufsteigens schwerer, da sie abkühlt um ein Grad pro hundert Meter und da sie unterwegs immer mehr Feuchtigkeit aufnimmt. Eventuell stimmt es jedoch nicht, dass Luft beim Aufsteigen schwerer wird durch Feuchtigkeitsaufnahme, da etwas Schweres nicht nach oben steigt. Wasserdampfhaltige Luft kühlt schneller ab als nichtwasserdampfhaltige. Ab einem bestimmten Maximalpunkt fängt es an zu regnen, wodurch ihre Dichte abnimmt. **(Typ 4, 5)**

**Rita (6, 9-13, 15, 17-19, 29-31, 46, 79-82, 88, 90-96, 104-105, 110, 120-129, 131-133, 180, 198, 206-228, 363-366):**

Luft wird während des Aufsteigens schwerer, da sie Flüssigkeit aufnimmt. Kälter wird sie erst ab einer bestimmten Höhe, bei der es beginnt zu regnen. Luft kühlt doch schon bei einem Meter ab, aber nur um 0,001 Grad oder so was. Die Luft kühlt also doch schon die ganze Zeit ab. Wasserdampfhaltige Luft ist heißer, steigt langsamer hoch als nicht-wasserdampfhaltige, sie kühlt jedoch nicht langsamer ab. Dass Luft oben kalt ist, erfährt man beispielsweise, wenn man in einem Flugzeug sitzt und über die Außenbordtemperaturen informiert wird. **(Typ 4,5)**

**Verena (9-13, 17-19, 29-31, 79-82, 90-100, 104-105, 120-129, 131-133, 206-228, 363-366):**

Luft wird während des Aufsteigens schwerer durch den Wasserdampf. Dadurch kommt es ab einem bestimmten Punkt zum Regen und dadurch kühlt die weiterhin aufsteigende Luft (um ein Grad pro hundert Meter) ab. Wenn trockene Luft aufsteigt, kann es nicht regnen, weil kein Wasser drin

enthalten ist. Deswegen kühlt sie langsamer ab. Eventuell stimmt es jedoch nicht, dass Luft beim Aufsteigen schwerer wird durch Feuchtigkeitsaufnahme, da etwas Schweres nicht nach oben steigt. Dass Luft oben kalt ist, erfährt man beispielsweise, wenn man sich auf einem Berg befindet. **(Typ 4,5)**

#### **INTERVIEW 2:**

**Julian** (12-17, 36-57, 58-72, 73-76, 87-89):

Luft wird während des Aufstiegens kühler, wobei sie weniger Feuchtigkeit aufnehmen kann. Auch ihre Dichte nimmt ab. Ab einer bestimmten Höhe fallen Tropfen herunter. Die Luft kann jedoch noch weiter aufsteigen. Die Luft kühlt ab, weil sie ihre Energie als Wärmestrahlung in den Weltraum abgibt. In der Höhe ist die Luftdichte geringer, da hier die Erdanziehungskraft geringer ist. Dadurch, dass in der Höhe eine geringere Luftdichte vorherrscht, kann die umgebende Luft weniger Wärmestrahlung aufnehmen. Außerdem kann durch Wärmeleitung weniger Energie übertragen werden. Daher ist es hier kälter. **(Typ 4)**

**Björn** (12-17, 36-57, 58-72, 73-76, 87-89):

Luft wird während des Aufstiegens kühler. Da Kälte Abwesenheit von Wärme ist, muss die Luft irgendwie an Energie verlieren. Oben ist keine Masse, die Wärmeenergie speichert. Allerdings gibt die aufsteigende warme Luft die Wärme an die noch kälteren Luftmassen ab. Wenn die Luft kälter ist, fällt sie wieder nach unten und wärmt sich dann wieder auf. *(Kreisbewegung mit den Händen.) (Stimmt Julian zu, dass wenn immer kalte Luft nach unten fällt und warme Luft oben bleibt, irgendwann alles warm ist. Stimmt im folgenden Julians Erklärung über Wärmeabstrahlung in den Weltraum zu.)* Die Dichte ändert sich mit der Höhe, da die die Moleküle anziehende Erdanziehungskraft geringer wird. *(Stimmt Julians Erklärung über die Rolle der Luftdichte bei der Abkühlung zu.)* **(Typ 4)**

**Tim** (36-57, 58-72, 73-76, 87-89):

Luft kühlt beim Aufsteigen ab, weil sie mit den anderen kälteren Luftmolekülen in Kontakt kommt. Aber warum ist die Luft oben kälter, eigentlich ist es ja näher an der Sonne. Wo geht die Wärme hin? Die Intensität des Temperaturverlustes ist davon abhängig, wie groß der Temperaturunterschied zwischen aufsteigender und umgebender Luft ist. Außerdem nimmt ihre Dichte ab, weil mit zunehmender Höhe mehr Platz ist und die Moleküle dann in mehrere Richtungen weggehen. *(Stimmt Julian schließlich zu, dass die abnehmende Erdanziehungskraft für die abnehmende Dichte ursächlich ist.)* **(Typ 4, 6)**

#### **INTERVIEW 3:**

**Judith** (15-21, 121-136, 141-149, 150-174):

Beim Aufsteigen wird Luft dünner. Die abnehmende Dichte kann man sich so vorstellen: Die Masse pro Volumen ist geringer. Wenn du ein Kilogramm auf einen Kubikmeter hast, ist es ja dann mehr, als wenn du plötzlich nur noch ein halbes Kilogramm hast. Luft kühlt beim Aufsteigen ab. Außerhalb eines Flugzeuges herrschen in großer Höhe sehr niedrige Temperaturen, Minusgrade. Luftdichte und Luftdruck sind nicht das gleiche. Beispielsweise haben Steine eine höhere Dichte als Wasser; sie sinken. Holz hat eine geringere Dichte und kann auf dem Wasser schwimmen. Heiße Luft steigt auf, wird von kalter Luft ummantelt, wodurch sich die Lufttemperaturen ausgleichen. **(Typ 4,6)**

**Katja** (15-21, 121-136, 141-149, 150-174, 177):

Beim Aufsteigen wird die Luft dünner, weil oben weniger Sauerstoff da ist. Auch die Dichte der Luft der Atmosphäre nimmt mit zunehmender Entfernung von der Erdoberfläche ab, weil weniger Sauerstoff enthalten ist. Bergsteiger bekommen deswegen Probleme. Die Luft kühlt beim Aufsteigen ab durch die kalte Luft, die oben ist. **(Typ 4,6)**

**Katrin** (15-21, 101-110, 115-120, 121-136, 141-149, 150-174, 183):

Aufgrund des Luftdruckes wird Luft beim Aufsteigen dünner. Die Dichte der Luft ist mit dem Druck gleichzusetzen oder man kann es irgendwie auf den Druck beziehen. Wenn man zum Beispiel mit dem Segelflugzeug höher fliegt als irgendwas, dann muss man sich ja auch so ein Gas, Sauerstoff, mitnehmen. Dass ich Sauerstoff mitnehmen muss ab einer bestimmten Höhe, hat nichts mit der Dichte zu tun. Die Luft kühlt beim Aufsteigen ab. Wenn man zum Beispiel im Winterurlaub ist, dann ist es ja auch auf dem Berg kälter als im Tal. Oder wenn man fliegt mit dem Flugzeug, dann ist es ja auch oben kälter als unten. Dort herrschen definitiv tiefe Minusgrade. **(Typ 4,6)**

#### **INTERVIEW 4:**

**Amelie** (39-55, 56-64, 80-81):

*(Stimmt Sophie zu, dass Luft beim Aufsteigen abkühlt, weil sie sich von der Erde und der Erdwärme entfernt.)* Erde erwärmt sich durch die Sonne, da sie eine größere Fläche hat und dort größere Lichtstrahlen auftreffen können als auf die kleinen Luftmoleküle. **(Typ 4)**

**Sophie** (39-55, 56-64, 80-81):

Luft kühlt beim Aufsteigen ab, weil sie sich von der Erde und der Erdwärme entfernt. Auf einem Berg ist es auch kälter als auf dem Boden. Die Erde erwärmt sich durch die Sonne, da sie eine größere Fläche hat und dort größere Lichtstrahlen auftreffen können als auf die kleinen Luftmoleküle. Außerdem verringert sich die Dichte aufsteigender Luft. **(Typ 4,6)**

**Anne** (39-55, 56-64, 80-81):

Luft kühlt beim Aufsteigen ab und zwar um ein Grad pro 100 Meter. Wenn man in einem Flugzeug sitzt, ist es oben immer kalt. **(Typ 4)**

#### **INTERVIEW 5:**

**Lea** (13, 52-53, 61-76, 77-98):

Wärmere Luft steigt weiter hoch und oben kühlt sie sich dann wieder ab. Denn beim Aufsteigen nehmen die Teilchen der umgebenden Luft mit ihren Ärmchen die Temperatur so ab, die überflüssige Energie von den aufsteigenden Teilchen. Die umgebende Luft möchte die Energie von der aufsteigenden haben. Auf hohen Bergen ist es viel kälter, weil die Luft da oben kälter ist. Die Dichte der Luft nimmt ab, weil die Luft oben viel dünner ist. **(Typ 4, 6)**

**Emma** (52-53, 61-76, 77-98):

*(Stimmt Lea zu, dass aufsteigende Luft oben abkühlt.)* Ja und so in 8000 Metern Höhe oder so ist es ja viel kälter. *(Stimmt Elena zu, dass aufsteigende Luft Energie verbraucht.)* Wärme ist ja auch Energie. Also ich glaube, dass wenn die Luft aufsteigt, also dann ist es ja warm und dann hat sie ja weniger Dichte. Und wenn dann die Luft, die oben ist, mehr Dichte hat, dann müsste sich das ja ausgleichen, auch von der Temperatur her. *(Stimmt Lea zu, dass die Dichte der Luft abnimmt, weil die Luft oben viel dünner ist.)* **(Typ 4)**

**Elena** (61-76, 77-98):

Luft kühlt beim Aufsteigen ab, weil sie Energie verbraucht. Wenn es halt kälter wird, weil die Luft ja abkühlt, wenn sie ja nach oben steigt, setzt sie ja Energie frei und Energie wird in Wärme freigesetzt und dann wird sie kühler und dadurch wieder schwerer. Umso mehr Dichte da drin ist, desto kühler wird die aufsteigende Luft und dann wird sie ja auch schwerer. **(Typ 4,5)**

#### INTERVIEW 6:

**Lara** (24-25, 28-32, 48-57, 58-66, 71-77, 78-99):

Während des Aufsteigens kühlt Luft ab. Auf den Bergen ist es beispielsweise kälter als im Tal. Die aufsteigende Luft kühlt ab, weil die umgebende Luft oben kalt ist. Diese war schon vorher kalt. Außerdem wird die Luft dünner, wenn sie aufsteigt. Ganz oben ist sie dann am dünnsten. **(Typ 4, 6)**

**Annika** (28-32, 58-66, 71-77, 78-99):

Die aufsteigende Luft wird dünner. Da ist nicht mehr so viel Sauerstoff drin, weil der Sauerstoff vielleicht verbraucht wird. Außerdem wird sie kälter, weil die umgebende Luft oben auch kalt ist. Weil es oben generell kälter ist. Je höher man geht, desto kühler wird es. **(Typ 4, 6)**

**Nele** (58-66, 78-99):

Luft kühlt nicht beim Aufsteigen ab. Das stimmt nicht. *(Auf Laras Einwand, dass die aufsteigende Luft abkühlt:)* Ja, ganz oben ist es ja wieder ganz kalt. Wenn man auf so einem Berg ist, dann hat man auch Schwierigkeiten zu atmen. Also wird Luft dünner. *(Stimmt Lara zu, dass sie ganz oben am dünnsten ist.)* **(Typ 6)**

#### INTERVIEW 7:

**Hannah** (19-32, 33-45, 79, 101-122, 123-129):

Die aufsteigende Luft kühlt ab, weil es oben ja kälter ist. Die Luft oben ist kalt, weil sie einen geringen Wärmekoeffizienten hat. Die Wärme kommt von der Erde. Diese erwärmt dann die Luft, die aufsteigt. Das ist ja wie, wenn man warmes Wasser in kaltes Wasser schüttet, das vermischt sich dann irgendwann und wenn man es lang genug stehen lässt, wird es kalt. Außerdem ist die Luft in der Höhe dünner, weil sie weniger Sauerstoff enthält, dafür aber andere Stoffe. **(Typ 4, 6)**

**Jana** (19-32, 33-45, 101-122, 123-129):

Die aufsteigende Luft kühlt ab, weil sie während des Aufsteigens Hitze ausstrahlt und damit Energie verbraucht. *(Stimmt Hannahs Vergleich mit warmem und kaltem Wasser zu.)* Die Sonne erwärmt nicht direkt die Luft, sondern den Boden. In der Höhe ist die Luft dünner, weil dort weniger Luft hinkommt, was man beispielsweise auf einem Berg beim Atmen merkt. **(Typ 4)**

**Alina** (19-32, 33-45, 79, 101-122, 123-129):

*(Stimmt Jana und Hannah zu, dass aufsteigende Luft abkühlt. Stimmt Hannahs Vergleich mit warmem und kaltem Wasser zu.)* Die Dichte der Luft der Atmosphäre nimmt mit zunehmender Entfernung von der Erdoberfläche ab, weil oben weniger Luft als unten ist. **(Typ 4)**

#### INTERVIEW 8:

**Tobias** (11-21, 21-32, 39-46, 60-64, 211-217):

Die Luft wird nach oben immer kälter, dünner und sauerstoffarmer. Zwischen der Abkühlung und dem Dünnerwerden besteht ein Zusammenhang. **(Typ 4)**

**Paul** (11-21, 21-32, 39-46, 60-64, 211-217):

Je höher man geht, desto weniger Sauerstoff enthält ja die Luft. *(Stimmt Stefan zu, der sagt, dass die Dichte aufsteigender Luft zunimmt, da sie kälter wird.)* Die aufsteigende Luft wird durch die Luft, die oben ist und nicht so warm ist, abgekühlt. **(Typ 4)**

**Stefan** (11-21, 21-32, 39-46, 60-64, 211-217):

*(In Bezug auf Pauls Bemerkung, dass die Luft mit zunehmender Höhe weniger Sauerstoff enthält:)* Vielleicht macht Sauerstoff das Blut auch wärmer oder so, also wenn es denn auch so wäre. Ja, es ist

doch so, wenn dann weniger Sauerstoff drin ist und es kälter wird, könnte man ja daraus schließen, dass Sauerstoff die Luft warm macht. Weil der Sauerstoff dann nicht mehr in der Luft vorhanden ist, wird es kälter. "Die Dichte der Luft der Atmosphäre nimmt mit zunehmender Entfernung von der Erdoberfläche ab." Ja das widerspricht ja unserem Vorhin, weil wir haben gesagt, die Luft, wenn sie wärmer ist, ist die Dichte geringer und wenn sie dann aufsteigt, wird sie kälter und dann haben wir gesagt, wird die Dichte dann schwerer. Aber wenn sie dann noch weiter hoch geht, die Luft, dann müsste sie prinzipiell noch kälter werden. Die müsste dann wieder zunehmen, die Dichte. **(Typ 4, 5)**

#### **INTERVIEW 9:**

**Simon** (8, 11-20, 23-26, 33-44, 68-78):

Aufsteigende Luft kühlt ab, weil das Umfeld, also das was außen rum ist um die Luft, kühler ist, das sich das deswegen abkühlt. Dass es einfach die Energie abgibt. Luft ist ja ein Gas. Um überhaupt im gasförmigen Zustand zu sein, braucht es ja Energie, das heißt, es muss sich ja bewegen. Ja also näher an der Erde sind eben mehr Teilchen und weiter weg von der Erde sind weniger Teilchen. Wenn jetzt in der Luft weniger Teilchen sind, gibt es weniger Zusammenstöße, das heißt, weniger Energie geht verloren und je mehr halt hier sind, desto mehr Zusammenstöße gibt es und desto mehr Energie würde verloren gehen. **(Typ 4)**

**Fabian** (11-20, 23-26, 33-44):

Aufsteigende Luft kühlt ab. **(Typ 4)**

**Jonas** (11-20, 33-44):

Ganz oben kühlt sich die aufsteigende Luft ab. **(Typ 4)**

#### **INTERVIEW 10:**

**Bernd** (9-11, 50-51, 56-112):

Luft kühlt beim Aufsteigen ab. Die Luft in der Nähe der Erdoberfläche erwärmt sich durch das Gewicht, das auf ihr lastet. Die Luft wird gestaucht und hat eine hohe Dichte und einen hohen Druck. Je höher der Druck ist, umso wärmer ist die Luft. Sie erwärmt sich auch durch die Sonnenstrahlen, die auf die Erdoberfläche treffen. Je höher die Luft aufsteigt, desto weniger Gewicht lastet auf ihr und umso weniger Druck hat sie und umso kälter wird sie. **(Typ 4)**

**Rainer** (56-112):

Luft kühlt beim Aufsteigen ab, da sie sich vom Erdkern und der Erdwärme entfernt. **(Typ 4)**

**Jan** (56-112):

Na gut, aber wir haben ja gesagt, warme Luft hat eine geringere Dichte und oben ist sie ja wieder abgekühlt. Also die kühlt ja immer ab. Also nimmt die Dichte zu. **(Typ 4, 5)**

**Leitfrage: Welche Vorstellungen haben Lerner darüber, wie weit Luft aufsteigt?**

#### **INTERVIEW 1:**

**Rita**(6, 84, 134-142, 144-147, 198, 228, 237-238, 322):

Luft steigt solange auf, bis sie über einen Berg hinweg ist, bis es regnet, also bis zu den Wolken oder bis sie nicht mehr abkühlen kann. **(Typ 8, 9)**

**Kerstin** (134-142, 144-147, 237-238):

Luft steigt ab einem bestimmten Zeitpunkt nicht weiter auf. Schwere Luft steigt nicht auf. Vielleicht steigt Luft bis zu den Wolken auf. Luft in der Nähe des Äquators steigt auf, bis sie kondensiert und es anfängt zu regnen. **(Typ 8)**

**Verena** (134-142):

Luft steigt auf, bis sie auf den Berg hoch ist oder bis sie abkühlt, da sie dann ja wieder fällt. **(Typ 9)**

#### **INTERVIEW 2:**

**Björn** (18-23, 47-49, 90-93):

Luft steigt bis zu einem Kondensationsniveau auf. *(Nach Julians Einwand:)* Luft steigt solange auf, bis sie abkühlt und wieder sinkt. **(Typ 7, 8)**

**Julian** (18-23, 47-49, 90-93):

Luft steigt soweit auf, bis sie kühler ist als die Luft, die von unten nachströmt und absinkt. **(Typ 7)**

**Tim** (35, 90-93):

Luft steigt solange auf, wie der Wind andauert oder wie ihre Dichte gering ist, d.h. die Moleküle nicht nahe beieinander, sondern weit verteilt sind. **(Typ 7)**

#### **INTERVIEW 3:**

**Judith** (22-68, 184-190):

Luft steigt vielleicht 1500 oder 2000 Kilometer hoch auf? Da gibt es praktisch Luftschalen, die sich um die Erde legen und man teilt sie in Schichten ein, aber im Grunde sind das Übergänge. Es gibt ja verschiedene Luftschichten und je weiter man davon wegkommt, desto eher entweicht ja Luft auch in den Weltraum. Die Ozonschicht sorgt jedoch dafür, dass die Luft drin bleibt. Aber wenn die Löcher hat. Ich denke, die Dauer des Aufstiegs hängt auch mit der Luftdichte zusammen. Manche Gase aus der Luft, die so eine ganz geringe Dichte haben, die entfliehen einfach aus den Schichten, aus den Schalen. Zum Beispiel Wasserstoff. Also, dass die einfach nicht gehalten werden können von der Erde. Im Grunde gibt es ja schon irgendwo eine Schranke, also nicht eine feste Grenze, sondern irgendwo eine Schranke zwischen der Kraft, die im Weltraum herrscht und der, die auf unserer Erde herrscht. Und irgendwann, wenn die zu weit weg sind, diese leichten Moleküle, von der Erde, dann kann die Erde die nicht mehr halten und die entfliehen in den Weltraum. Und deswegen hat man ja nur so einen geringen Anteil im Grunde an diesen Gasen in der Luft. **(Typ 9)**

**Katja** (22-68):

Wie weit steigt Luft auf? Ich würde sagen, bis zu einer Schicht, die wie ein Schutzmantel ist. Ich denke einfach, diese Schutzschicht, die besteht komplett nur aus Druck, also aus Druck von außen und von innen und dazwischen entsteht dann irgendwie was und das dient dann einfach als Schutz. Ich meine Steine oder so was aus dem Weltall kommen ja auch nicht so einfach hier her. Diese Schicht befindet sich in mehreren 1000 Kilometern Höhe. Die Schutzschicht sorgt dafür, dass die Luft nicht in den Weltraum entweicht. Vielleicht hängt es auch mit der Erdanziehungskraft zusammen. Außerhalb von der Erde und ihrer äußeren Schicht gibt es keine Schwerkraft. **(Typ 9)**

**Katrin** (22-68, 184-190):

Die Luft steigt mit zunehmender Höhe langsamer auf. Es gibt verschiedene Schichten in großer Höhe. Ich denke nicht, dass Luft im Weltall noch aufsteigt. Im Weltall gibt es keine Luft mehr. **(Typ 9)**

#### INTERVIEW 4:

**Sophie** (1-11, 82-85):

Luft steigt auf, bis sie zu kalt ist. Bis sie so kalt ist, dass Wasser zu Nebel, Dunst und dann zu Wassertröpfchen wird und dann als Wassertropfen wieder runter kommt. **(Typ 7, 8)**

**Amelie** (1-11, 82-85):

Luft steigt auf, bis sie abgekühlt ist. *(Stimmt Sophie zu, die sagt, dass die Luft aufsteigt, bis sie so kalt ist, dass Wasser zu Nebel, Dunst und dann Wassertröpfchen wird und als Wassertropfen wieder runter kommt.)* **(Typ 7, 8)**

**Anne** (--):

*(keine Aussage)*

#### INTERVIEW 5:

**Elena** (77-98):

Luft steigt bis kurz vor der Atmosphäre oder nein, bis sie abgekühlt ist. Sie ist dann schwerer und hat mehr Dichte. Sie sinkt wieder über Nacht. **(Typ 7, 9)**

**Emma** (77-98):

Luft steigt, bis sie genauso kalt wie die umgebende Luft ist. Dann sinkt sie wieder. Wenn Wolken da sind, dann wird die warme Luft abgehalten, damit sie nicht in die Atmosphäre dringt, glaube ich. Wenn zum Beispiel nachts Wolken da sind, dann wird es ja am nächsten Tag morgens auch wärmer. Weil die warme Luft halt nicht weggeht. Die Wolken halten die aufsteigende Luft halt. Am nächsten Morgen, wenn der Himmel ganz klar ist, dann ist es total kalt. **(Typ 7, 8)**

**Lea** (77-98):

Luft steigt auf, bis sie abgekühlt ist. **(Typ 7)**

#### INTERVIEW 6:

**Lara** (20-27, 112-115):

Luft steigt bis zu den Wolken auf, also bis zum Himmel. Da bildet sich eine Wolke, dann regnet es und dann geht es wieder runter. Vielleicht steigt Luft auch bis zum Ende der Atmosphäre auf. Das ist doch so eine Hülle, so eine Schicht um die Atmosphäre. *(Gesten deuten Außenhülle an.)* **(Typ 8, 9)**

**Annika** (20-27, 112-115):

Ich würde sagen, Luft steigt bis zu den Wolken auf. **(Typ 8)**

**Nele** (--):

*(keine Aussage)*

#### INTERVIEW 7:

**Hannah** (19-32, 33-45, 79, 101-122, 123-129):

Die aufsteigende Luft kühlt ab und kommt wieder runter, weil sie schwerer wird. *(Später:)* Luft steigt bis zur Ozonschicht auf. *(Später:)* Luft steigt bis zur Atmosphäre auf, weil Luft ja überall ist. **(Typ 7, 9)**

**Jana** (19-32, 33-45, 101-122, 123-129):

Luft steigt bis zur Ozonschicht auf. *(Später:)* Luft steigt bis zur Atmosphäre auf. **(Typ 9)**

**Alina** (19-32, 33-45, 79, 101-122, 123-129):

*(Auf die Frage, wie weit Luft aufsteigt:)* Aber im Weltraum, ist da auch Luft?

**INTERVIEW 8:**

**Tobias** (11-21, 21-32, 39-46, 60-64, 211-217):

Ich denke, dass Luft nicht unendlich weit aufsteigen kann. Im Weltall hat man zum Beispiel nicht mehr so eine Atmosphäre. **(Typ 9)**

**Paul** (11-21, 21-32, 39-46, 60-64, 211-217):

Die aufsteigende Luft wird durch die Luft, die oben ist und nicht so warm ist, abgekühlt, dass die dann auch wieder so kalt ist, dass die Dichte höher ist und die dann auch wieder abfällt. **(Typ 8)**

**Stefan** (11-21, 21-32, 39-46, 60-64, 211-217):

Wie weit steigt Luft auf? Ich würde sagen, bis zu den Wolken. Vielleicht bildet sich ja dann, wenn dann die Luft kalt wird, und sich dann wieder neuer Regen bildet, dass dann ungefähr so die Grenze da oben ist, wo die Wolken sind. Weil vielleicht dann die Luft so schwer geworden ist, dass sie nicht mehr weiter aufsteigen kann. **(Typ 8)**

**INTERVIEW 9:**

**Simon** (8, 11-20, 23-26, 33-44, 68-78):

Luft steigt bis zu einem gewissen Punkt auf, der nicht unbedingt ganz genau festgelegt ist, weil es halt darauf ankommt, wo und wie viel und wie schnell die Luft aufsteigt. Atmosphären und Übergänge spielen eine Rolle. Luft steigt auf, bis sie abgekühlt ist und wieder runter kommt. **(Typ 7)**

**Fabian** (--):

*(keine Aussage)*

**Jonas** (--):

*(keine Aussage)*

**INTERVIEW 10:**

**Bernd** (9-11, 50-51, 56-112):

Luft steigt auf, bis sie kälter ist als die Luft darunter. Und dann fällt sie wieder. **(Typ 7)**

**Rainer** (56-112):

*(Stimmt Bernd zu, dass Luft solange aufsteigt, bis sie kälter ist als die Luft darunter.)* Höchstens bis zum Ende der Atmosphäre. **(Typ 9)**

**Jan** (56-112):

Luft steigt auf, bis sie abgekühlt ist. **(Typ 7)**

**Leitfrage: Inwiefern stellen sich die Lerner vor, dass sich Aufwinde in den Tropen von denen in Deutschland unterscheiden?**

**INTERVIEW 1:**

**Rita**(149, 153, 155-157, 159, 161, 164-179, 185-189, 229-236, 388-393, 404-408, 508):

Luft steigt in den Tropen höher auf, weil sie wärmer ist. In den Tropen kann sie mehr Wasserdampf enthalten als bei uns. Dort regnet es häufiger als bei uns, täglich oder viermal in der Woche.

Ursächlich für den hohen Wasserdampfgehalt der Luft ist einerseits das „Verdampfen“ von Wasser über dem Ozean durch dichte Sonnenstrahlen. Hier sind mehr Strahlen auf einer Fläche. Deswegen ist es dort heißer. Andererseits kann die Luft in den Tropen mehr Wasser enthalten, da dort mehr Wasser durch den Ozean vorhanden ist. In Deutschland regnet es seltener, weil hier nur Flüsse, Nordsee und Ostsee vorhanden sind. **(Typ 10, 11, 12, 13)**

**Kerstin** (150-152, 154, 155-157, 160, 164-179, 229-236, 388-393, 404-408, 470):

Luft steigt in den Tropen langsamer und höher auf, weil sie mehr Wasser enthält und wärmer ist. In den Tropen regnet es dauernd. Hier sind viele Wasserflächen, auf die die Sonne direkt auftrifft mit einer anderen Intensität als bei uns. An den Äquator kommt immer viel Sonne hin. Das Wasser der Ozeane wird durch die Sonneneinstrahlung kontinuierlich erhitzt. In den Tropen herrscht ein feuchtes Klima. **(Typ 10, 11, 12, 13)**

**Verena** (150-152, 164-179, 185-186, 187-189, 229-236, 388-393, 404-408):

Luft steigt am Äquator höher auf als bei uns, weil sie wärmer und leichter ist. Sie steigt höher, da sie eine viel größere Ausgangstemperatur hat als Luft bei uns. Ursächlich hierfür ist das konzentriertere Auftreffen von Sonnenstrahlen. Da in den Tropen größere Wasserflächen vorhanden sind, verdunstet mehr und die Luft kann daher auch mehr Wasser aufnehmen. Tägliche, heftige Niederschläge kommen daher, weil am Äquator viel Wasser vorhanden ist an manchen Stellen. **(Typ 10, 11, 12, 13)**

## **INTERVIEW 2:**

**Julian** (94-106, 107-118, 119-129, 130-136, 137-162, 167-176):

Die Luft am Äquator steigt extrem hoch auf, weil sie extrem warm ist. Es dauert also viel länger, bis sie abgekühlt ist. Aufwinde in den Tropen sind feuchter, es regnet dort viel, der Boden ist nasser, dort gibt es mehr Wasser, weil die Luft wärmer ist, denn dadurch kann sie mehr Feuchtigkeit aufnehmen. Der ganze Wasserdampf wird beim Aufstieg aus der Luft rausgeschwemmt. Die trockene Luft kühlt dann langsamer ab als die wasserdampfhaltige. Eventuell spielt die Erdanziehungskraft eine Rolle. Sie ist am Äquator geringer, weil die Fliehkräfte größer sind. Dadurch dass der Einstrahlungswinkel der Sonne steiler, rechtwinkliger ist, ist der Weg der Sonnenstrahlen durch die Atmosphäre geringer und damit der Energieverlust durch Kontakt mit Luftteilchen. Dadurch kommt mehr Energie auf die Erdoberfläche, die sich dadurch erwärmt und deren Wärme dann übertragen wird auf die Teilchen der Luft. Die direkte Erwärmung der Luft durch Sonnenstrahlung ist geringer, weil die aus so wenig Teilchen besteht. Je kleiner die Fläche ist, die beschienen wird, umso mehr erwärmt sich die Fläche dann. Wasserdampfhaltige würde schneller aufsteigen, wenn sie wärmer wäre als nicht-wasserdampfhaltige. Sie ist nicht unbedingt schwerer. Es kommt auf das Gewicht von Wasserdampf im Verhältnis zum Gewicht der anderen Gase der Luft an. Ich denke aber schon, dass Wasserdampf eines der schwereren von denen ist. Wobei, wenn man Wasser verdampft, geht der Wasserdampf nach oben, also ist er schon mal leichter wie die andere Luft. Also, wenn du z.B. Wasser kochst, steigt der Wasserdampf nach oben. Das heißt, er ist leichter wie die Luft, die uns umgibt. Also denke ich mal, wenn auch viel Wasserdampf in der Luft drin ist, ist die auch dann leichter insgesamt wie die Luft, die sie umgibt ohne Wasserdampf. **(Typ 10, 11, 12, 13)**

**Björn** (94-106, 107-118, 119-129, 130-136, 137-162):

Die Aufwinde in den Tropen sind wärmer und feuchter. Feuchter sind sie, weil durch die Wärme mehr Feuchtigkeit verdampft und in der Luft bleibt. Für die Wärme ist die Infrarotstrahlung zuständig, die hier intensiver ist. Die wasserdampfhaltige Luft ist schwerer. Nach dem Kondensationsniveau kühlt die nun trockene aufsteigende Luft langsamer ab. **(Typ 10, 11, 12, 13)**

**Tim** (96-106, 107-118, 119-129, 130-136):

In den Tropen regnet es mehr. Wenn dort am Regenwald, also in den Tropen, der Einstrahlungswinkel steiler ist, sodass die Erde dort mehr Sonne kriegt, dann wird es dort ja auch

wärmer. *(Stimmt Julian zu, dass warme Luft mehr Wasserdampf aufnehmen kann als kalte.)* Wenn die wasserdampfhaltige Luft schneller aufsteigt, heißt es ja nicht, dass sie länger aufsteigt, weil ich denke mal, dass die dann irgendwann aufhört aufzusteigen und dass die dann anfängt zu regnen. Und dann ist sie ja nicht mehr wasserdampfhaltig. **(Typ 10, 11, 12, 13)**

### INTERVIEW 3:

**Judith** (209, 211-212, 239-246, 247-265, 266-274, 276-298, 299-316, 317-329, 563):

Am Äquator steht die Sonne meist im Zenit, in einem ganz schrägen Winkel und deswegen ist da einfach der Abstand zur Sonne geringer, wobei sich durch die Erdrotation und die Erdachse nicht viel verändert. Und deswegen ist es da warm. Die Erde ist näher an der Sonne und das Licht muss nicht so lange wandern und Licht ist ja auch eine Form von Energie. Am Äquator heizt sich die Luft schneller auf. Die Luft kann mehr Wasserdampf enthalten als bei uns. Ja. Ich weiß nicht, wie hoch die Luftfeuchtigkeit ist. 60 Prozent, oder so, vielleicht 30? Wenn es wärmer ist, dann verdampft mehr Wasserdampf. Wasserdampfhaltige Luft ist schwerer als nicht-wasserdampfhaltige, weil doch mehr Wasser dabei ist. Steigt wasserdampfhaltige Luft schneller auf? Aber ich denke, wenn du mal morgens früh, wenn gerade die Sonne aufgeht, über eine Wiese läufst, dann ist die feucht. Klar, aber dann ist ja auch in der Luft, die am Boden liegt, klar die ist schon von sich aus wärmer, und die ist neblig. Also, Nebel bleibt ja auch unten. Und Nebel ist ja eigentlich auch so eine Emulsion. Nebel ist schwer. Nebel bleibt ja auch im Tal drin und steigt dann auf, wenn die Sonne drauf scheint, dann verdampft doch das kondensierte Wasser. Ich denke nicht, dass wasserdampfhaltige Luft schneller aufsteigt als nicht-wasserdampfhaltige. "Aufsteigende wasserdampfhaltige Luft kühlt langsamer ab als trockene." Am Äquator ist der Abstand zur Sonne geringer als zum Beispiel in unseren Gegenden und deswegen heizt sich dort die Luft sehr schnell auf und wird sehr heiß. Deswegen steigt die nach oben und kühlt dann ganz oben ab. Kühlt extrem langsam ab. Das ist ja, was ich gemeint habe. Du musst erst mal ganz weit gehen, um dann eine kalte Luft zu haben. Am Äquator ist die Luft wärmer und auch noch in den höheren Ebenen an der gleichen Stelle. Wärmer als bei uns zum Beispiel. Und deswegen braucht es auch höher zu steigen, um diese warme Luft auf ein gleiches Niveau abzukühlen, als wenn du jetzt bei uns 1000 Meter hoch gehst. Da musst du da vielleicht 2000 oder 3000 Meter hoch gehen. Ich weiß nicht, ich kann Relationen nicht ausmachen. Ich weiß es nicht. *(Zu Katja, die sagt, dass Wasser Wärme länger speichern kann und dass die Aussage daher richtig ist:)* Im Schwimmbad, am Ende vom Sommer, ist ja das Wasser nicht wärmer, als wenn du gleich am ersten Tag ins Freibad gehst. Es ist, glaube ich, vollkommen egal, wie lange das bestrahlt wird, erwärmt wird. Hauptsache es hat am Ende die gleiche Ausgangswärme. Aber wenn das wieder abgekühlt wird, geht das genauso schnell, als wenn es nur einen Tag lang auf der gleichen Temperatur gehalten wurde und dann abkühlt. Ich meine, du gehst ja dann am Ende von den gleichen Temperaturen aus. Die müssen ja dann auch gleich schnell abkühlen. Wenn es wieder vollkommen abgekühlt ist, dann braucht es wieder genauso viel Energie. **(Typ 10, 11, 12, 13)**

**Katja** (239-246, 247-265, 276-298, 299-316):

In den Tropen ist die Sonne näher an der Erde, das heißt größere Hitze. In den Tropen ist mehr Feuchtigkeitsgehalt in der Luft. Ich würde sagen, da ist irgendwie mehr Druck. Die Luft ist schwerer. Ich meine, man kann ja den Wasserdampf fast einatmen. Aber dass die wasserdampfhaltige Luft schneller aufsteigt, würde ich jetzt nicht sagen. Aufsteigende wasserdampfhaltige Luft kühlt langsamer ab als trockene, weil Wasser länger braucht, um sich aufzuwärmen, dieses jedoch die Wärme auch länger speichert, was man zum Beispiel am Schwimmbad oder bei Wasser im Kochtopf erleben kann. **(Typ 10, 11, 12, 13)**

**Katrin** (226-235, 239-246, 266-274, 299-316):

In den Tropen gibt es ziemlich viel Regenwald. Dort regnet es ziemlich oft und deswegen gibt es da ja auch die Feuchte irgendwie. Am Äquator steht die Sonne meist im Zenit. Dort ist es warm und feucht.

Ich war in Vietnam und hier kann ich meine Haare glätten und dann gehe ich raus und meine Haare bleiben glatt und wenn ich in Vietnam 5 Minuten auf der Straße rum laufe, dann sind meine Haare so, überall Locken. Also ist die Luft da irgendwie anders. Weil sie mehr Wasser enthält oder weil sie auch mehr aufnehmen kann. Aber warum? (*Zu Katja, die sagt, dass Wasser Wärme länger speichern kann:*) Vielleicht ist es ein falsches Beispiel, aber wenn man mit nassen Haaren irgendwo ist, dann kühlen die ja auch langsamer ab als wenn man sich mit trockenen Haaren da in die Sonne setzt. **(Typ 10, 12, 13)**

#### INTERVIEW 4:

**Sophie** (87-91, 92-102, 338-445):

Die Luft in der Nähe des Äquators steigt extrem hoch auf, weil sie halt extrem heiß ist. Dort ist ganz viel Sonneneinstrahlung. Sie muss extrem hoch aufsteigen, dass sie so kalt wird, dass der Wasserdampf wieder als Regen runter kommt. Die Luft sammelt sich oben zu einer Wolke, aus der es dann regnet, wenn sie zu schwer wird. Dadurch, dass sie schnell schwer wird, regnet es viel schneller wieder und auch viel mehr als bei uns. Und dann, wenn es alles wieder runter ist, dann geht es gleich weiter mit Verdunstung. (*Stimmt Amelie zu, die sagt, dass es dort einmal pro Tag um 2 Uhr regnet.*) Bei uns regnet es nicht so regelmäßig, weil es nicht so warm ist. Weil es länger dauert, bis genug Wasser verdunstet ist, dass die Wolke so schwer ist, dass sie es wieder runter lässt. (*Stimmt Amelie zu, die sagt, dass die Wolken bei uns weggetragen werden und in den Tropen nicht wegen des Kreislaufs dort.*) Und bei denen geht es so schnell, weil die Luft so heiß ist, dass alles so in einem Kreis ist. Die Aufwinde in den Tropen haben mehr Wasserdampf als bei uns, weil das Wasser, was runter regnet, ja mehr oder weniger sofort wieder verdampft und das heißt, dass dann wieder mehr Wasserdampf da ist. Und bei uns ist es ja so, dass das Wasser, was vom Regen runter fällt, nicht direkt wieder verdampft, sondern im Boden versickert oder sonst was und nicht direkt wieder in die Luft übergeht. Aber bei denen ist das so und deswegen ist da mehr Wasserdampf. Die wasserdampfhaltige Luft steigt schneller auf, weil sie wärmer ist. Sie ist wärmer und an Wasserdampf kann man sich ja auch verbrennen. Wenn du zum Beispiel Nudeln kochst und du hast einen heißen Topf und dann hältst du deine Hand drüber und dann verbrennst du dich. Das habe ich schon miterlebt. Und deswegen, dadurch dass Wasserdampf heiß ist, erhitzt er dann, denke ich mal, auch die Luft um sich rum und dadurch steigt das dann alles zusammen schneller auf. Wenn Wasser gasförmig wird, sind es ja 100 Grad und Luft kann, glaube ich, nicht so heiß werden, dass sie 100 Grad heiß ist. Klar kühlt sich der Wasserdampf, sobald er an die Luft kommt, wieder ab, aber er gibt auch eine große Menge von seinen 100 Grad an die äußere Luft ab und deswegen wird sie wärmer. Es ist unlogisch, dass aufsteigende wasserdampfhaltige Luft langsamer abkühlt als trockene. Weil ich nämlich denke, dass da wo viel Wasserdampf in der Luft ist, also in den Tropen, da regnet es auch früher als jetzt in der Sahara, wo die Luft ganz ganz trocken ist. Weil das Wasser als erstes, sagen wir mal, abkühlt und dann ist es ja auch das, was auch regnet, und deswegen denke ich, dass das (*Behauptung*) falsch ist. **(Typ 10, 11, 12, 13)**

**Amelie** (87-91, 92-102, 338-445):

(*Stimmt Sophie zu, dass Luft in Tropen wärmer ist und daher höher aufsteigt.*) Regnet es dort nicht einmal pro Tag um 2 Uhr? Und bei uns ist es ja oft so, dass wir einen Monat lang, naja selten, also einen halben Monat oder so, gar keinen Regen haben, weil es eben nicht so warm ist und bei uns wird es weggetragen und bei denen (*Tropen*) geht es so im Kreislauf immer. Bei uns geht es ja sonst wohin. Wir haben mal von dort was (*zeigt mit Hand in eine Richtung*) und dann zieht es doch vorbei. (*Stimmt Sophie zu, dass der Kreislauf in den Tropen deswegen existiert, weil es dort so heiß ist.*) (*Stimmt Sophie zu, dass wasserdampfhaltige Luft grundsätzlich wärmer ist.*) Ja, aber ist auch schwerer, oder? Wenn jetzt dieser Wasserdampf gar nicht in der Luft wäre, weißt du, was ich meine? Wenn da nur Luft wäre, also trockene, warme Luft, dann würde es wahrscheinlich noch schneller aufsteigen. (*Auf Sophies Argument, dass Wasserdampf heiß ist und die Luft erhitzt:*) Luft kann sehr heiß werden. "Aufsteigende wasserdampfhaltige Luft kühlt langsamer ab als trockene." Da die Dichte

von der Luft irgendwie geringer ist als die vom Wasser, kühlt sie auch schneller wieder ab. Das kann schon sein, weil wenn wir jetzt irgendwie im Schwimmbad oder so sind und das Wasser hat eine Temperatur von, sagen wir mal, 25 Grad. Und die Außentemperatur ist auch 25 Grad. Dann empfinden wir das Wasser trotzdem als kühler als die Außentemperatur. (*Ändert ihre Meinung schließlich aufgrund von Sophies Argument, dass sich die aufsteigende Luft in den Tropen schneller abkühlt als die aufsteigende, trockene Saharaluft.*) Wenn du diese extrem heiße Luft hast mit diesem extrem vielen Wasserdampf und die so extrem hoch aufsteigt, dann wird die, statt viel weiter weg getragen zu werden, sofort an derselben Stelle, wo sie hochgestiegen ist, kühlt die dann auch ab und das ist ja schwer, dieser Wasserdampf und deswegen regnet es wieder. **(Typ 10, 11, 12, 13)**

**Anne** (87-91, 92-102, 383-445):

In den Tropen verdunstet Wasser schneller und deswegen gibt es da ja auch immer Regenschauer. Wir haben nicht so viel Sonneneinstrahlung, weil wir nicht so nah am Äquator sind. Und die Aufwinde in den Tropen, die haben mehr Wasserdampf als bei uns jetzt, weil die Gegend dort viel schwüler ist und die Luft quasi mehr Wasser in sich hat. **(Typ 10, 11, 12, 13)**

#### **INTERVIEW 5:**

**Elena** (99-122, 123-180):

In Äquatornähe regnet es viel mehr als bei uns, es regnet täglich. Es könnte daran liegen, dass es dort ganz viele Tiefs gibt. Bei einem Tief regnet es. Oder es liegt daran, dass es dort wärmer ist und deswegen steigt auch mehr Wasserdampf hoch. Die tropische Luft kann mehr Wasserdampf enthalten, weil es mehr regnet, viel mehr regnet als bei uns. Wasserdampfhaltige Luft steigt schneller auf als nicht-wasserdampfhaltige, weil Wasserdampf halt warm ist. Die aufsteigende Luft ist nicht lange wasserdampfhaltig, weil sie sich irgendwann anpasst. Vielleicht ist sie nur bis zu den Bäumen so wasserdampfhaltig. "Aufsteigende wasserdampfhaltige Luft kühlt langsamer ab als trockene." Ich vergleiche das gerade mit dem Kochen. Wenn jetzt der Wasserdampf hoch steigt und du machst dann die Haube auf und dann tropft es ja schon gleich wieder runter. Ich finde, das kühlt ziemlich schnell ab, weil es geht ja innerhalb von ein paar Minuten, dass es wieder runter tropft. Es gibt keinen kalten Wasserdampf. Wasserdampf entsteht erst, wenn es warm ist, wenn du das Wasser kochst. **(Typ 10, 11, 12, 13)**

**Lea** (99-122):

In der Nähe des Äquators steigt viel mehr Luft auf als bei uns und sie kann mehr Wasserdampf enthalten als bei uns, weil die Sonne ja hier am Äquator viel mehr drauf scheint, weil sie viel näher ist und weil es mehr Wasserdampf gibt. Wasserdampf ist ja das, was entsteht, wenn die Sonne auf den nassen Boden scheint, dann erhitzt es sich und dann geht der ganze Wasserdampf hoch. In den Tropen ist mehr Wasser überhaupt und auch mehr Sonne, also das ist ja beides viel mehr als bei uns. Also bei uns gibt es ja weniger Wasser und weniger Sonne. (*Stimmt Emma zu, dass Wasserdampf schwer ist und damit wasserdampfhaltige Luft schwerer als nicht-wasserdampfhaltige.*) Wenn die Teilchen schwerer sind, dann brauchen sie ja auch viel länger, bis sie da hoch kommen. Aber die haben ja auch viel mehr Energie. Da die Luft viel mehr Wasserdampf enthält, dauert es zwar länger, bis sie aufgestiegen ist, aber wenn es dann mal oben ist und dann fällt es auch schnell wieder ab und dann regnet es halt. "Aufsteigende wasserdampfhaltige Luft kühlt langsamer ab als trockene." Ja, weil die Teilchen, die die Energie wegnehmen, die haben ja auch viel länger zu tun, wenn es mehr Energie gibt. **(Typ 10, 11, 12, 13)**

**Emma** (123-180):

Aus den Nachrichten weiß ich, dass die Luftfeuchtigkeit in den Tropen höher ist als bei uns. Die wasserdampfhaltige Luft steigt langsamer auf als nicht-wasserdampfhaltige, weil Wasserdampf schwer ist. Die schwereren Teilchen brauchen dann auch viel mehr Energie zum Aufsteigen. Ja, wenn die Luft schnell aufsteigen würde und dann schnell wieder runter kommen würde, dann würden sich

die ganzen Massen ja nicht ansammeln. *(Stimmt Lea zu, dass es in den Tropen wärmer ist, weil die Sonne am Äquator viel mehr drauf scheint, da sie viel näher ist und weil es mehr Wasserdampf gibt und dass der Wasserdampf dazu führt, dass die Luft schnell wieder absinkt, wenn es regnet.)* (Typ 10, 11, 12, 13)

#### INTERVIEW 6:

**Lara** (123-174):

In den Tropen ist es wärmer und die Luft ist feuchter als bei uns. Sie kann mehr Wasserdampf enthalten, weil sie eine größere Luftfeuchtigkeit hat. Aufgrund der hohen Luftfeuchtigkeit ist es schwül. Wasserdampfhaltige Luft steigt jedoch langsamer auf, weil die Luft so schwerer ist als nicht-wasserdampfhaltige. Trockene aufsteigende Luft kühlt schneller ab, weil da nicht noch der Wasserdampf weggehen muss. Weil so viel Wasserdampf in der Luft ist, kommt es zu heftigen, täglichen Niederschlägen. Wenn die aufsteigt und langsam abkühlt, bleibt der Wasserdampf in den Wolken hängen und wenn da zu viel Wasserdampf ist, dann regnet es. *(Stimmt Annika zu, dass sie so hoch aufsteigt, weil sie so warm ist.)* (Typ 11, 12, 13)

**Annika** (123-174):

In den Tropen erwärmt sich Luft schneller, weil der Einstrahlungswinkel der Sonne anders ist. Umso schneller sich Luft erwärmt, umso schneller geht sie nach oben, weil die Dichte dünner ist. Die Luft kann dort mehr Wasserdampf enthalten, weil es dort öfter regnet als bei uns, dort alles feucht ist und es näher am Äquator ist. *(Stimmt Lara zu, dass wasserdampfhaltige Luft langsamer aufsteigt, weil sie schwerer ist und dass aufsteigende wasserdampfhaltige Luft langsamer abkühlt, weil da nicht noch der Wasserdampf weggehen muss.)* Die Luft steigt extrem hoch auf, weil sie so warm ist. (Typ 10, 11, 12, 13)

**Nele** (123-174):

*(Stimmt Lara zu, dass die Luftfeuchtigkeit in den Tropen etwas mit dem Aufsteigen der Luft zu tun hat.)* Die Luftdichte aufsteigender Luft in den Tropen muss gering sein. Wenn sie größer ist, dann geht sie ja nicht hoch. *(Stimmt Lara zu, dass wasserdampfhaltige Luft langsamer aufsteigt, weil sie schwerer ist.)* (Typ 13)

#### INTERVIEW 7:

**Hannah** (136-222):

In den Tropen ist es wärmer, weil diese auf dem Äquator liegen und die Sonne hier direkt auftrifft. Im Sommer ist die Erde aufgrund ihrer elliptischen Bahn näher an der Sonne als im Winter. Die Ozonschicht und die Neigung der Erdachse spielen jedoch auch eine Rolle. Letztere da die Nordhalbkugel entweder der Sonne um 25° Grad zugeneigt oder abgeneigt ist. Dadurch dass es wärmer ist, steigt mehr Luft auf und kühlt langsamer ab. Außerdem ist die Luftfeuchtigkeit in den Tropen sehr hoch und es gewittert häufig. Die wasserdampfhaltige Luft steigt jedoch nicht schneller auf als nicht-wasserdampfhaltige, da Wasser schwerer ist. Sie kühlt außerdem langsamer ab, da die wasserdampfhaltige Luft länger zum Aufstieg braucht. *(Später jedoch stimmt sie Alina zu, die sagt, dass aufsteigende Luft weniger abkühlt, wenn sie schon trocken ist.)* (Typ 10, 11, 12, 13)

**Alina** (136-222):

In den Tropen ist es wärmer, was damit zusammenhängt, dass die Erde schief steht und der Abstand Erde-Sonne eventuell anders als bei uns ist. Dadurch dass es wärmer ist, steigt Luft auf, es entstehen mehr Wolken und es regnet mehr. Die wasserdampfhaltige Luft steigt jedoch langsamer auf als nicht-wasserdampfhaltige, da Wasser schwerer ist. Trockene aufsteigende Luft kühlt außerdem weniger ab

als feuchte, denn für mich klingt trocken so, dass es schon kühl ist und wasserdampfhaltig klingt für mich warm. **(Typ 10, 11, 12, 13)**

**Jana (136-222):**

In den Tropen ist es viel wärmer, weil es halt näher am Äquator ist. Hier scheint die Sonne direkt drauf, vom Winkel her. Jahreszeitlich verändert sich der Abstand Erde-Sonne aufgrund der Erdbahn, was den Sommer verursacht, sowie die Neigung der Erde zur Sonne. Die tropische Luft kann mehr Wasserdampf enthalten, weil es so warm ist. Die wasserdampfhaltige Luft kühlt langsamer ab als trockene, weil das Wasser so eine hohe Ausgangstemperatur hat. Die Luft in den Tropen steigt höher auf, weil sie länger braucht, bis sie abgekühlt ist. **(Typ 10, 11, 12, 13)**

#### **INTERVIEW 8:**

**Paul (65-140):**

In den Tropen ist ja stärkere Sonneneinstrahlung. Die Sonne ist näher, weil das ja am Äquator liegt. *(In Bezug auf Tobias Aussage, dass die Sonne im Sommer näher an Deutschland ist als im Winter:)* Dadurch ist stärkere Sonneneinstrahlung. Die Luft in den Tropen enthält mehr Wasser, weil durch die stärkere Sonneneinstrahlung mehr Wasser verdunstet. Dieser Wasserdampf ist heiß und steigt dadurch auf. Die wasserdampfhaltige Luft steigt schneller auf als nicht-wasserdampfhaltige, wenn es stimmt, dass Wasserdampf eben schneller erhitzt wird als nicht-wasserdampfhaltige Luft. Die trockene Luft hat eine höhere Dichte als wasserdampfhaltige. Sie kühlt langsamer ab. Wenn der Wasserdampf in den Tropen jetzt wirklich so hoch aufsteigt, wie behauptet wird, dann braucht er auch eine Zeit, um sich in der Wolke zu sammeln und er muss dann wieder abfallen in Form von Wasser, weil es ja dann kein Dampf ist. **(Typ 10, 11, 12, 13)**

**Tobias (65-140):**

Am Äquator *(zeigt auf Stefans Zeichnung)* sind die Strahlen am kürzesten. Also die Sonne ist am nächsten dran. Und je weiter weg die Sonne ist, desto kälter ist es auch und dadurch ist die Temperatur geringer. Die Sonne ist halt einfach im Sommer näher an Deutschland wie im Winter. Und dadurch sind dann die Strahlen umso intensiver. In den Tropen ist auch eine hohe Luftfeuchtigkeit, weil es dort sehr warm ist. Die wasserdampfhaltige Luft steigt schneller auf, weil die Sonne den Wasserdampf aufheizt. Weil der Wasserdampf sehr warm ist, dauert es länger, bis die aufsteigende, wasserdampfhaltige Luft abgekühlt ist. In den Tropen gibt es eine siebenstündige Sonnenzeit, in der total die Sonne scheint und sich die Regenwolken mit Wasser füllen. Darauf folgt eine dreistündige Regenzeit. **(Typ 10, 11, 12, 13)**

**Stefan (65-140):**

Der Äquator liegt näher an der Sonne als Deutschland. Die Erde kreist um die Sonne und da die ja schräg ist, die bleibt ja so, die verändert sich ja nicht von ihrer Neigung her. Und wenn sie dann auf der anderen Seite ist, sind wir, wenn das hier die Sonne ist *(Gestik: flache Hand deutet Erdachse an; Südhalbkugel unten zur Sonne geneigt)*, sind wir hier näher an der Sonne, aber wenn es so ist *(Gestik: flache Hand deutet Erdachse an; Nordhalbkugel oben zur Sonne geneigt)*, sind wir ein bisschen weiter weg von der Sonne. Ja das ist ja, sage ich jetzt mal, Sommer. Das heißt, wenn wir jetzt hier die Sonne haben oder hier, dann brauchen die Strahlen jetzt nicht so lange, bis sie hier sind, weil es ein kürzerer Weg ist, wie wenn die Erde auf der anderen Seite ist. Dadurch dass Deutschland jetzt hier auf der ganz anderen Seite liegt, verliert es auch mehr Energie, weil es weiter weg ist, würde ich sagen. Weil die Sonneneinstrahlung in den Tropen stärker ist, verdunstet Wasser schneller und es regnet mehr als bei uns. Jeden Tag fällt da 2 bis 3 Stunden Regen. Die wasserdampfhaltige Luft ist wärmer als nicht-wasserdampfhaltige und steigt deshalb schneller. Das heißt, es gibt auch mehr Aufwinde da. Trockene Luft kann jedoch schneller abkühlen als Luft, in der Wasserdampf enthalten ist. Wenn du zum Beispiel einen Kochtopf aufmachst, steigt der Wasserdampf dir sofort ins Gesicht, du hast sofort Wasser auf deinem Gesicht. Der steigt sofort hoch, der Wasserdampf. *(Später:)* Die kühlt auch

langsamer ab, die wasserdampfhaltige Luft. Dadurch steigt sie höher auf, bevor es wieder kühl genug ist, um zu fallen. Wenn jetzt viel Feuchtigkeit enthalten ist in der Luft, verdunstet auch mehr Wasser und dann bilden sich auch mehr oder schneller Regenwolken. Und wenn weniger enthalten ist, kann es ja nicht so viel Wasser entziehen aus der Luft. Der Wasserdampf bzw. die feuchte Luft bildet dann Regenwolken und die werden dann so schnell überfüllt, dass die dann so feucht ist, dass es halt zu Niederschlägen kommt. **(Typ 10, 11, 12, 13)**

#### **INTERVIEW 9:**

**Jonas** (83-97, 100-191):

In den Tropen herrscht eine hohe Luftfeuchtigkeit, weil es dort ziemlich oft regnet und die Sonne einstrahlt und viel Wasser verdampft. Wasserdampfhaltige Luft ist schwerer als normale Luft und steigt deswegen nicht schneller auf. **(Typ 12, 13)**

**Fabian** (83-97, 100-191):

In den Tropen steigt die Luft hoch auf und kühlt langsam ab, weil sie wärmer ist als die Luft woanders. Vielleicht ist es so, dass wenn die Sachen heißer sind, dass die Dichte irgendwie größer ist und dass es eben länger dauert, bis es abkühlt, weil die Dichte irgendwie noch zu hoch ist. Es ist wärmer, weil die Sonne direkt von oben scheint. Wenn die Erde näher an der Sonne steht, ist es wärmer, oder nicht? Im Sommer. Die Luft steigt auch schneller auf, weil sie wärmer ist und deswegen auch Wasserdampf enthält. Die wasserdampfhaltige Luft kühlt jedoch auch schneller ab, denn wenn man schwitzt, kühlt man ja auch schneller ab, als wenn man trockene Haut hat. In den Tropen ist es außerdem feuchter, weil der Boden feuchter ist. **(Typ 10, 11, 12, 13)**

**Simon** (83-97, 100-191):

Die Tropen liegen ja recht äquatorial. Von der Sonne kommen im selben Abstand immer dieselben Lichtstrahlen. Am Äquator treffen sie direkt auf und weiter nördlich würden auf dieselbe Fläche weniger Strahlen eintreffen. Weil die Erde auch so ein bisschen eiert, gibt es am Nordpol und Südpol an manchen Tagen gar kein Sonnenlicht. Die tropische Luft kann mehr Wasserdampf enthalten, weil sie wärmer ist. Da die wasserdampfhaltige Luft schwerer ist, kühlt sie langsamer ab. Warme Luft trägt viel Wasser mit sich, kalte Luft eher weniger. Damit es regnet, muss Luft abkühlen. Regen ist halt eine Ansammlung von Wasser, die dann runter kommt. **(Typ 10, 11, 12, 13)**

#### **INTERVIEW 10:**

**Bernd** (122-202):

In den Tropen ist es wärmer. Die Sonne scheint immer direkt auf den Äquator, auch das ganze Jahr hindurch und dadurch herrscht da durchgehend eine hohe Wärme. Gleich hohe Luftfeuchtigkeit, gleich viel Regen, viele Wolken. Tropische Luft muss irgendeinen Unterschied von der Dichte her haben, weil es mehr Wasser aufnehmen kann. Hohe Luftfeuchtigkeit könnte einen höheren Druck hervorrufen. *(Auf Rainer Bemerkung, dass höhere Dichte wärmere Luft bedeutet:)* Da ist dann mehr Luft in einem Raum, die sich sozusagen aneinander reibt. *(Zu Jan, der sagt, dass die Luftmoleküle weiter auseinander gehen, je wärmer es wird:)* Ja, deswegen brauchen sie mehr Platz und sie wollen auseinander gehen, aber wo sollen sie hin? Die Welt kann ja nicht plötzlich noch eine Beule in der Atmosphäre haben. Verstehst du? Das staut sich einfach aus einem Raum. **(Typ 10, 11, 12, 13)**

**Rainer** (122-202):

Also am Äquator steht ja die Sonne im Prinzip am höchsten. Die tropische Luft hat eine höhere Dichte. Höhere Dichte ist wärmere Luft. Ja, aber ich bin mir sicher, dass ein Hoch warme Luft ist. Also Hoch ist warm. Und Tief ist kalte Luft. Hohe Luftfeuchtigkeit könnte Wolken hervorrufen, die dann die Sonnenstrahlung reflektieren und die Erde weiter erwärmen. Aufsteigende wasserdampfhaltige Luft kühlt langsamer ab als trockene, da Wasserdampf Wolken entstehen lässt und diese die Wärme

wieder erhöhen. (*Stimmt Jan zu, der sagt, dass der Grund darin liegt, dass Wasser Wärme besser speichert.*) Die Luft in den Tropen steigt höher auf, weil sie wärmer ist. **(Typ 10, 11, 12, 13)**

**Jan** (122-202):

Tropische Luft kann mehr Wasserdampf enthalten als bei uns, weil sie eine geringere Dichte hat. Dadurch kann sie dann mehr Wasser aufnehmen. Je wärmer es wird, desto weiter gehen die Luftmoleküle doch auseinander. Je enger sie zusammen sind, desto kälter ist es ja. Das siehst du doch bei einem Feststoff und einem Gas. Ja vielleicht hat es dann mehr Platz für Wasserdampf zwischen den Molekülen. Durch das Wasser hat sie dann eine höhere Dichte. Aufgrund der hohen Luftfeuchtigkeit erwärmt sich die Luft besser. Wasser erwärmt sich besser als Luft. Dadurch steigt sie dann schneller auf. Außerdem steigt sie höher auf, weil sie langsamer abkühlt. Es sind ja nicht nur die Luftmoleküle da, sondern auch noch die Wassermoleküle, die Wärme aufnehmen können. **(Typ 10, 11, 12, 13)**

**Leitfragen: Welche Vorstellungen haben die Lerner zur Ursache horizontaler Luftbewegungen (Windentstehung)? und Welche Vorstellungen haben die Lerner dazu, was mit der aufgestiegenen Luft in den Tropen passiert?**

**INTERVIEW 1:**

**Verena** (252, 254, 260-262, 264, 296-308):

Wind entsteht dort, wo warme und kalte Luft aufeinander treffen. Wind weht auf gleichbleibender Höhe. Luft kann nicht einfach nach oben oder unten pusten. Beim Gehen durch Landau kommt dir Wind entgegen. Deine Haare wehen zur Seite, aber nicht nach oben oder unten. Ich habe im Erdkundeunterricht davon gehört, dass die sich bewegende Luft in der Höhe mit zunehmender Entfernung vom Äquator ihre Richtung ändert, weiß aber nicht mehr warum. **(Typ 14, 19)**

**Kerstin** (251, 296-308, 319-320):

Wind entsteht, wo Luft aufeinander trifft. Wind weht nicht auf gleichbleibender Höhe. Es findet eine Auf- und Abwärtsbewegung warmer und kalter Luft statt. Wenn diese aufeinander treffen, entstehen Tornados. Sich bewegende Luft ändert ihre Richtung, wenn sie auf ein anderes Druckgebiet stößt. Druckgebiete stoßen sich gegenseitig ab. Deswegen sind Druckgebiete auch auf unterschiedlicher Höhe. **(Typ 14, 17, 20)**

**Rita**(260-262, 296-308):

Windentstehung hat etwas mit Hoch und Tief zu tun, die treffen aufeinander. Wind weht auf gleichbleibender Höhe, denn beim Spazieren wehen die Haare immer nach vorne oder hinten (*in Bezug auf Verenas Argument*). Dass die sich bewegende Luft in der Höhe mit zunehmender Entfernung vom Äquator ihre Richtung ändert, hat etwas mit dem Hoch und dem Tief zu tun. Ich glaube, bei jeder Zone ändert sich die Windrichtung. **(Typ 14, 19, 20)**

**INTERVIEW 2:**

**Julian** (202-252):

Die Luft weht nach dem Aufstieg nicht als Wind auf gleichbleibender Höhe. Je nachdem, ob sie sich erwärmt oder abkühlt, steigt sie oder fällt sie. Die Luft strömt vom Hochdruck- zum Tiefdruckgebiet, wobei diese nicht auf gleicher Höhe sein müssen. Das Hochdruckgebiet kann ja auch schräg oben und das Tiefdruckgebiet schräg unten sein. Die Luft strömt oder fließt dann auch so schräg. Nach dem Aufstieg kühlt die Luft ab, wenn sie sich fort vom Äquator bewegt, weil die Sonne hier nicht mehr so steil auftrifft und es dort kühler ist. Dass sich die Richtung der bewegenden Luft in der Höhe mit zunehmender Entfernung vom Äquator ändert, hat etwas mit Fliehkräften zu tun. Dadurch, dass die

Erde rotiert, wird die Luft abgelenkt. Sie ist träge. *(Die Begriffe Trägheit und Fliehkraft werden von Björn eingebracht.)* Die Windrichtung ändert sich beispielsweise auch beim Land-See-Windsystem. Da, wo sich die Luft erwärmt und diese aufsteigt, entsteht ein Unterdruck, ein Tiefdruckgebiet. Dorthin strömt dann die Luft vom Meer bzw. Land, wobei ich mir nicht sicher bin, was sich schneller erwärmt. Aber entsteht da, wo es warm ist, nicht auch ein Hochdruck? *(Stimmt Tim zu: Land wärmt sich schnell auf und kühlt schnell ab. Und bei Wasser ist es andersrum.)* Windentstehung hat etwas mit aufsteigender Luft zu tun, denn überall dort, wo Luft aufsteigt, entsteht am Boden ein Tiefdruckgebiet und dann oben drüber ein Hochdruckgebiet in der Luft. Rechts und links davon, wo die Luft dann wieder runter fällt, entsteht in der Höhe ein Tiefdruckgebiet, weil die Luft so wieder kalt genug ist und schnell nach unten fällt. Also ist da weniger Druck. Die unten ankommende Luft sorgt für hohen Luftdruck, was wiederum die Luftströmung am Boden zum Tiefdruckgebiet verursacht. In den Tropen wird dies durch den steileren Einstrahlungswinkel der Sonne verursacht. **(Typ 15, 18, 21)**

**Björn (202-248):**

Wind entsteht durch den Unterschied zwischen Hoch- und Tiefdruck. Wind ist im Prinzip Druckausgleich. Weil die Sonne wandert, werden Luftschichten aus verschiedenen Winkeln erhitzt und dann wandern ja auch sozusagen die Hoch- und Tiefdruckgebiete. Beim Land-See-Windsystem weht der Wind tagsüber in die eine Richtung und nachts in die andere. Die sich vom Äquator wegbewegende Luft ändert ihre Richtung, weil sie träge ist und durch die Erdbewegung abgelenkt wird. Hier wirken Fliehkräfte. **(Typ 15, 21)**

**Tim (202-248):**

Der Wind weht nicht die ganze Zeit auf gleicher Höhe. Man merkt ja, dass der Wind manchmal dreht. Tornados sind beispielsweise Winde, die so im Kreis drehen. *(Stimmt Björn und Julian zu hinsichtlich ihrer Äußerungen zur Trägheit der Luft und der Erdbewegung.)* **(Typ 21)**

### **INTERVIEW 3:**

**Katja (193-197, 201, 330-348, 349-365, 372-404, 433-437):**

Wenn sich Luft schnell nach oben bewegt, ist zwischen der heißen aufsteigenden Luft und der kalten umgebenden ein bestimmter Platz, etwas ist zwischen heißer und kalter Luft. Es entsteht ein Druck, vergleichbar mit dem, der entsteht, wenn man einen Schirm auf einem Fahrrad in Fahrtrichtung hält. Die aufgestiegene Luft bleibt oben, kühlt sich ab und geht dann zur Seite, bis zum Süd- und Nordpol, was vielleicht auch mit Magnetismus und der Anziehungskraft von Nord und Süd zu tun hat. Durch die abkühlende Luft ist ständig eine Bewegung da durch die Hitze und Kälte. **(Typ 16, 19, 20)**

**Judith (213-215, 330-348, 349-365, 372-404, 433-437):**

Die aufgestiegene heiße Luft in der Höhe erzeugt einen Hochdruck, sofern sie schnell aufgestiegen ist. Sie weicht zu den Seiten aus, da sie durch Tiefdruckgebiete abgelenkt wird und diese ausgleichen möchte. Zwischen Tiefdruckluft und Hochdruckluft befindet sich ganz normaler Luftdruck. Wenn heiße auf kalte Luft trifft, findet ein großer Energieaustausch statt, was Wind erzeugt. Bei Hochdruck hast du schönes Wetter, bei Tiefdruck schlechtes. **(Typ 14, 15, 19)**

**Katrin (330-348, 349-365, 405-425):**

Die aufgestiegene Luft entweicht nach Norden und Süden. Hoher und Tiefdruck erzeugen Wind. Man sieht dies im Nachrichtenfernsehen. **(Typ 14, 19)**

#### INTERVIEW 4:

**Amelie** (103-116, 117-137, 138-145, 146-161):

Wind entsteht durch warme Luft und kalte Luft, die aufeinander treffen. Dann gibt es eben eine Verwirbelung. Es könnte so sein, dass sich warme und kalte Luft auf gleicher Höhe treffen. Ich denke nicht, dass Windentstehung etwas mit unterschiedlichem Luftdruck zu tun hat. *(Nach Annes Frage, ob warme und kalte Luft einen unterschiedlichen Druck haben:)* Es war irgendwie so, dass beim Hochdruckgebiet es irgendwie warm ist und das Tiefdruckgebiet, da ist es regnerisch und kalt. "Die sich bewegende Luft in der Höhe ändert mit zunehmender Entfernung vom Äquator ihre Richtung." Vielleicht passt es sich dann an? *(Stimmt Sophie zu, dass es mit der Erdrotation und der Erdanziehungskraft zusammenhängen könnte. Stimmt Anne zu, dass die Erdachse eine Rolle spielen könnte.)* **(Typ 14, 21)**

**Sophie** (103-116, 117-137, 138-145, 146-161):

*(Stimmt Amelie zu, dass Wind entsteht, wenn warme und kalte Luft aufeinandertreffen und dass es dann eben eine Verwirbelung gibt.)* Kalte und warme Luft treffen sich jedoch nicht auf gleicher Höhe. Windentstehung hat nichts mit unterschiedlichem Luftdruck zu tun. *(Nach Amelies Einwand, dass Hochdruckgebiete warm und Tiefdruckgebiete kalt sind:)* Windentstehung ist ja, wenn kalte und warme Luft aufeinander treffen. Und wenn kalte Luft jetzt einen tiefen Druck hat und warme Luft einen hohen Druck und wenn die dann zusammen treffen, dann entsteht ja Wind. Also hat das auch was mit dem Druck zu tun. Weil hoher und tiefer Druck aufeinander treffen. Die sich bewegende Luft in der Höhe ändert mit zunehmender Entfernung vom Äquator ihre Richtung, weil sie sich vielleicht anpasst und mit dreht oder vielleicht gegensätzlich bewegt, sofern es Nahe der Erdoberfläche ist. Und weiter oben ist es dann nicht mehr so nah an der Erde. Vielleicht hat es was mit der Erdanziehung zu tun, dass es dem Wind in der Höhe sozusagen egal ist, ob sich die Erde jetzt rechtsrum oder linksrum dreht oder wie auch immer. **(Typ 14, 21)**

**Anne** (117-137, 138-145, 146-161):

Haben die einen unterschiedlichen Druck? Warme und kalte Luft, oder ist das gleich? *(Stimmt Amelie zu, dass Hoch- und Tiefdruckgebiete etwas mit warmer und kalter Luft zu tun haben.)* Warme und kalte Luft treffen sich irgendwo und die warme Luft geht über die kalte und steigt dann hoch. "Die sich bewegende Luft in der Höhe ändert mit zunehmender Entfernung vom Äquator ihre Richtung." Ja, weil sich die Erde dreht. Es gibt doch die Nordostpassate oder so, die Winde. Ich weiß warum. Und zwar ist die Erdachse schräg. Und dann, wenn die Erde sich dreht, dann ist es ja irgendwie logisch, dass die Luft, wenn sie sich weiter dreht, dass sie dann plötzlich unter dem Äquator ist, oder nicht? Oder über dem Äquator. **(Typ 14, 20)**

#### INTERVIEW 5:

**Lea** (199-236, 237-273):

Nach dem Aufstieg der Luft kommen ja immer mehr von den Teilchen dazu. Irgendwann wird die Wolke immer schwerer und wenn sie voll ist, entlädt sie sich. Ich glaube nicht, dass sie auf gleichbleibender Höhe weht. Die Luft mit dem Hochdruck bewegt sich zu der Luft mit dem tieferen Druck, damit es sich ausgleicht. Und die Wolke bewegt sich mit. "Die sich bewegende Luft in der Höhe ändert mit zunehmender Entfernung vom Äquator ihre Richtung." Weil die Luft, wenn sie sich bewegt, also hier *(Gestik: Stift wird in Richtung Kamera bewegt)*, sie kommt hier so und dann gibt es

aber hier ein Tief und hier ein Tief (*Gestik: links und rechts von Stift, in gleicher Höhe*) und dann kann sie sich nicht entscheiden und dann geht sie immer da und dann da. (*In Bezug auf Emmas Vorschlag, dass die Richtungsänderung des Antipassats nur eine Täuschung, eine Relativbewegung zur sich drehenden Erde darstellt:*) Ich glaube nicht, dass das so ist. Dann müsste der Wind ja immer aus der gleichen Richtung wehen. Bei uns ist das aber nicht der Fall. **(Typ 15, 20)**

**Elena** (199-236, 237-273):

Aufsteigende Luft muss sich nicht zwangsläufig zu einer Wolke sammeln. Die Teilchen können sich auch in der Höhe verteilen und mehrere Grüppchen bilden. Winde entstehen auch einfach durch Hoch-Tief-Wechsel und wenn sie einfach zu anderen Hoch und Tief gehen und durch Unwetter und wenn halt Stürme entstehen. Wenn hier ein Tief ist, (*Gestik: linker Arm*) dann geht die Luft ja da lang (*Gestik: zeigt nach rechts*). Tiefs wandern und können als Regen absinken. Ich glaube, Windentstehung hat auch etwas mit der Globalisierung der Erde zu tun. Ja, wenn die Erde verschmutzt wird, entstehen mehr Unwetterkatastrophen, dadurch entstehen mehr Winde. "Die sich bewegende Luft in der Höhe ändert mit zunehmender Entfernung vom Äquator ihre Richtung." Es könnte etwas mit der Erdrotation zu tun haben, es könnte auch nur eine optische Täuschung sein. **(Typ 15, 21)**

**Emma** (199-236, 237-273):

"Windentstehung hat etwas mit unterschiedlichem Luftdruck zu tun." Ja, also wenn da (*Gestik: rechte Hand*) niedriger Luftdruck ist und da (*Gestik: linke Hand*) ein höherer Luftdruck, dann tauscht sich das ja aus (*Gestik: linke und rechte Hand gleichzeitig aufeinander zu bewegen*). Und dann entsteht Wind. (*Später:*) Die Luft bewegt sich zum Tief dann. Warum? Temperatur gleicht sich ja auch aus. Über einem See ist zum Beispiel ein Hoch. Weil Wasserdampf aufsteigt. Und dann steigt ja auch mehr Luft auf. Wenn mehr Luft da ist in der Höhe, dann ist der Druck ja höher. Ja, ist ja auch bei Luftballons so, oder so. Wenn man da Luft reinbläst, ist der Druck ja höher. Und dann kommt ja Luft von da nach da, weil da ja nicht so viel Luft aufsteigt. Aber die Luft geht ja nicht vom Tief zum Hoch. Es geht ja nicht die ganze Luft vom Hoch zum Tief. Es geht ja nur so viel Luft vom Hoch zum Tief, bis es sich ausgleicht. "Die sich bewegende Luft in der Höhe ändert mit zunehmender Entfernung vom Äquator ihre Richtung." Ich denke, dass es etwas mit der Erdrotation zu tun hat. Ein Luftstrom dreht sich ja nicht mit. Wenn jetzt zum Beispiel hier so (*Gestik: rechter Arm bewegt sich nach links*) die Luft kommt, und dann bewegt sich die Erde (*Gestik: zweite Hand bewegt sich ebenfalls nach links, jedoch leicht versetzt*) und die Luft geht ja weiter (*Gestik: zweite Hand nach links, rechter Arm geradeaus*) und dann sieht es, glaube ich, für uns aus, als ob sie die Richtung ändern würde, aber sie selbst geht halt weiter. Also so, glaube ich, ist es. Also dass es für uns aussieht, als ob die Luft woanders hinget, aber das nur ist, weil die Erdrotation halt unten stattfindet. **(Typ 15, 20)**

#### **INTERVIEW 6:**

**Annika** (180-264):

Wind weht aus mehreren Gründen nicht auf gleichbleibender Höhe. Die Luft knallt an die Berge und muss dann entweder drüber oder an der Seite vorbei. Wenn sie darüber weht, ändert sie ihre Höhe. Im Falle von Tornados prallen Winde aus verschiedenen Richtungen aufeinander, es entstehen stärkere Winde und Strudel. Luft steigt u.a. dann nach oben, wenn Wind kommt. Wind entsteht, wenn warme und kalte Luft zusammentreffen, wenn sie sich irgendwie berühren. Dann gibt es auch

Gewitter und Sturmböen. Häufig regnet es, wenn es windig ist. Das liegt daran, dass die Luft durch den kalten Regen kälter wird und wieder rauf zieht. Hoch- und Tiefdruck haben etwas mit dem Wetter zu tun, also ob Wolken da sind oder ob es kalt oder warm ist. Die Luft in den Tropen geht hoch und dann so an die Seite (*Gestik: Armbewegungen deuten divergierende Luftmassen in der Höhe an*). Dass die sich bewegende Luft in der Höhe ihre Richtung ändert, könnte etwas mit verschiedenen Luftsorten zu tun haben: Diese haben unterschiedliche Eigenschaften und können nicht miteinander verschmelzen, sodass sie irgendwie aneinander vorbei müssen. **(Typ 14, 20)**

**Lara (180-264):**

Luft bewegt sich nicht von sich aus. Wenn es regnet, ist es meistens windig. Wind entsteht dann, wenn Hochdruck- und Tiefdruckgebiete aufeinander prallen. Eventuell hat Windentstehung auch etwas mit warmer und kalter Luft zu tun. (*Stimmt Annika zu, Luft nach oben steigt, wenn Wind kommt.*) In der Mitte steigt die Luft auf und geht dann zur Seite (*Gestik: Armbewegung zeigt Divergenz in der Höhe*). (*Stimmt Annika zu, dass es Luftsorten gibt, die nicht miteinander verschmelzen, sondern irgendwie aneinander vorbei müssen.*) Die sich bewegende Luft könnte ihre Richtung ändern, weil sie bestimmte Eigenschaften (*Temperatur, Luftfeuchtigkeit*) hat, die andere Luftsorten nicht haben. **(Typ 14, 19, 20)**

**Nele (180-264):**

Windentstehung könnte etwas mit warmer und kalter Luft zu tun haben. Wir haben in Erdkunde so ein Bild gestaltet, mit aufsteigender Luft über dem Äquator, die sich in der Höhe teilt. (*In Bezug auf Annikas Vorstellung von Luftsorten:*) Aber die Dichte hat jetzt in den verschiedenen Ländern Unterschiede. Es wird halt wärmer, wenn sie vorbei strömt, oder so. **(Typ 19, 20)**

#### **INTERVIEW 7:**

**Hannah (98, 223-298):**

In den Tropen weht die Luft nach dem Aufstieg nicht als Wind auf gleichbleibender Höhe. Es regnet, weil die Luft kalt wird. Wind kann auf verschiedene Arten entstehen: durch Aufwärmung und Abwärmung, wenn warme und kalte Luft aufeinander treffen. Oder durch Luftdruck. Die Wirkungsweise lässt sich mit einer Spritze vergleichen, die zusammengedrückt wird. (*In Bezug auf Janas Vorstellung, dass Wind durch anschwellenden Luftdruck entsteht:*) Vielleicht ist das bei Gewitter auch. Oder Wind entsteht durch aufsteigende und absteigende Luft, die aneinander prallen. Die Richtungsänderung der sich vom Äquator entfernenden Luft wird durch die Erdrotation verursacht. Die Luft bleibt trägheitsbedingt zurück gegenüber der sich bewegenden Erdoberfläche, vergleichbar mit einem Gegenstand, den man aus einem fahrenden Auto wirft. Aber komisch ist, dass sich dann alle Winde automatisch in die entgegengesetzte Richtung zur Erdrotation drehen müssten, aber das gibt es doch gar nicht. **(Typ 14, 16, 21)**

**Alina (223-298):**

Nach dem Aufstieg ist die Luft oben und es bilden sich Wolken und es regnet. In den Tropen gibt es kaum Wind, weil es da so warm ist. Dass aufsteigende Luft bewirken kann, dass andere Luft absinkt, bezweifle ich, da dies längere Prozesse sind, es aber auch kurze Luftstöße gibt. Mit Hochdruck verbinde ich gutes Wetter und mit Tiefdruck nicht so gutes Wetter. (*In Bezug auf Hannahs Vorstellung, dass durch die Erdrotation Kräfte verursacht werden, die eine Richtungsänderung der Winde zur Folge haben:*) Die Erde dreht sich doch nicht mit Lichtgeschwindigkeit. Das merkt man gar

nicht! Dann müsste es Erdbeben geben. *(Später:)* Ja, kann gut sein. *(Auf Hannahs, dass dann alle Winde in eine Richtung entgegen der Erdrotation wehen müssten:)* Vielleicht verursacht die Erdrotation, dass die Richtungen sich abwechseln *(Gestik: Armbewegung deutet Wechsel der Windrichtung an)*. **(Typ 16, 21)**

**Jana** (223-298):

Nach dem Aufsteigen bilden sich Wolken und es regnet. Ich glaube nicht, dass die abgestiegene Luft als Wind auf gleichbleibender Höhe weht. Es gibt drei Möglichkeiten, wie Wind entstehen könnte: (1) Der Luftdruck könnte irgendwie so anschwellen, immer höher werden, dass zu einer Art Explosion kommt *(Gestik: Hände deuten Luftblase an, die explodiert)*. Und dann gibt es halt einen Wind. Dies ist vielleicht vergleichbar mit der Erfahrung, die man macht, wenn man eine kohlenstoffhaltige Flasche, die man vorher geschüttelt hat, aufmacht und an den Mund hält. Ich glaube, so etwas ist Luftdruck. Wenn es sich dann in deinem Mund sammelt und dann so bah *(Mimik: Druck im Mund steigt, schließlich Mund auf)*.(2) Vielleicht hat Windentstehung auch irgendwie etwas mit aufsteigender Luft zu tun, wenn die eine absteigt und die andere aufsteigt. (3) Also wenn warme Luft und kalte Luft aufeinander treffen, dann gibt es eigentlich Wind. *(In Bezug auf Alinas Äußerung zu Tiefdruck und Hochdruck:)* Bei Tiefdruck gibt es meistens auch Wind. "Die sich bewegende Luft in der Höhe ändert mit zunehmender Entfernung vom Äquator ihre Richtung." *(In Bezug auf Hannahs Auto-Vergleich:)* Kann ich mir auch vorstellen. **(Typ 14, 16, 21)**

#### **INTERVIEW 8:**

**Stefan** (141-194):

Nach dem Aufstieg kühlt die Luft ab. Es dauert etwa zwei bis drei Stunden, bis sich Regenwolken bilden und diese das Wasser abgelassen haben. Die abgekühlte aufgestiegene Luft bewegt sich schließlich runter. Wind entsteht, wenn ein Druckgebiet herrscht, dass sich irgendwann ausbreitet und vorstößt. *(Stimmt Tobias zu, dass Luft entsteht, wenn zu viel Druck in der Luft ist, der Luftdruck zu hoch wird.)* Man kann es mit einem Topfdeckel vergleichen, auf den der Wasserdampf drückt ausübt, da er unbedingt raus will. Wind kann auch entstehen, wenn warme, aufsteigende Luft weggetragen wird und auf kalte Luft trifft. **(Typ 16, 17)**

**Paul** (141-194):

Es gibt ja immer wärmere und kühlere Luft und dadurch dass die zwei aufeinander treffen, entsteht der Luftdruck. Stefan hat von Topfkessel gesprochen, da ist ja Luftdruck dann drin, wenn zum Beispiel Wasser drin ist, der übt ja dann auch einen Druck aus und Luftdruck würde ich sogar irgendwie mit Wind gleichsetzen. Wind hat ja auch einen Druck, oder? Durch das Zusammentreffen von kühler und warmer Luft entstehen Turbulenzen und die Luft weht herum, aufsteigende warme Luft und abfallende kalte verbinden sich irgendwie. Dadurch kann die aufgestiegene Luft über dem Äquator ihre Richtung ändern. Der Wind weht jedoch nicht auf gleichbleibender Höhe. Ja, es ist ja so, dass der Wind viel umher tragen kann, also zum Beispiel Blätter oder so. Die wirbelt er ja auf und Luft ist ja auch nur eine Sache. Und die Luft kann der Wind dann auch in die Turbulenzen bringen und dann eben da Luft in eine andere Richtung wehen, aus der er jetzt gekommen ist. **(Typ 14, 16)**

**Tobias** (141-194):

„Die Luft weht als Wind auf gleichbleibender Höhe.“ Ich denke, der Wind verteilt ja die Luft noch, oder? Der kommt ja aus verschiedenen Richtungen. "Windentstehung hat etwas mit

unterschiedlichem Luftdruck zu tun." Dass wenn zu viel Druck in der Luft ist, der Luftdruck zu hoch wird, dass dadurch dann Wind entsteht? **(Typ 16)**

#### **INTERVIEW 9:**

**Simon** (192-267):

Die aufgestiegene Luft sammelt sich, es entsteht ein Hochdruckgebiet. Schließlich kühlt sie ab, weil sie Energie abgibt und sinkt seitlich wieder runter. Die Luftteilchen sind durch Auf- und Abwinde ungleich verteilt. Wind entsteht aufgrund dieser ungleichen Verteilung. Die Luftteilchen fließen von da, wo viele Luftteilchen sind, nach da, wo weniger Luftteilchen sind. Man kann das mit Wasser vergleichen, dass durch ein Loch fließt von da, wo mehr Wasser ist, nach da, wo weniger Wasser ist. Dass die sich bewegende Luft ihre Richtung ändert, könnte verschiedene Ursachen haben: Ich denke, dass die Luft, die weiter oben ist, von unserem Blickwinkel aus die Richtung ändert, weil sie weniger beeinflusst wird von der Erdanziehungskraft. Oder da gibt es bestimmt noch andere Luftströme. Ich meine, dass andere Luftströme diese Luft vielleicht auch noch beeinflussen. **(Typ 15, 17, 20, 21)**

**Fabian** (192-267):

Die aufgestiegene Luft kühlt ab und geht wieder nach unten. Vielleicht entsteht Wind dadurch, dass wenn der Luftdruck an verschiedenen Stellen halt unterschiedlich ist, dass die sich dann gegenseitig abstoßen oder irgendwie gegenseitig anziehen oder so. Dass der Luftdruck unterschiedlich ist, hat vielleicht etwas mit dem CO<sub>2</sub> zu tun. Wenn Luft aufsteigt, ist dort, wo sie aufgestiegen ist, Platz frei geworden. Durch den Druck bewegt sich die andere Luft wieder auf den freien Platz und verteilt sich da. Sich bewegende Luft ändert ihre Richtung, wenn zwei aufeinandertreffen (*Gestik: Armbewegung deutet konvergierende Luftmassen an*), dass die sich sozusagen aus dem Weg gehen. **(Typ 16, 17, 20)**

**Jonas** (192-267):

Die Luft kühlt ab und geht wieder runter. Der Luftdruck ist abhängig von der Lage. Zum Beispiel in anderen Ländern ist auch ein anderer Luftdruck. Wegen dem Klima vielleicht? (*Stimmt Fabian zu, dass Luft die Richtung ändert, wenn zwei aufeinander treffen, sodass sie sich aus dem Weg gehen.*) **(Typ 17, 20)**

#### **INTERVIEW 10:**

**Jan** (203-268):

(*Stimmt Bernd zu, der sagt, dass die Luft in der Höhe vom Aufwind weggedrückt wird.*) Wir haben ja gesagt, dass wärmere Luft einen höheren Druck hat und das hat ja auch was mit Wärme auf jeden Fall zu tun, was dann aufsteigt. Und Luft mit höherem Druck steigt dann auf und staut sich oben auf und wird verdrängt. Dadurch geht der Wind da rüber, er weht eine Weile auf gleichbleibender Höhe und sinkt dann wieder. (*Stimmt Rainer zu, der sagt, dass die aufsteigende Luft ein Anstoß zum Wind ist.*) **(Typ 16, 18)**

**Bernd** (203-268):

Aber die sammelt sich ja erst mal. Die steigt ja auf, sammelt sich und wenn es zu viel auf einem Raum ist, dann regnet es vielleicht. (*Auf die Frage, warum die Luft in der Höhe nicht sofort wieder absinkt:*) Ja weil hier vielleicht auch wieder, dass der Aufwind, der die Luft dann hier sozusagen so drückt, dass die sich hier in die horizontale Richtung ausdehnt und nach einer Weile ist dann wieder genug Platz

und da kühlt sie sich ab und sinkt runter. Wenn das vielleicht so rechts und links sozusagen abfällt, weil da ein niedrigerer Luftdruck herrscht? Also sozusagen der Luftscheitel der Erde. (*Auf die Frage, warum ein Wind auf gleichbleibender Höhe seine Richtung ändert:*) Ja, vielleicht trifft er dann einfach auf ein wärmeres Gebiet mit höherem Luftdruck, auf ein Hochdruckgebiet und wird sozusagen dann umgelenkt. Rechts vorbei oder links vorbei. **(Typ 16, 18, 20)**

**Rainer** (203-268):

Ich würde nicht sagen, dass der Wind auf gleichbleibender Höhe weht. (*Stimmt Jan zu, dass es einen Kreislauf gibt.*) Oben im Bereich der aufsteigenden Luft herrscht ein Hoch und unten dann ein Tief. Die aufsteigende Luft ist so der Anstoß ist zum Wind. Ich denke, dass jetzt, wenn zwei unterschiedliche Drücke aufeinander crashen, dass da vielleicht ein mittlerer Druck aus den beiden entsteht. Oder dass die sich unterwandern. **(Typ 14, 15, 16, 19)**

**Leitfrage: Wie stellen sich die Lerner die Bedingungen vor, unter denen Luft in der Höhe absinkt?**

**INTERVIEW 1:**

**Kerstin** (325-336, 353-357, 404-408):

Wenn Luft auf ein anderes Druckgebiet stößt, sinkt sie ab. In einem Hochdruckgebiet ist die Luft oben, in einem Tiefdruckgebiet unten. Treffen die Druckgebiete aufeinander, kann es sein, dass ein Druckfeld das andere überwiegt, beispielsweise dadurch, dass sie unterschiedlich groß sind. Die Geschwindigkeit absinkender Luft ist abhängig von ihrer Schwere, also ihrer Feuchtigkeit und ihrer Temperatur. Kalte Luft ist schwerer als warme Luft. **(Typ 22, 24)**

**Rita**(325-344, 356-357, 404-408):

Wenn es geregnet hat, sinkt Luft in den Tropen ab. Unterschiedliche Druckfelder können auch ursächlich sein (*in Bezug auf Kerstins Vorstellung*). Die Luftdichte hat auch etwas mit dem Absinken zu tun. Warme Luft hat mehr Dichte, kalte Luft hat weniger Dichte. Die Geschwindigkeit absinkender Luft könnte von ihrer Trockenheit abhängig sein. **(Typ 24)**

**Verena** (325-344, 353-355, 404-410):

Wenn Luft abkühlt, wird sie schwer und sinkt ab. Luft kann auch nach Regen noch aufsteigen. Die Geschwindigkeit absinkender Luft hängt von ihrer Feuchtigkeit ab, also wie schwer die Luft ist. **(Typ 22)**

**INTERVIEW 2:**

**Julian** (196-201, 249-268, 358-364):

Luft sinkt ab, wenn sie kälter und damit schwerer als die umgebende Luft ist. Ihre Dichte ist dann höher. Zuvor hat sie ihre Wärme an irgendetwas abgeben können. Die Geschwindigkeit absinkender Luft ist von ihrer Dichte im Vergleich zur Dichte der umgebenden Luft und natürlich vom Ortsfaktor abhängig. Wenn man beispielsweise einen Bleigurt anzieht, sinkt man im Wasser schneller. Oder man lässt Gasblasen im Wasser aufsteigen, dann verringert sich die Dichte des Wassers und man sinkt schneller. Wenn die umgebende Luft also weniger dicht ist, also selbst weniger Gewicht hat, dann leistet sie weniger Widerstand und Luft sinkt schneller ab **(Typ 23)**.

**Björn** (196-201, 253-268, 358-364):

Luft sinkt, weil sie abkühlt und damit schwerer wird. (*Auf Julians Hinweis, dass die Geschwindigkeit des Absinkens auch von der Dichte des Mediums abhängt:*) Wenn du Salz ins Wasser reinmachst, sinken Objekte langsamer. (*Stimmt Julian zu, dass die Geschwindigkeit der absinkenden Luft auch von deren Schwere, Dichte abhängt.*) **(Typ 23)**

**Tim** (259-268):

Luft sinkt immer mit gleicher Geschwindigkeit, wenn sie schwer ist. Sie steigt eine gewisse Zeit und dann sinkt sie. Letzteres geschieht nicht plötzlich. **(Typ 22)**

### **INTERVIEW 3:**

**Judith** (443-444, 457-462, 484-494, 555-556):

Kalte Luft hat eine geringere Dichte als heiße. (*Später:*) Kalte Luft hat eine größere Dichte, da die Moleküle wieder näher zusammenrutschen, da sie nicht mehr so eine große Energie haben, um sich gegenseitig abzulenken. Die Masse pro Volumen ist größer und damit die Dichte. Luft sinkt unter der Bedingung ab, dass sie sich abkühlt und ihre Dichte größer wird. Die Geschwindigkeit absinkender Luft hängt davon ab, wie schnell sie sich abkühlt. **(Typ 22)**

**Katja** (457-462, 555-556):

Kalte Luft hat eine geringere Dichte als heiße. (*Später:*) Die Luft sinkt ab, weil sie sich abkühlt und dadurch zusammenzieht. **(Typ 22)**

**Katrin** (443-444, 483, 484-494):

Die Geschwindigkeit absinkender Luft hängt davon ab, wie schnell sie abkühlt. Wenn die Luft ein Maximum an Dichte erreicht hat, hört sie auf zu sinken. **(Typ 22)**

### **INTERVIEW 4:**

**Sophie** (16-19, 177-186, 193-201, 202-206, 237):

Luft sinkt ab, wenn sie sich abkühlt und schwer wird. Die Dichte nimmt zu. Die kalte Luft schiebt sich dann unter die warme. Je kälter die Luft ist, desto schneller und tiefer sinkt sie ab, weil desto weiter muss sie ja nach unten, weil desto schwerer ist sie ja. Aufsteigende Luft bildet zunächst Nebel, schließlich Wolken, und wenn diese zu schwer sind, weil dort zu viele Luft- und Wassermoleküle drin sind, dann fallen diese in Form von Regen runter. **(Typ 22)**

**Amelie** (16-19, 177-186, 193-206):

(*Stimmt Sophie zu, dass kalte Luft schwer ist und daher absinkt.*) Luft sinkt ab, wenn sie wieder abgekühlt ist. Ich denke, dadurch dass sich die Luft abkühlt, erhöht sich die Dichte wieder. (*Stimmt Sophie zu, dass Luft in Form von Regen absinkt.*) Eiskalte Luft sinkt langsamer, weil die sich ja langsamer aufwärmt wieder. Wobei man sagt ja auch, warmes Wasser lässt sich schneller gefrieren oder so. Hab ich gehört. Also, ich bin mir unsicher. (*Stimmt Sophie schließlich zu, dass kalte Luft schneller absinkt, weil sie schwerer ist.*) **(Typ 22)**

**Anne** (177-186, 193-201):

Und die Geschwindigkeit der Luft? (*Stimmt Sophie und Amelie zu, dass kalte Luft absinkt, weil sie schwer ist.*) **(Typ 22)**

**INTERVIEW 5:**

**Emma** (274-307, 338-358):

Luft sinkt ab, weil sie durch die Abkühlung schwerer ist. Die Geschwindigkeit absinkender Luft könnte vom Druckunterschied zwischen dem Hochdruckgebiet oben und dem Tiefdruckgebiet unten abhängig sein. (*Stimmt Elena zu, dass die Geschwindigkeit absinkender Luft irgendwie mit ihrer Temperatur zusammenhängt.*) **(Typ 22, 24)**

**Elena** (281-307, 347-358):

Die Geschwindigkeit absinkender Luft ist vom Temperaturunterschied zwischen aufgestiegener und umgebener Luft abhängig. (*Zu Emma, die sagt, dass Absinken in Form von Regen stattfindet:*) Es könnte aber auch schwül sein, also eklig warm und feucht. Dann würde die Luft absinken, weil sich nicht genug in der Höhe sammelt, dass es regnet. Und diese Luft wäre in der Höhe so warm, dass sie absinkt und dann feuchte, warme Luft entsteht. **(Typ 23, 24)**

**Lea** (--):

(keine Aussage)

**INTERVIEW 6:**

**Annika** (67-70, 117-119, 269-306):

Die Luft kühlt oben ab. Wenn sie kalt ist, sinkt sie wieder nach unten. Die Geschwindigkeit der absinkenden Luft ist davon abhängig, wie schnell sich die aufsteigende Luft abkühlt. **(Typ 22)**

**Lara** (67-70, 117-119, 265, 269-306):

Luft sinkt ab, wenn sie abgekühlt ist. Die Geschwindigkeit absinkender Luft ist davon abhängig, wie viel Luft nachströmt. (*Gestik: Armbewegung verdeutlich aufsteigende, nachströmende Luft*). Es ist ja ein Kreislauf und wenn alles oben ist, das geht ja gar nicht. Wenn sie kalt wird, geht sie wieder runter und unten wird sie wieder warm und dann geht sie wieder hoch. Eventuell hängt die Geschwindigkeit des Absinkens auch davon ab, wie viel Wind da ist. Vielleicht nimmt der sie mit runter. **(Typ 22, 24)**

**Nele** (--):

(keine Aussage)

**INTERVIEW 7:**

**Jana** (309--335):

Luft sinkt ab unter der Bedingung, dass es geregnet hat, weil sie sich dann ihres Wasserdampfes entladen hat. (*Auf die Frage, warum Luft ohne Wasserdampf absinken sollte:*) Weil sie wieder neuen braucht. (*In Bezug auf Hannahs Vorstellung, dass Hochs sich wie tektonische Platten über Tiefs schieben:*) Die dann wieder aufsteigende Luft geht dann über die schon aufsteigende und drückt die dann runter. **(Typ 24)**

**Hannah** (79, 309-335):

Luft steigt wieder runter, wenn sie kalt genug ist, weil sie dann wieder schwerer wird. Oder wenn sich ein Hoch über ein Tief schiebt, wie wenn die Erde so aufeinander prallt. *(Stimmt Jana zu, dass die aufgestiegene Luft die andere Luft runter drückt.)* **(Typ 22, 24)**

**Alina** (309-325, 326-335):

Luft sinkt ab, weil kein Wasserdampf mehr da ist. Wenn sich die Luft abgekühlt hat, ist sie wieder leichter und kann runter kommen. **(Typ 24)**

#### **INTERVIEW 8:**

**Paul** (198-204, 218-223, 233-244):

Luft sinkt ab, weil ihre Dichte wieder höher ist und sie dann schwerer ist. Je kälter die Luft ist, desto schneller fällt sie. **(Typ 22)**

**Tobias** (198-204, 218-223, 233-244):

Luft kühlt ab und wird schwerer. Je kälter sie ist, desto schneller sinkt sie. Beispielsweise sinkt Hagel schneller als Regen, weil er kälter ist und eine höhere Dichte hat. **(Typ 22)**

**Stefan** (198-204, 218-223, 233-244):

Die Luft kühlt ab und dann sinkt sie ab. Wovon hängt die Geschwindigkeit absinkender Luft ab? Da haben wir ja gesagt, wenn normale Luft, ich denke, wenn die Luft jetzt wärmer wird, wird sie ja noch schneller abfallen. Ja weil dann die Dichte von wärmerer Luft, haben wir ja gesagt, geringer ist und die von kälterer Luft höher ist und dann müsste es ja noch schneller abfallen, als es normale Luft täte, die eine normale Dichte hätte. Das ist, ich würde sagen, von der Wärme der Luft abhängig. **(Typ 22)**

#### **INTERVIEW 9:**

**Fabian** (276-291, 293-298):

Luft sinkt ab, wenn sie kühl ist. Die Geschwindigkeit absinkender Luft ist vom Temperaturunterschied zwischen der aufsteigenden und absteigenden Luft abhängig. **(Typ 22)**

**Simon** (8, 276-291):

Kalte Luft sinkt ab. Damit sie schnell absinkt, müsste die Luft außen rum verdammt kalt sein, damit die noch wärmere Luft eben sehr schnell abkühlt. **(Typ 22)**

**Jonas** (--):

*(keine Aussage)*

#### **INTERVIEW 10:**

**Bernd** (50-51, 270-290):

*(Stimmt Jan zu, der sagt, dass die Luft sinkt, wenn sie kälter ist als die umgebende Luft.)* Die Geschwindigkeit absinkender Luft ist vom Temperaturunterschied abhängig. Niedriger Druck, niedrige Temperatur. *(Stimmt Jan zu, dass bei der Abkühlung die Dichte kleiner wird.)* Wie wir eben schon gesagt haben, das ist ja ganz oben am kühlfsten und fällt sozusagen wieder in die untere Schicht zurück. **(Typ 23)**

**Jan** (270-290):

Wenn die Luft kälter ist als die umgebende Luft, dann sinkt sie ab. Wenn es sich abkühlt, wird die Dichte kleiner und dadurch nimmt der Druck ab und es sinkt. Die Geschwindigkeit absinkender Luft ist vom Temperatur- und Druckunterschied abhängig. **(Typ 23, 24)**

**Rainer** (270-290):

*(Stimmt Jan zu, der sagt, dass die Luft sinkt, wenn sie kälter ist als die umgebende Luft.)* **(Typ 23)**

**Leitfrage: Inwiefern stellen sich die Lerner vor, dass sich die Luft beim Absinken verändert?**

**INTERVIEW 1:**

**Kerstin** (337-347, 367-393, 411-418):

Luft sinkt ab und erwärmt sich dabei. **(Typ 25)**

**Rita**(84, 289, 367-393, 411-418):

Absinkende Luft erwärmt sich, wodurch die ihre Dichte größer wird. **(Typ 26)**

**Verena** (344-347, 353-355, 367-393, 411-418):

Luft sinkt ab und erwärmt sich, weil sie unten auf die wärmere Luft trifft. **(Typ 25)**

**INTERVIEW 2:**

**Julian** (269-322):

Luft erwärmt sich gemäßigt beim Absinken, weil sie erstens näher an die Erde kommt, also näher an den Hauptabgeber der Wärme, die Luft aufnehmen kann. Und weil sie entgegen der Richtung der warmen, aufsteigenden Luftsäule fließt und von dieser dann erwärmt wird. Die Wärme wird an die die ganze Zeit vorbeiströmenden kalten Luftmoleküle abgegeben. Haben aufsteigende und sinkende Luft nicht irgendwann dann die gleiche Temperatur? Da findet natürlich die ganze Zeit ein Austausch von Molekülen statt. Es gibt die warme Luftsäule und die kalte Luftsäule, die nach unten fällt und irgendeines aus den Molekülen aus der kalten Luftsäule wird jetzt so oft von den warmen (Luftmolekülen) getroffen, dass es selber wieder warm wird, dann geht es sozusagen auf die andere Seite der Autobahn, geht mit nach oben. Und ich denk mal, dass die dann eben noch weitergehen, dass liegt dann eben an dem Sog oder an dem Druck. Wenn die ja nach unten fallen, dann drücken die ja sozusagen von unten dann wieder nach. **(Typ 25, Typ 26)**

**Tim** (269-322, 365-366):

Beim Absinken erwärmt sie sich, beim Aufsteigen kühlt sie ab. Müsste nicht irgendwann ein Punkt kommen, wo auf- und absteigende Luft die gleiche Temperatur haben? *(Stimmt Julian zu, der sagt, dass die Auf- und Abwärtsbewegung durch Sog und Druck erfolgt.)* In den Tropen ist es nicht überall schwül. Es weht kein Wind. Da sind ja überall Bäume. **(Typ 26)**

**Björn** (269-322, 365-366):

Luft sinkt ab, bis sie sich wieder erwärmt, d.h. bis sie so nah vor dem Boden ist, das heißt bis sie so nah über dem Boden ist, dass sie von der abgegebenen Hitze oder Wärme wieder wärmer wird und aufsteigt. **(Typ 27)**

### INTERVIEW 3:

**Katja** (466-471, 495-532):

Die absinkende Luft erwärmt sich erst unten ab einem bestimmten Bereich wieder. Würde sie sich früher erwärmen, würde sie ja überhaupt nicht mehr runter kommen. Ab wo sich absinkende Luft erwärmt, ist unklar. *(Stimmt Judith zu, dass aufsteigende Luft nicht erst ab einem gewissen Punkt abkühlt.)* **(Typ 26)**

**Judith** (495-532):

Luft erwärmt sich beim Absinken, da sie wieder näher zur Erde kommt. Dies geschieht jedoch nicht schlagartig. Der Prozess der Erwärmung läuft nicht so schnell ab, da es sich um winzige Partikel, Moleküle handelt, die sich erwärmen müssen. Einzelne erwärmen sich schon sehr früh. Die meiste Erwärmung findet nahe der Erdoberfläche statt. **(Typ 25)**

**Katrin** (466-471):

Die absinkende Luft müsste sich eigentlich erwärmen, weil sich aufsteigende Luft abkühlt. Wenn sie sich jedoch zu schnell erwärmt, könnte es sein, dass sie gar nicht mehr runter kommt. **(Typ 25, 26)**

### INTERVIEW 4:

**Sophie** (207-215):

Absinkende Luft erwärmt sich, weil sie sich der Erdoberfläche nähert. **(Typ 25)**

**Amelie** (185, 187-189, 207-215, 224-235):

Beim Absinken erwärmt sich Luft, sodass sie irgendwann wieder aufsteigt. **(Typ 26).**

**Anne** (--):

*(keine Aussage)*

### INTERVIEW 5:

**Emma** (274-307, 338-358):

Luft erwärmt sich nicht beim Absinken. Das wäre unlogisch. Wir haben gesagt, dass aufsteigende Luft abkühlt, weil die Teilchen ihre Energie wegnehmen. Vielleicht würde sich absinkende Luft erwärmen, wenn es hier unten kalt und oben warm wäre. **(Typ 27)**

**Elena** (281-307, 347-358):

Luft erwärmt sich nicht beim Absinken. Oder sie erwärmt sich vielleicht doch, je weiter sie nach unten sinkt, durch die Annäherung an den Boden, der ja Wärme speichert. **(Typ 25)**

**Lea** (281-307, 338-346):

Die absinkende Luft erwärmt sich nicht. Wenn die Geschwindigkeit absinkender Luft zu groß ist, dann gibt es Hagel. *(Später:)* Hagel ist halt dann, dass es ganz schnell runter gekommen ist. Und deshalb hat es noch keine Zeit gehabt, sich zu erwärmen. **(Typ 25)**

#### **INTERVIEW 6:**

**Annika** (67-70, 117-119, 269-306):

Die absinkende Luft erwärmt sich nicht, denn warme Luft steigt nach oben, kalte Luft sinkt ab. *(Später:)* Theoretisch müsste sie sich ja erwärmen beim Absinken, weil sie sonst nicht hoch gehen kann, um sich wieder abzukühlen. **(Typ 25, 27)**

**Lara** (67-70, 117-119, 265, 269-306):

Die Luft erwärmt sich beim Absinken durch die Sonne schon wieder ein bisschen, so kurz vor der Erdoberfläche. Luft in der Höhe ist kälter, weil sie nicht so viel Wärme aufnehmen kann. Unten hat sie eine größere Dichte und kann mehr Sonnenstrahlung aufnehmen. **(Typ 25)**

**Nele** (281-306):

Die Luft erwärmt sich nicht beim Absinken. Die Luft in der Höhe ist kalt, weil sie eine kleinere Dichte hat. Bei größerer Dichte kann es schneller warm werden. **(Typ 27)**

#### **INTERVIEW 7:**

**Jana** (309-335):

*(Stimmt Hannah zu, dass sie sich absinkende Luft erwärmt, weil sie der Erde wieder näher kommt.)*  
**(Typ 25)**

**Hannah** (79, 309-335):

Die Luft erwärmt sich beim Absinken durch die Erde, da diese einen größeren Wärmekoeffizienten hat. Die Erde wärmt die Luft und nicht umgekehrt, dass die Luft sich selbst erwärmt. Beim Absinken erwärmt sie sich nicht so stark, als wenn sie sich da so auf das Relief drauf legt. **(Typ 25)**

**Alina** (--):

*(keine Aussage)*

#### **INTERVIEW 8:**

**Paul** (198-204, 218-223, 233-244):

Beim Absinken wird sie langsam warm. Erst wenn sie dann wieder erwärmt wird, wird die Dichte so gering, dass sie wieder aufsteigen kann. **(Typ 26)**

**Tobias** (198-204, 218-223, 233-244):

Beim Runtergehen wird die Dichte schon geringer, weil die Luft immer wärmer wird. Und wenn sie unten ist, dann wird sie noch mal erwärmt und dadurch steigt sie wieder auf, da ist dann eine geringere Dichte. *(Auf die Frage, warum sich absinkende Luft erwärmt:)* Sonst würde sie ja nicht mehr aufsteigen. **(Typ 25, 26)**

**Stefan** (198-204, 218-223, 233-244):

*(Stimmt Paul zu, der sagt, dass sich die Luft beim Absinken langsam erwärmt.)* Vor allem, wenn sie dann eine höhere Dichte hat als Luft, das heißt, wenn sie dann wieder sinkt, dann wird die Luft auch wieder sauerstoffreicher. Dann müsste es sich eigentlich auch wieder erwärmen. **(Typ 25)**

**INTERVIEW 9:**

**Fabian** (276-291, 293-298):

Ich dachte, die absinkende Luft erwärmt sich erst, wenn sie angekommen ist an der Erde. Weil wenn sie sich ja eigentlich zu arg erwärmen würde, dann steigt sie ja direkt wieder auf. **(Typ 26)**

**Simon** (8, 276-291):

Absinkende Luft erwärmt sich wieder durch die Erdoberfläche. **(Typ 25)**

**Jonas** (--):

*(keine Aussage)*

**INTERVIEW 10:**

**Bernd** (50-51, 270-290):

Wie wir eben schon gesagt haben, das ist ja ganz oben am kühlfsten und fällt sozusagen wieder in die untere Schicht zurück. Und wird dort wieder aufgewärmt, da sie sich der wärmeren Umgebung angleicht. **(Typ 25)**

**Jan** (270-290):

Die absinkende Luft erwärmt sich durch das Abwärmen, durch die Anpassung. **(Typ 25)**

**Rainer** (270-290):

Die Luft erwärmt sich beim Absinken. Sie gleicht sich wieder der Umgebung an und die Luft nahe der Erde ist wärmer wie die weiter weg. **(Typ 25)**

**Leitfrage: Welche Vorstellungen haben Lerner darüber, wie weit Luft absinkt?**

**INTERVIEW 1:**

**Kerstin** (337-347, 367-393, 411-418):

Luft sinkt bis zum Boden ab und erwärmt sich dabei. Es könnte auch sein, dass Luft nur bis zu einer bestimmten Höhe absinkt, weil unten drunter kein Platz mehr ist. Vergammelt die Luft unten drunter dann nicht? Die Luft unten drunter könnte trotzdem aufsteigen, die Luft oben drüber jedoch nicht weiter absinken. Dieses Phänomen gibt es nur in den Tropen, weil dort Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur viel intensiver sind. **(Typ 28, 29)**

**Rita**(84, 289, 367-393, 411-418):

Absinkende Luft erwärmt sich, wodurch die ihre Dichte größer wird. In den Tropen sinkt die Luft nur bis zu einer bestimmten Höhe ab, weil sie sich nicht an die untere Luft anpassen kann. Letztere ist feuchtwarm im Gegensatz zur absinkenden Luft. Die untere Luft steigt trotzdem auf, nur die absinkende Luft kann nicht weiter absinken. Dies ist nur in den Tropen so, da die Luft viel wärmer und feuchter ist wie z.B. in Deutschland. **(Typ 29)**

**Verena** (344-347, 353-355, 367-393, 411-418):

Dass Luft nur bis zu einer bestimmten Höhe absinkt, habe ich schon gehört, kann es aber nicht erklären. **(Typ 29)**

#### **INTERVIEW 2:**

**Julian** (269-322):

Dass die Luft in den Tropen nur bis zu einer bestimmten Höhe absinkt, kann ich mir nicht genau erklären. Vielleicht ist es in dieser Höhe schon so warm oder heiß, dass die absinkende Luft wieder aufsteigt. Das heißt, dass die Luft darunter gar nicht zirkuliert, dass es immer die gleiche Luft ist. **(Typ 29)**

**Tim** (--):

*(keine Aussage)*

**Björn** (--):

*(keine Aussage)*

#### **INTERVIEW 3:**

**Katja** (445-456, 533-545, 557-559):

Luft kann bis zum Boden absinken, es kommt darauf an, in welchem Gebiet man sich befindet. Wenn sich die Luft jedoch erhitzt, sinkt sie nicht mehr. Ein Teil der Luft sinkt jedoch immer bis zum Boden. Es findet eine Zirkulation statt, sonst wäre es unten kalt, weil alle warme Luft nach oben steigen würde. Ein beheizter Raum erwärmt sich auch vollständig, d.h. die absinkende Luft wird nicht irgendwo gestoppt. **(Typ 28, 29)**

**Judith** (445-456, 533-545):

Luft kann bis zum Boden absinken. *(Stimmt Katja zu, die sagt, dass Luft nicht mehr sinkt, wenn sie sich erhitzt.)* Dass Luft nur bis zu einer bestimmten Höhe absinkt, kann nicht sein, denn du kriegst ja doch noch ein bisschen was von der Warmluft hier unten ab. Die verharrt nicht oben. *(In Bezug auf Katjas Ofenbeispiel:)* Luft erwärmt sich unten, weil eine Zirkulation stattfindet. Wenn die Moleküle direkt am Ofen sich aufheizen, steigen sie nach oben, aber irgendwann heizen sich andere Moleküle dann auch auf. Und irgendwann wird ja auch dann die Luft woanders im Raum wärmer. **(Typ 28)**

**Katrin** (445-456, 533-545)

Luft kann bis zum Erdboden absinken, weil Luft ja überall ist. Es stimmt nicht, dass Luft nur bis zu einer bestimmten Höhe absinkt. **(Typ 28)**

#### **INTERVIEW 4:**

**Sophie** (207-215, 224-235):

Luft sinkt nicht nur bis 1000 Meter ab. Das kann nicht sein. Dann wäre unten drunter luftleerer Raum. Tiere könnten nicht atmen. Luft sinkt bis zum Boden ab. **(Typ 28)**

**Amelie** (185, 187-189, 207-215, 224-235):

Wenn die Luft in den Tropen nur bis zu einer bestimmten Höhe absinken würde, würde man unten ja keine Luft mehr kriegen. Unten drunter wäre dann gar nichts, ein Unterdruckgebiet, ein Vakuumraum. **(Typ 28)**

**Anne** (224-235):

Luft sinkt ab, bis sie wieder aufsteigt. Vielleicht wird Luft schon in 1000 Metern Höhe wieder warm und steigt wieder auf. *(Auf Sophies Frage, was dann unter 1000 Metern sein soll:)* Warme Luft. Keine Ahnung. **(Typ 29)**

#### **INTERVIEW 5:**

**Lea** (308-337):

Dass Luft in den Tropen nur bis zu einer bestimmten Höhe absinkt, glaube ich nicht. Luft kann nicht einfach aufhören zu sinken. Aber es kann auch sein, dass es dann einfach schwül ist, dass sich warme Luft unten sammelt und Luft daher nicht weiter absinkt. Da die schwüle Luft voller Feuchtigkeit ist, ist sie zu schwer, um aufzusteigen. **(Typ 28, 29)**

**Emma** (308-337):

*(Stimmt Lea zu, dass Luft nicht einfach aufhört zu sinken.)* Es könnte ja sein, dass es wieder runter geht, sich wieder erwärmt, bis es dann wieder hoch steigt. Dass Luft immer nur bis zu einer bestimmten Höhe absinkt, glaube ich nicht, denn die Luft kann ja nicht ewig da oben bleiben und außerdem kommt mit dem Regen ja auch die Luft runter. Wenn es solche Gegenden gibt, wo die Luft nur bis 1000 Meter absinkt, dann macht das Sinn, wenn es nicht regnet. **(Typ 28, 29)**

**Elena** (308-337):

Vielleicht sinkt Luft in den Tropen nur bis zu einer bestimmten Höhe ab, weil es zwei Bereiche gibt, einen warmen unten und einen kalten oben. Die Luft unten sammelt sich dort, weil der Boden Wärme abgibt und sie dort Wasserdampf enthält, der schwer ist. In diesem unteren Bereich ist die Luft gleich warm, weil sich die Temperaturen ausgleichen. Dadurch bildet sich unten eine Ebene aus schwüler Luft und nur alle paar Tage sinkt Luft von oben ab. Ich vermute, dass da in der Gegend eventuell keine Niederschläge sind, weil die warme Luft unten so warm oder so kühl ist, wie die Luft, die kommt und dann sind sie hier in dem Bereich gleich warm und die bleiben zusammen. **(Typ 28, 29)**

#### **INTERVIEW 6:**

**Lara** (118-119, 266-268, 307-320):

Luft sinkt bis zum Boden ab. In den Tropen sinkt Luft nur bis zu einer bestimmten Höhe ab, weil die unten wegen der hohen Luftfeuchtigkeit eine so hohe Dichte hat, dass die absinkende Luft nicht weiter runter kann. Ein bisschen Luft kommt jedoch immer runter, da sie sich sonst oben stauen würde, was ich mir nicht vorstellen kann. **(Typ 28, 29)**

**Annika** (266-268, 307-320):

Luft sinkt, bis sie nicht mehr sinken kann, bis zur Erde oder bis zum Meer. Es könnte aber auch sein, dass die Luftfeuchtigkeit in den Tropen bis zu den Bäumen so hoch ist, dass die Luft da gar nicht

drunter durch kommt. Aber wie kann sich die Luft dann austauschen? Wenn sie stehen bleiben würde und die Luft nur bis zu den Bäumen, also bis oberhalb der Bäume kommen würde, dann würde sich die Luft unter den Bäumen nicht austauschen, dann wäre kein Sauerstoff mehr da, dann könnte man ja nicht überleben und von dem her müsste die Luft ja eigentlich weiter runter, um halt den Kreislauf zu schließen. Nein, ich glaube nicht, dass es stimmt, dass die Luft in den Tropen nur bis zu einer bestimmten Höhe absinkt. **(Typ 28, 29)**

**Nele** (307-320):

Ich bezweifle, dass die Luft in den Tropen nur bis zu einer bestimmten Höhe absinkt, weil darunter ja auch Luft ist. **(Typ 28)**

#### **INTERVIEW 7:**

**Hannah** (306-308, 336-344):

Luft sinkt bis zum Boden, zur Oberfläche ab und legt sich dann so auf den Boden (*Gestik: breitet Arme aus*). Dass die Luft in den Tropen nur bis zu einer bestimmten Höhe absinkt, kann nicht sein. (*Stimmt Jana zu, dass die Behauptung falsch ist, da man sonst nicht mehr atmen könnte.*) **(Typ 28)**

**Jana** (306-308, 336-344):

(*Stimmt Hannah zu, dass Luft bis zum Boden absinkt.*) Dass die Luft in den Tropen nur bis zu einer bestimmten Höhe absinkt, kann nicht sein. Dann könnten wir gar nicht atmen. Dann kommt ja gar keine neue mehr hin. **(Typ 28)**

**Alina** (306-308):

(*Stimmt Jana zu, dass die Luft in den Tropen nur bis zu einer bestimmten Höhe absinkt.*) Dann wäre unten viel dünnere Luft, das geht nicht. **(Typ 28)**

#### **INTERVIEW 8:**

**Paul** (205-210, 245-267):

Luft sinkt bis zum Boden ab, oder? Wenn Luft in den Tropen nur bis zu einer Höhe von etwa 1000 Meter absinken würde, läge das daran, dass sie sich beim Absinken wieder so stark erwärmt hätte, dass sie wieder hoch geht. Unter den 1000 Metern wäre die Luftdichte überall gleich. Wenn man Sandkörner in einem Glas schüttelt, dann vertauschen die sich ja auch alle. Das ist, denke ich, so beim Wind auch. Und dass die oberste Luft dann wieder so erwärmt wird, dass die wieder aufsteigt, wieder bis 1000 Meter abfällt und dann wieder mit der unteren vielleicht dreht und die dann wieder erwärmt. Andererseits muss die Luft ja auch auf den Boden kommen. **(Typ 28, 29)**

**Stefan** (205-210, 245-267):

Dass Luft nur bis zu einer bestimmten Höhe absinkt, könnte daran liegen, dass sie beim Absinken die Dichte von der Luft bekommt und dann kann sie halt einfach nicht weitersinken, weil sie die gleiche Dichte hat. (*In Bezug auf Tobias Äußerungen, dass Regen auch bis zum Boden fällt:*) Also ich würde auch nicht sagen, dass Luft nur bis 1000 Meter absinkt. Wenn die Luft absinkt, könnte sie sich in der Höhe mit der Luft unter 1000 Metern vermischen und dadurch könnten sich Wolken bilden. Also würde ich nicht sagen, dass es monatelang keine Niederschläge gibt. **(Typ 28, 29)**

**Tobias** (205-210, 245-267):

Ich denk nicht, dass in den Tropen die Luft nur bis zu einer bestimmten Höhe absinkt. Der Regen fällt ja auch auf den Boden und die Luft hat ja auch etwas mit dem Regen zu tun. Wenn es so wäre, würde es auch nicht regnen. **(Typ 28)**

**INTERVIEW 9:**

**Fabian** (268-275, 299-327):

Luft sinkt doch bis zur Erde, oder nicht. **(Typ 28)**

**Jonas** (268-275, 299-327):

Es könnte sein, dass die Luft in den Tropen nur bis zu einer bestimmten Höhe sinkt, weil es ziemlich schwül und ziemlich warm ist. Deswegen ist es für die Luft warm genug bis 1000 Meter und deswegen geht sie nur bis dahin, weil sonst weiter unten es noch wärmer wäre. Ich glaube nicht, dass die Luft da einfach stehen bleibt bei 1000 Meter. Die steigt dann wieder auf. Luft steigt wieder auf, sammelt sich und dann entsteht da wieder Regen. **(Typ 29)**

**Simon** (268-275, 299-327):

Die Luft an sich, die geht schon bis zum Boden. **(Typ 28)**

**INTERVIEW 10:**

**Bernd** (291-309):

Die Luft sinkt ab, bis sie sich wieder erwärmt hat. Wenn die Luft in den Tropen nur bis zu einer bestimmten Höhe absinkt, liegt dies daran, weil einfach bis 1000 Meter so eine Wärme herrscht, dass die Luft, die herab sinkt ab 1000 Meter Höhe schon wieder diese Temperatur hat wie die Luft drunter und dadurch nicht niedriger sinkt, sondern einfach dort bleibt. Also ist einfach dieser Kreislauf in 1000 Meter Höhe und dieser Bereich von 0 bis 1000 hat eben eine konstante Temperatur. Und deswegen ist es dort ja auch immer so warm. In diesen Gegenden gibt es monatelang keine Niederschläge. Wenn die Luft herabsinkt bis auf 1000 Meter Höhe, nimmt die vielleicht nicht so viel Wasserdampf auf wie Luft, die 10 Meter oder 5 Meter über dem Boden ist. Und daher gelangt auch nicht so viel Wasserdampf in die obere Atmosphäre. So entstehen dann auch in dem Fall keine Wolken. **(Typ 29)**

**Jan** (273-278, 291-309):

Die Luft sinkt, bis sie wieder genau die gleiche Temperatur hat wie die umgebende Luft. *(Stimmt Bernd zu, dass zwischen 0 und 1000 Meter eine konstante Temperatur herrscht, wenn Luft nur bis 1000 Meter sinkt.)* **(Typ 29)**

**Rainer** (273-278, 291-309):

*(Stimmt Jan zu, dass Luft absinkt, bis sie die gleiche Temperatur wie die umgebende Luft hat.)* *(Stimmt Bernd zu, dass zwischen 0 und 1000 Meter eine konstante Temperatur herrscht, wenn Luft nur bis 1000 Meter sinkt.)* Druck und Dichte, alles konstant unter 1000 Meter. **(Typ 29)**

**Leitfragen: Welche Vorstellungen haben die Lerner zur Passatzirkulation?**

**INTERVIEW 1:**

**Rita**(428-435, 454-458):

Ursächlich für den Passatwind könnte die Sonne sein. Der meiste Wind entsteht dort, wo Südost- und Nordostpassat aufeinander treffen. **(Typ 30)**

**Kerstin** (428-435, 454-458):

Ursächlich für das Wehen des Passatwindes könnten die Ozeane sein, hierüber nimmt die Geschwindigkeit zu. Da wo Südost- und Nordostpassat aufeinander treffen, ist der meiste Wind, vergleichbar mit dem Effekt, den man erzielt, wenn man zwei Föhne gegeneinander hält. **(Typ 30)**

**Verena** (--):

*(keine Aussage)*

**INTERVIEW 2:**

**Julian** (119-124, 177-183, 367-427):

Also, sagen wir, es ist Herbst oder Frühling, dann ist am Äquator die Sonne senkrecht. Dort herrscht am Boden ein tiefer Luftdruck oder Unterdruck, weil da die Luft aufsteigt. Oben hast du einen Hochdruck. Am nördlichen Wendekreis und am südlichen Wendekreis haben wir überall am Boden Hochdruckgebiete, weil dort die Luft absinkt. Passatwinde sind ja dann diese Strömungen vom Hochdruck- zum Tiefdruckgebiet. Die aufsteigende Luft saugt die Passatwindluft nach. Aufsteigende Luft ist ja erst mal der Grund für die Entstehung des Passatwindes. Weil Luft aufsteigt, wird der angesaugt. Vielleicht steigt deswegen die Luft so hoch auf, weil sie eben nachgesaugt wird und der Kreislauf nicht unterbrochen wird. Bei uns ist der Kreislauf unterbrochen, da längere Zeit mal die Sonne nicht scheint oder im Winter der Einstrahlungswinkel der Sonne zu flach ist. Der Passatwind hat natürlich auch Einfluss auf die aufsteigende und fallende Luft, weil er sozusagen die fallende Luft anzieht und dort, wo die aufsteigende Luft aufsteigt, sozusagen neue Luft hin transportiert, damit dort überhaupt noch etwas ist zum Aufsteigen. Und zum anderen, weil er ja auch Wärme transportieren kann und auch Feuchtigkeit, was ja alles Einfluss darauf hat, ob Luft aufsteigt und wie Luft aufsteigt. Das ist alles zusammen der Passatkreislauf. Wenn es dann über dem Meer aufsteigt, da geht es so nach hinten sozusagen und geht dann auf dem Land wieder runter und deswegen ist da so viel Feuchtigkeit. Und auch so viel Wasserdampf in der Luft. Passatwind heißt ja drehender Wind. Die Erde dreht sich nach Osten. Die aufsteigende Luft wird nach Osten abgelenkt, weil die Erdrotation immer gleich ist. In Erdkunde haben wir ja auch irgendwas mit diesen Winden gemacht, die um den Äquator rumgehen. Wegen der Erddrehung gehen die ja nicht sozusagen direkt wieder zurück *(zum Äquator; deutet mit Handbewegung zwei frontal aufeinander treffende Objekte an)*, sondern die verschrägen sich so ein *bisschen (deutet mit Handbewegung zwei schräg aufeinander treffende Objekte an)*. Irgendwie dreht sich auf der Nordhalbkugel der Wind immer in die eine Richtung und auf der Südhalbkugel immer in die andere Richtung. Ich weiß es jetzt nicht mehr, welche Richtungen es waren. Desto näher die Luftmassen an den Äquator kommen, desto mehr weht der Passatwind dann eben in die abgelenkte Richtung. Wenn dann am Äquator eben diese Drehung erfolgt, würde das ja heißen, dass der Passatwind sozusagen perfekt nördlich oder südlich weht. Wir sind noch nicht so weit in Mathe, aber es gibt ja auch irgendwie, dass man sozusagen den

Winkel zwischen einer Kurve und einer Geraden irgendwie bestimmen kann an einem bestimmten Punkt. Das stelle ich mir auch so als Kurve vor, diese Windänderung als Kurve und dass dann der Äquator sozusagen genau der Schnittpunkt ist, wo dann eben dieser Winkel, den man errechnen könnte, senkrecht wäre. Also, dass dann sozusagen der Wind perfekt nach Norden oder Süden wehen würde. **(Typ 32, 33)**

**Björn** (119-124, 177-183, 367-427):

Da wo die Luft nach oben weggeht, hast du einen Unterdruck. Im Prinzip wird ja die Passatwindluft da in die Mitte gezogen. Das ist ja ein Kreislauf. Normalerweise steigt sie am Äquator auf und an den Wendekreisen fällt sie runter und wird dann abgelenkt. Der Passatwind weht immer vom Hoch- zum Tiefdruckgebiet als strömende Luftmasse, wobei er auf der Nordhalbkugel nach rechts abgelenkt wird. Die ganzen Faktoren beeinflussen, wie stark der Passatwind weht. Wenn die Sonne am nördlichen Wendekreis senkrecht steht, verschiebt sich das ganze nach Norden und wenn sie am südlichen Wendekreis steht, nach Süden. Dann verlagert sich im Prinzip alles von da oben ein bisschen nach unten. **(Typ 30)**

**Tim** (367-391, 415-425):

*(Nach Julians Erläuterung der Wechselwirkungen im Passatkreislauf:)* Dann hat ja alles eine Auswirkung auf das andere. Ja, wir haben ja jetzt hier einen Kreis. Da berührt jedes das andere, also irgendwann. Das heißt, wenn jetzt zum Beispiel dieser Höhenwind relativ warm ist, dann wird auch der Passatwind wärmer als wenn der Höhenwind kälter wäre. Quasi. Oder schneller oder schwächer. Und alle anderen auch. Die Erde dreht sich nach Osten. **(Typ 32)**

### **INTERVIEW 3:**

**Judith** (404, 569-613, 622-645):

Der Passatwind weht beständig, weil er von der absinkenden Luft verdrängt wird. Er ist ein Rückfluss im Rahmen eines Kreislaufes. Wenn die Passatwinde der beiden Halbkugeln aufeinander treffen, entweichen sie nach oben, weil unten kein Platz ist. Dabei kommt es zu Entladungen und Regen, da hier zwei Kräfte, einzelne Moleküle aufeinander prallen. In den Tropen gibt es täglich um die Mittagszeit Gewitter. Dass diese Aufwinde Auswirkungen auf den Passatwind haben, kann ich mir nicht vorstellen. Sie bilden lediglich die Rücklage für den nächsten Passatwind. Die Richtung des Passatwindes könnte mit der Erdrotation zusammenhängen. Er weht aus nord- bzw. südwestlicher Richtung. Wenn es wirklich etwas mit der Rotation zu tun hat, dann müsste die Luft ja eigentlich nach Osten gehen. Und dann würde die schwerere Luft praktisch wie in einer Zentrifuge fast nicht mitkommen. Das heißt, die schwere Luft würde zwar auch der Erddrehung nach Osten folgen, aber eben viel langsamer. Und das würde dann wiederum keinen Sinn ergeben, weil Wind ja stärker als die Erddrehung von der Geschwindigkeit her ist. **(Typ 31, 33)**

**Katja** (219, 602-613, 622-645):

Die ganzen Winde werden wieder zum Äquator zurückgeweht. Wegen dem Kreislauf weht der Passatwind beständig. Wenn Winde aufeinander zu wehen, entsteht ein Druck. Irgendwo vermischen sich die Passatwinde der beiden Halbkugeln. Und dann steigt sie wieder auf und so weiter. Also, es wiederholt sich. **(Typ 31)**

**Katrin** (569-601, 622-645):

*(Stimmt Judith zu, dass der Passatwind beständig weht.)* Und ich denke auch, das ist einfach ein Kreislauf. Der weht ja dann immer wieder so zurück. Also muss er ja irgendwie beständig sein. *(Stimmt Judith zu, dass die Bewegungsrichtung des Passatwindes irgendwie mit der Erdrotation zusammenhängt.)* **(Typ 31, 33)**

#### **INTERVIEW 4:**

**Amelie** (303-326):

Aufsteigende Luft, Höhenwind und absinkende Luft haben Einfluss auf den Passatwind und umgekehrt." Ja natürlich beeinflusst sich das. Das ist wie wenn zwei Menschen aus verschiedenen Richtungen aufeinanderprallen. Dann gehen die so ineinander und fliegen so in dieselbe Richtung. *(Stimmt Sophie zu, die sagt, dass die aufeinander treffenden Winde gemeinsam in eine bestimmte neue Richtung weiter wehen.)* *(In Bezug auf Sophies Vorstellung, dass der Passatwind durch die Aufwinde mit aufsteigt:)* Für den Passatwind ist es Höhen- und Tiefenveränderung. **(Typ 30, 34)**

**Sophie** (303-326):

"Aufsteigende Luft, Höhenwind und absinkende Luft haben Einfluss auf den Passatwind und umgekehrt." Ja bestimmt. Die Winde bewegen sich aufeinander zu, treffen sich und wehen schließlich gemeinsam in eine neue Richtung. Treffen Passatwind und Aufwind aufeinander, gehen sie gemeinsam nach oben. **(Typ 30, 34)**

**Anne** (--):

*(keine Aussage)*

#### **INTERVIEW 5:**

**Emma** (359-474):

Der Passat weht vom Hoch zum Tief. Durch aufsteigende Luft, Höhenwinde und absinkende Luft wird der Passatkreislauf angekurbelt. Der Passatwind nimmt aufsteigende Luft einfach mit. Vielleicht wird er durch die aufsteigende oder absteigende Luft ein bisschen abgebremst, weil er mehr Energie braucht, um die aufsteigende Luft mitzunehmen, die nicht so warm ist wie er. Doch vielleicht wird der Wind durch aufsteigende Luft gar nicht abgebremst, sondern schneller? Dadurch weht er dann stärker, wenn er näher an den Äquator kommt. Ich stelle mir das nicht so vor, dass da jetzt ein Wind kommt *(Gestik: Armbewegung von rechts nach links)*, ich denke, der ist immer da. Ob der Passatwind beständig weht, weiß ich nicht. Es hängt ja nicht nur von Hochs und Tiefs ab, sondern auch davon, was zwischendurch passiert. Er muss ja eine ziemlich weite Strecke zurücklegen. Und dadurch dass da mal mehr oder weniger Luft auftaucht, auf dem Weg zum Beispiel mal mehr oder mal weniger Luftfeuchtigkeit hoch geht oder Luft mal mehr absinkt oder so, weht der Passatwind vermutlich nicht so konstant, obwohl Hoch und Tief konstant vorhanden sind. Die Richtungsänderung der Passatwinde könnte etwas mit der Erdrotation zu tun haben. Je näher man an den Äquator kommt, umso schneller wird die Geschwindigkeit, mit der sich die Erde dreht. Wind, der nach Norden oder Süden weht, hat dann eine andere Geschwindigkeit als die sich drehende Erde. **(Typ 30, 33)**

**Elena (359-474):**

Hochs geben die Luft ab, die dann zu Tiefs wandert. Es gibt 3 Hochs, von denen aus die Luft immer zu den gleichen Tiefs geht. Das eine Hoch geht zu einem anderen Tief wie das andere Hoch, also dass keine 2 Winde zu einem Tief gehen. Der Passatwind nimmt immer die aufsteigende Luft mit und hinten beim Passatwind kommt dann immer die absteigende und dann entsteht Regen immer nach Passatwind, beim Absinken. Die absinkende Luft ist eine Auswirkung von dem Kreislauf. Kann man sich vorstellen wie Abgase, die dann hinten übrig bleiben und dann absinken. Der Passatwind wird abgebremst wegen der warmen Luft. Hier kommt der Passatwind (*Gestik: Armbewegung in der Horizontalen von rechts nach links*), dann steigt hier die Luft auf (*Gestik: zweiter Arm bewegt sich aufwärts bis Höhe erster Arm*) und der Passatwind muss erst mal ein bisschen Abbremsen, um die Luft aufzunehmen. Weil eventuell ist die Luft nicht so warm wie der Passatwind. Und da muss er vielleicht abbremsen, um sie mit sich zu nehmen, und deswegen glaube ich, dass er dann langsamer wird. (*Stimmt Emma zu, dass der Passatwind mehr Energie braucht, um die warme Luft mitzunehmen.*) In der Nähe des Äquators bekommt der Passatwind dann so eine Druckwelle (*Gestik: schnelle Armbewegung nach oben*). Der Passatwind hat eine Mindestgeschwindigkeit, er ist beständig, weil er immer in so einer Art Kreislauf ist. Auf der Nordhalbkugel weht er in nordöstliche Richtung und auf der Südhalbkugel in südöstliche Richtung. Auf der Nordhalbkugel geht dann der Wind einmal so rum (*Gestik: Armbewegung gegen den Uhrzeigersinn*) und auf der Südhalbkugel halt in die andere Richtung (*Gestik: Armbewegung im Uhrzeigersinn*). Es kann auch anders herum sein.

**(Typ 32, 34)**

**Lea (359-474):**

(*Stimmt Elena zu, dass ein Kreislauf zwischen Hochs und Tiefs stattfindet.*) Es gibt 2 Passatkreisläufe, oder? Der Passatwind weht immer vom Äquator weg, nach Norden und nach Süden. Es ist jedoch kein Kreislauf, weil er nicht die gesamte Erde umfasst, sondern jeweils nur die Nord- oder Südhalbkugel. Vielleicht wird der Passatwind durch aufsteigende oder absinkende Luft schneller? Also ich glaube schon, dass der Passatwind konstant weht, weil am Äquator sind die Hochs und da (*Gestik: Hand*) sind die Tiefs und dann geht es so (*Gestik: andere Hand bewegt sich runter zu unbewegter Hand*). (*Stimmt Emma zu, dass der Passatwind aufgrund der weiten Strecke eventuell doch nicht konstant weht.*) Der Passatwind geht dann immer wieder zum Äquator, dass es ein Kreislauf ist. **(Typ 31)**

**INTERVIEW 6:**

**Annika (336-437):**

Beim Passatkreislauf bewegt sich Luft in einem Kreislauf. Die Sonne strahlt überall hin, aber an einer Stelle steigt die Luft auf, weil sie sich erwärmt und an einer anderen Stelle sinkt die Luft wieder ab, weil sie ja irgendwo absinken muss, obwohl die Sonne dort gleich strahlt. Die Abbildung Passatkreislauf kenne ich so aus dem Erdkundeunterricht. Am stärksten erwärmt sich Luft da, wo die Sonne senkrecht steht. Im Sommer ist die Sonne näher an der Erde oder die Erde an der Sonne als im Winter. Wind entsteht immer, wenn das Hoch zum Tief weht oder geht. Es hat etwas mit aufsteigender Luft zu tun, denn das Hoch ist immer da, wo Luft aufsteigt und sich abkühlt. Ich denke aber nicht, dass der Passatwind Einfluss auf die aufsteigende oder absinkende Luft hat, denn an manchen Tagen weht ja auch gar kein Wind und manchmal ist es ziemlich stürmisch. Gibt es nicht so Land-See-Wind oder so? Über Tag erwärmt sich ja das Land schneller als das Wasser. Dann entsteht dort ein Hoch. Und dann geht das Hoch zum Tief, das heißt, die warme Luft über das Meer. Eigentlich

ist es ja umgekehrt. Weil sich das Land schneller erwärmt und dann geht es ja aufs Meer und am Meer bleibt es ja, wird es gebremst. Der Passatwind weht auf der Nordhalbkugel von Nordosten. Er ändert seine Richtung, je näher er an den Äquator kommt, weil es dort ja heißer wird. Da prallen dann 2 Luftsorten aufeinander. **(Typ 31, 34)**

**Lara (336-437):**

Die Luft erwärmt sich in bestimmten Bereichen durch den Boden sehr stark, da wo die Sonne am nächsten ist und dort steigt sie auf. Die absinkende Luft beeinflusst den Passatwind. Wenn hier das Tief ist und hier das Hoch, das das dann so runter geht und die dann zusammenstoßen, ich denke, dass dadurch dann der Passatwind, wie sagt man, sich in Bewegung setzt. Wie schnell sich die aufsteigende Luft erwärmt, hat nichts mit der Geschwindigkeit vom Passatwind zu tun. **(Typ 30)**

**Nele (--):**

*(keine Aussage)*

#### **INTERVIEW 7:**

**Hannah (380-430):**

*(Auf die Frage, was man unter dem Passatkreislauf versteht:)* Das ist das, wie die Winde wehen auf der Erde. Dass wenn sich die Erde so herum dreht, dass die so *(Gestik: Armbewegung deutet konvergierende Luftmassen an)* aufeinander treffen und dann so *(Gestik: Armbewegung deutet divergierende Luftmassen an)* wieder auseinander gehen. *(Auf Alinas Einwand, dass sich die Erde so langsam drehe, dass sie keinen Einfluss auf die Luft ausübe:)* Doch, ich denke schon. Aber ich denke, das reicht schon, dass das entsteht. Es hängt mit der Anziehungskraft der Erde zusammen. Vergleichbar mit einem Gegenstand, der aus einem fahrenden Auto geschmissen wird. "Aufsteigende Luft, Höhenwind und absinkende Luft haben Einfluss auf den Passatwind und umgekehrt." Das drückt dann so von oben auf das andere und dann entsprechend weht dann der Passatwind. *(Auf die Frage, welchen Einfluss aufsteigende Luft auf den Passatwind haben könnte:)* Das zieht den so an, also wenn es Aufwind gibt, dann gibt es so einen Sog. Dass der Passatwind, wenn er sich dem Äquator nähert, seine Richtung ändert, glaube ich nicht. Einerseits verhindert die Erddrehung, dass er sich dem Äquator nähert und andererseits wird er abgestoßen von Winden, die vom Äquator kommen. **(Typ 30, 33)**

**Jana (380-430):**

Ich weiß nicht, in welche Richtung sich die Erde dreht, aber wenn sie sich beispielsweise in die Richtung *(Gestik: Armbewegung gegen Uhrzeigersinn)* dreht, dann gibt es diesen Hoch- und Tief-Wind, weil da der Äquator ist und dann in die umgekehrte Richtung unten und oben, nein *(bricht ab)*. Einer so rum, einer so rum. *(Auf die Frage, warum die Luft vom Äquator weg weht:)* Weil das so in der Mitte liegt, würde ich sagen. So Luftstöße, dass die so weggestoßen werden. *(Stimmt Alina zu, dass der Passatwind die aufsteigende Luft nach oben wegdrückt.)* Der Passatwind ändert seine Richtung vielleicht wegen anderer Winde. **(Typ 30, 34)**

**Alina** (380-430):

*(In Bezug auf Hannahs Bemerkung, dass die Erdrotation relevant sei:)* Ich finde es trotzdem komisch. Ich glaube nicht, dass es was mit der Erdbewegung zu tun hat. Die bewegt sich doch so langsam. *(Auf die Frage, inwiefern der Passatwind Einfluss auf die aufsteigende Luft hat:)* Ja das drückt ja quasi *(Gestik: Armbewegung deutet Passatwind an, der aufsteigende Luft nach oben drückt)*. Der Passatwind könnte seine Richtung ändern wegen eines anderen Windes. Ja, die stoßen sich halt an. Oder vielleicht verschmelzen sie auch. **(Typ 30, 34)**

#### **INTERVIEW 8:**

**Paul** (273-331):

Über dem Meer steigt Wasserdampf auf und wird vom Wind Richtung Land getragen. Über den Bergen wird es kälter und die kalte Luft oder die Niederschläge kommen runter. Unten wird die Luft wieder erwärmt und es entsteht Wind Richtung Meer. Die aufsteigende Luft über dem Meer ist wärmer als die abkühlende über den Bergen und dadurch entsteht ein kleiner Wind. Der Wind wird durch den Druck weitergeleitet. Das wäre dann der Kreislauf. Eine Richtungsänderung könnte dadurch entstehen, dass der Wind durch Druck irgendwo abgelenkt wird. Der Passatwind könnte einfach vom Äquator weggedrängt werden. Ich denke, es kommt sogar auf die Druckwelle drauf an, weil er könnte ja dann wieder sogar zurück abgelenkt werden, zwar nicht gerade, aber das er gerade über den Äquator kommt oder aber über den Äquator und er wird trotzdem abgelenkt. **(Typ 31, 34)**

**Stefan** (273-331):

Vielleicht bildet sich nach Niederschlag an den Bergen da in der Nähe so ein Druckgebiet, das wird dann übers Meer weitergeleitet. Es entsteht, wenn sich warme und kalte Luft treffen. Dann bildet sich über den Bergen so ein Druckgebiet und das Druckgebiet tut dann den Wind erschaffen. Dann würde das Druckgebiet so ausbrechen und dann übers Meer. Wie wir gesagt haben, es bildet sich ganz viel Druck an einer Stelle *(Gestik: Hände deuten Kugel an)*, irgendwann hält die Luft das dann einfach nicht mehr aus und möchte einfach ausbrechen und schießt dann einfach übers Meer *(Gestik: Armbewegung deutet an, dass Inhalt der Kugel in eine Richtung schießt)* oder so, das ist dann der Wind, würde ich sagen. Und es gibt halt welche, die dann einfach schwächer sind oder einfach die stärker sind. So ein größeres oder kleineres *(Druckgebiet)* *(Gestik: s.o.)*. Wind könnte vielleicht seine Richtung ändern, weil er von anderer Luft verdrängt oder abgelenkt wird. Dass dann ein anderer Wind kommt und ihn so *(Gestik: anderer Arm deutet aufsteigenden Wind an, der mit horizontalem Wind kollidiert und eine Richtungsänderung zur Folge hat)* rüber lenkt. **(Typ 31, 34)**

**Tobias** (273-331):

Passatkreislauf, Passatwinde? Ist das nicht das, was übers Meer *(bricht ab)* und dann wird es irgendwie erwärmt und sinkt ab? Also irgendwie nimmt die Luft die Feuchtigkeit überm Meer auf, trägt sie dann weiter bis über die Berge und lässt dann dort die feuchte Luft ab und da ist dann Niederschlag. Und das ist dann halt so ein Kreislauf. Je mehr Luftdruck da ist, umso stärker ist der Wind. **(Typ 31)**

### INTERVIEW 9:

**Simon** (99-332-382):

Ich würde mal sagen, das ist ja so ein Kreislauf in den Tropen. Bei den Tropen steigt die Luft auf. Die Tropen selbst, da ist ein Tiefdruck. Die ganze Zeit regnet es über den Tropen, ist immer ein Hochdruck und das ist dieser wunderschöne Kreislauf, wo Luft nach oben steigt, absinkt (*Gestik: Arme deuten absinkende Luft rechts und links neben aufsteigender Luft an*). Bei den Wüsten, also bei den nördlichen und südlichen Wendekreisen, geht die Luft runter und wird von den Wüsten aus mit dem Passatwind zurück zu den tropischen Regenwäldern zurückgetragen, wo sie dann wieder aufsteigt. Der Passatwind weht wegen dem Tief über dem Äquator. Ich sage nicht, dass die ganze Luft direkt auf die Wendekreise knallt, aber ich würde sagen, bei den Wendekreisen kommt ja das meiste runter, die Luft ist ziemlich trocken und wird dann dort, wo sie sich sammelt, wieder zu den Regenwäldern zurück fließen. Und die Teilchen, die eben vorher schon runter kommen, sind dann die, die bei 1000 Metern Höhe sind. (*Auf die Frage, warum der Höhenwind/Antipassat nicht schon früher absinkt:*) Ein kleiner Teil sinkt auch schon früher ab, da immer mal was abkühlt. Das Gesamte, also der Batzen sinkt ab, wenn er eine bestimmte Temperatur erreicht hat, wo es dann runter geht. Die Richtungsänderung des Passatwindes kommt durch die Erdanziehung zustande. Weil es eben direkt zum Tief wieder geht. Dass er eben oben ist, der dreht sich dann ein bisschen, warum weiß ich nicht, dass es dann eben beim Runterfallen, beim Abfallen dann wieder, ja, es kommt unten an, dann geht es wieder rüber und oben kann es zwar, aus welchen Gründen auch immer, sich drehen, aber ich denke, unten wird es dann direkt zum Tief gehen. **(Typ 31, 33)**

**Fabian** (--):

*(keine Aussage)*

**Jonas** (332-382):

Ich weiß ehrlich gesagt nicht, was der Passatkreislauf ist, ich vermute, das ist eben die Luft, wie sie sich bewegt, und vielleicht bewegt die sich einfach im Kreis? Also, die rotieren im Kreis. Ich denke, ein Wind kann eines anderen Windes die Windrichtung ändern, wenn sie zusammenstoßen. **(Typ 31, 34)**

### INTERVIEW 10:

**Bernd** (315-396):

Die aufsteigende Luft über dem Äquator ist sozusagen wie so ein Staubsauger, der über den Tropen ist und sozusagen die ganze Luft so wegzieht. Auf dem Äquator ist es ja beständig warm und wenn der Passatwind dem nahe kommt, weht der ja stärker, weil die Luft schneller erwärmt wird. Die wird ja schon in 1000 Metern Höhe erwärmt. Dass die kalte Luft von Deutschland oder beziehungsweise von Afrika und so sozusagen hier hingezogen wird, weil sie sich hier erwärmt und weil sie sich erwärmt, steigt sie auf. (*Gestik: Armbewegung deutet konvergierende Luftmassen am Boden an, die anschließend aufsteigen*). Und wenn sie oben ist, fällt sie wieder runter und fällt weit weg runter und nicht direkt runter (*Gestik: Armbewegung deutet divergierende Luftmassen in der Höhe an, die mit Abstand absinken*). **(Typ 31)**

**Jan** (315-396):

Ich habe die Vermutung, dass bei uns im Winter die Luft nicht warm genug ist, um aufzusteigen und dann einfach sich staut und zu den Tropen hingedrückt wird, sich dort erwärmt. Und dann wird sie dort hochgezogen. Wenn mehr Luft aufsteigt, gibt es auch automatisch einen stärkeren Höhenwind. Durch den stärkeren Höhenwind gibt es auch mehr kalte Luft, die absinkt. Und dadurch wird dann der Passatwind wieder beeinflusst. Also weil dann einfach mehr Luft aufsteigt, dadurch wird mehr Luft nachgezogen. Ja, durch dieses ansaugen. Also, sie erwärmt sich und steigt auf und dadurch ist halt der Kreislauf zum Äquator hin. Also der Wind weht zum Äquator. Im Sommer auf der NHK ist der Passatwind etwas schwächer, weil der Temperaturgegensatz zwischen unseren Breiten und den Tropen nicht so groß ist. **(Typ 32)**

**Rainer** (315-396):

Durch aufsteigende Luft, Höhenwind, absinkende Luft und Passatwind wird so ein Kreislauf angekurbelt. Ich denke, die bilden einen Kreislauf, wenn alles so zusammenweht. *(Auf Jans Bemerkung, dass durch aufsteigende Luft Luft nachgezogen wird:)* Das Staubsaugerprinzip. **(Typ 31)**

**Leitfrage: Welche Vorstellungen haben Lerner zur Entstehung von Regenzeiten in den wechselfeuchten Tropen?**

**INTERVIEW 1:**

**Kerstin** (470-485, 489-503):

In den Tropen regnet es dauernd. In den wechselfeuchten Tropen dauert es halt länger, bis es regnet. Es herrscht ein trockenes Klima. Vielleicht liegt es daran, dass hier Ozeane fehlen. **(Typ 35)**

**Rita**(468, 470-485, 488):

Wenn es nach einer Trockenzeit anfängt zu regnen, kann der Boden erst mal nicht alles aufnehmen, weil er ja so trocken ist. Was sind denn wechselfeuchte Tropen? Warum regnet es in den wechselfeuchten Tropen nicht immer? Es sind doch Tropen! Wie entsteht eine Regenzeit? Wind nimmt Wasser auf, bis er auf Land stößt, dort fängt es an zu regnen. Weht der Wind über Land, kommt kein Wasser mehr hinzu, deswegen kann es auch nicht regnen. Durch die Drehung der Erdkugel, aber auch durch die Jahreszeiten, steht die Achse ja ganz anders. Die Windrichtung ändert sich entsprechend im Sommer und Winter. **(Typ 35)**

**Verena** (462-464, 466, 470-485):

In den wechselfeuchten Tropen regnet es nicht dauernd. Hier regnet es ewig lang eben nicht. Ursächlich hierfür ist die Richtungsänderung der Winde. **(Typ 35)**

## INTERVIEW 2:

**Julian** (323-357, 428-429, 430-443):

Es gibt Tropen, die immer feucht sind und Tropen, die nur manchmal feucht sind. Der Passatwind ist mit Feuchtigkeit gesättigte Luft. Dieser kommt einmal aus der einen Richtung und einmal aus der anderen Richtung: Einmal weht er zuerst übers Meer, dann übers Land und trifft schließlich das Gebirge, wo sich die Feuchtigkeit abregnet. Oder dann im nächsten halben Jahr sozusagen trifft der Wind eben vom Meer direkt aufs Gebirge, wodurch kein Regen für die andere Seite da ist, weil doch da das Land ist, das flache Land. Regen erfolgt also in der Nähe der Gebirge. Ich glaube, bei der Sahara rechts, da stehen ja auch noch diese Berge irgendwo. Es ist dann eben immer nur zu der Zeit feucht, ein feuchtes Tropengebiet, wo der Wind aus der richtigen Richtung kommt. In Indien ist dies auch so. Warum der Wind seine Richtung ändert, kann ich nicht genau erklären. Vielleicht hat es etwas mit dem Einstrahlungswinkel der Sonne zu tun. Zwischen Wendekreisen und Äquator ändert sich dieser im Laufe der Zeit. Der Wind dreht irgendwie. Ich glaube am Äquator immer nach rechts. Wenn der Passatwind aus dem Süden über den Äquator hin zum nördlichen Wendekreis gehen muss, findet eine Richtungsänderung statt. **(Typ 35)**

**Björn** (323-357, 428-429, 430-443):

*(Stimmt Julian zu, dass der Wechsel der Windrichtung ursächlich für Regen- und Trockenzeiten ist.)*  
Trockenheit herrscht, wenn der Wind vom Land weht, weil hier ja keine großen Wassermassen außer ein paar Flüssen sind. Die vom Meer kommende Luft regnet es sich ja vor dem Gebirge aus, wenn es hoch genug ist und hinten dran regnet es ja überhaupt nicht mehr dann. **(Typ 35)**

**Tim** (163-165, 430-443):

Wenn Luft über das Meer geht, dann nimmt sie die ganze Feuchtigkeit auf und steigt. *(Stimmt Julian zu: Der Wechsel von Regen- und Trockenzeiten wird durch den Wechsel der Windrichtung verursacht.)*  
**(Typ 35)**

## INTERVIEW 3:

**Judith** (646-702):

Trockenzeiten in den wechselfeuchten Tropen, das ist doch der Gürtel neben dem tropischen Regenwald. Ursächlich für die Regenzeit könnte sein, dass sich vorher in der Trockenzeit so viel heiße Luft angestaut haben muss, dass riesige Energie vorhanden ist. Diese ist größer als bei einem normalen Gewitter, da sich hier sehr viel heiße Luft angestaut hat. Ich weiß nicht, ob es in der Wüste eine Regenzeit gibt, ich glaube nicht. Der Passatkreislauf erklärt die täglichen Gewitter im Regenwald. Aber wenn sich das täglich dort ausregnet, erklärt das dann nicht, warum es Regen- und Trockenzeiten gibt. Der Passatkreislauf wandert im Verlauf eines Jahres wegen dem Einfallswinkel der Sonne. Der Sonnenstrahl ist mal unter und mal über dem Äquator. **(Typ 38)**

**Katja** (646-702):

Das Modell des Passatkreislaufs hilft mir nicht, die Entstehung von Regen- und Trockenzeiten in den wechselfeuchten Tropen zu erklären. Vielleicht hat es etwas mit dem sich im Laufe eines Jahres verändernden Abstands der Erdhalbkugeln zur Sonne zu tun. Im Winter ist die Nordhalbkugel näher an der Sonne als im Sommer. Ein Sonnenstrahl braucht länger, um beispielsweise die Wüste zu erreichen. Er kühlt unterwegs ab. **(Typ 36)**

**Katrin** (--):

*(keine Aussage)*

**INTERVIEW 4:**

**Sophie** (329-382):

Regenzeiten könnten irgendwie durch die Krümmung der Erdachse verursacht werden. Der Verdunstungs- und Regenkreislauf wäre dann zu bestimmten Zeiten nicht so stark ausgeprägt, weil die Luft weniger stark erhitzt würde. Oder es hängt mit der Windrichtung zusammen. Wenn der Wind von der Wüste kommt, wäre er ganz trocken und würde weniger Feuchtigkeit mit sich bringen. Dann wäre Trockenzeit. Und wenn sie vom Nordpol kommt, dann ist mehr Feuchtigkeit drin, weil die Luft regnet sich ja nicht aus, weil sie ja nicht aufsteigt. Das heißt, sie bleibt immer gleich und hat immer die gleiche Feuchtigkeit drin und dann kommt sie mit der Feuchtigkeit und dann wird sie schnell warm, geht hoch und dann regnet es runter. Und deswegen ist dann da Regenzeit. Die Entstehung der Regenzeiten hat etwas mit dem Einstrahlungswinkel zu tun. Je mehr Sonneneinstrahlung da ist, desto wärmer ist die Luft und desto weniger Feuchtigkeit ist vielleicht auch drin. **(Typ 35, 37)**

**Amelie** (329-382):

*(Stimmt Sophie zu, dass im Falle einer Trockenzeit der Wind aus Richtung Wüste weht und dass es mit dem Einstrahlungswinkel der Sonne zusammenhängt.)* **(Typ 35, 37)**

**Anne** (333-382):

*(Stimmt Sophie zu, dass im Falle einer Trockenzeit der Wind aus Richtung Wüste weht und dass es mit dem Einstrahlungswinkel der Sonne zusammenhängt.)* **(Typ 35, 37)**

**INTERVIEW 5:**

**Elena** (475-515):

Regen- und Trockenzeiten entstehen, weil der Passatwind Richtung Äquator bzw. vom Äquator weg wandert. Das sind dann die Orte, die bisschen vom Äquator weg sind, da wo die Trockenzeiten sind und die Regenzeiten und es hat auch immer was zu tun, wie nahe der Passatwind dann wandert. Weil ich glaube, der Passatwind, der wandert halt und der ist ja eine Zeitlang auf Wanderung und dann halt da, wo es gar nicht regnet, das sind dann die Momente, wo der Passatwind gerade vorbei ist und der macht ja so einen Kreislauf. Umso mehr Wind entsteht, desto mehr Regen entsteht. Wenn er nicht da ist oder nur ganz schwach da ist, dann regnet es nicht. Es gibt eine Dürre. In der Trockenzeit ist es mehr schwül und es reicht dafür nicht aus, dass die Luft aufsteigt, dass sich Regen bildet, da ist ja nicht genug. Ja es kommt darauf an, wie und wo genug Wärme entsteht und wie genug Tröpfchen sich dann in der Wolke sammeln, ob es dann regnet. Diese Veränderungen sind abhängig von anderen Witterungen, eventuell auch von der Rotierung und von mehreren Faktoren, wenn diese auf einmal zutreffen. **(Typ 35, 38)**

**Emma (475-515):**

Also bei uns entstehen ja auch Jahreszeiten. Ich denke, das kann man vergleichen. Das hat bei uns ja jetzt nichts mit dem Passatkreislauf zu tun oder vielleicht hat es da ein bisschen was damit zu tun. In Indien beispielsweise, da kommt ja der Passatkreislauf und er kommt ja vom Meer. Wenn es Indien erreicht, dann regnet es ja und dann entsteht die Regenzeit. *(Zu Elena, die sagt, dass der Passatwind Regen bringt:)* Ja schau mal, wir haben ja auch keinen Passatwind und es regnet bei uns und wenn jetzt da irgendwo in Indien die Luft aufsteigt, warum soll es dann nicht regnen in der Trockenzeit? Um Indien herum ist doch überall Meer. Ja aber bei uns gibt es ja auch keine Passatwinde und es regnet. In der Sahara regnet es nicht, weil es da kein Wasser gibt. **(Typ 35)**

**Lea (--):**

*(keine Aussage)*

**INTERVIEW 6:**

**Annika (321-331, 438-461):**

In der Wüste ist es trocken, weil da kein Meer ringsum ist, wo die Luftfeuchtigkeit sich erhöhen kann und dann ist es so nah am Äquator, dass die Sonne den Wasserdampf schon gleich verdampfen lässt. Und dann können sich keine Wolken bilden und dann kann es nicht regnen. Und wenn es regnet, würde der Regen auch gleich wieder verdampfen, weil es zu heiß ist. Vielleicht hat die Entstehung von Regen- und Trockenzeiten etwas mit dem Wind zu tun, weil wenn der Wind vom Meer ins Land weht, dann hat er ja die Feuchtigkeit vom Meer noch eingespeichert und dann kann es regnen im Land. Aber wenn er vom Land ins Meer weht, dann ist da keine feuchte Luft und dann wird es auch nicht regnen. Also hat das vielleicht doch etwas mit den Richtungen zu tun? Und halt auch mit der Temperatur, mit der Sonneneinstrahlung. Weil je mehr Sonne, desto wärmer und so weiter. "Die Veränderung des Einstrahlungswinkels der Sonne spielt eine Rolle." *(In Bezug auf Laras Vorstellung, dass es umso trockener ist, je größer der Einstrahlungswinkel der Sonne:)* Ja ich glaube, da wo die Luft halt hoch geht, die ist ja nicht so schwer mit Luftfeuchtigkeit beladen als dort, wo sie runter geht. **(Typ 35, 37)**

**Lara (321-331, 438-461):**

Ob es eine Regen- oder eine Trockenzeit gibt, hängt davon ab, wie die Erde gerade gedreht ist. Ob die Sonne direkt drauf strahlt oder von einem Winkel. Weil wenn die Sonne mehr da ist, wenn die Sonne direkt drauf strahlt, dann ist ja trockener und es regnet nicht so häufig. **(Typ 37)**

**Nele (--):**

*(keine Aussage)*

### INTERVIEW 7:

**Alina** (346-371, 433-500):

Die Entstehung von Regen- und Trockenzeiten könnte mit der Drehung der Erde um sich selbst zu tun haben. Die Tropen sind ja ganz am Äquator und wenn das die Sonne ist und die Erde halt sich so dreht, dann scheint in den Tropen (*Gestik: deutet sonnenabgewandte Erdseite an*) die Sonne gar nicht drauf und dann ist da vielleicht eine Trockenzeit. (*Später:*) Im Sommer sind Regenzeiten. Das wäre ja am Äquator. Das hat auch etwas mit der Sonne zu tun. Weil die Sonne da ja auftrifft, also stärker, als hier oben oder hier unten (*niedere Breiten*). Ja, wenn es da heißer ist, dann regnet es auch mehr. **(Typ 37)**

**Hannah** (346-371, 433-500):

In Indien zieht der Wind über das Land, regnet sich aus und wenn er die Berge erreicht, regnet er sich komplett ab und zieht über die Berge drüber. Deswegen regnet es ja auch innerhalb von Deutschland nicht so oft wie an der Nordsee. Auf gewissen Breitengraden ist es immer trocken. Die Sahara ist ja auch im Landesinneren. **(Typ 35)**

**Jana** (346-371, 433-500):

(*Zu Hannah, die sagt, dass es in Deutschland weniger regnet als an der Nordsee:*) Es regnet schon mehr an der Nordsee, aber ich glaube nicht so viel mehr. Dass es Regenzeiten gibt, könnte irgendwie mit dem Passatkreislauf zusammenhängen. Im Regenwald regnet es. (*Stimmt Alina zu, dass es auch etwas mit der Sonne zu tun haben könnte:*) Vielleicht verdampft das so. Macht es so heiß und dann bilden sich Tröpfchen. Ja, ich weiß nicht, warum es regnet. Vielleicht regnet es da nicht so viel, weil es da nicht so heiß ist. **(Typ 37)**

### INTERVIEW 8:

**Stefan** (332-345):

Die Entstehung von Regen- und Trockenzeiten könnte etwas mit der Stellung der Erde zur Sonne zu tun haben. So wie es Sommer und Winter gibt, gibt es dort ein halbes Jahr Regenzeit und ein halbes Jahr Trockenzeit. Wenn die Erde näher an der Sonne ist, ist es vielleicht mehr trocken. Ich bin mir nicht sicher. (*Später stimmt er Paul zu, dass eine Trockenzeit herrscht, wenn die Feuchtigkeit in der Luft verbraucht ist.*) Es könnte auch sein, dass der Passatwind in der Regenzeit vom Meer aus über den Äquator weht und in der Trockenzeit daran vorbei gelenkt wird. **(Typ 35, 36)**

**Paul** (332-345):

Es gibt nur eine bestimmte Feuchtigkeit in der Luft, die dann aufsteigt und dann abfällt und wenn das halt nicht mehr so der Fall ist, wenn die Feuchtigkeit irgendwie schon verbraucht ist, dann herrscht erst mal eine Trockenzeit, die das alles wieder zum Verdunsten bringt. (*In Bezug auf Stefans Aussage, dass der Passatwind in der Regenzeit vom Meer weht und in der Trockenzeit nicht:*) Ja, es ist ja so, dass die wechselfeuchten Tropen genau zwischen den trockenen und den feuchten sind, das heißt, das eine Mal wird er dahin abgelenkt und in der anderen Zeit fällt er eben genau da ab. **(Typ 35, 36)**

**Tobias** (--):

(keine Aussage)

### INTERVIEW 9:

**Simon** (99, 383-392):

Ich würde mal sagen, das ist ja so ein Kreislauf in den Tropen. Bei den Tropen steigt die Luft auf. Die Tropen selbst, da ist ein Tiefdruck. Die ganze Zeit regnet es über den Tropen, ist immer ein Hochdruck und das ist dieser wunderschöne Kreislauf, wo Luft nach oben steigt, absinkt (*Gestik: Arme deuten absinkende Luft rechts und links neben aufsteigender Luft an*) und dann wieder zurück geht (*Gestik: Arme deuten konvergierende Luftmassen am Boden an*). Und die Wüsten kriegen halt eben die trockene Luft, die von oben runter kommt, ab. Deswegen trocknen die Wüsten aus. Deswegen sind die Wüsten trocken. Der Wasserdampf, der eben geklaut wurde, geht hinten zu den Tropen, wo er dann wieder aufsteigt und da die Luft sich dann abkühlt und da kalte Luft nicht so viel Feuchtigkeit verträgt wie warme Luft, regnet es da eben öfters und die ganze Feuchtigkeit geht nach unten. (*Auf die Frage, wie Regen- und Trockenzeiten in den wechselfeuchten Tropen entstehen:*) Es gibt zwei Feste die man feiert, die Sonnenwende. Und die Erde eiert ein bisschen, und die Sonne, die darauf einstrahlt, ist nicht immer direkt am Äquator, wobei die Tropen, die immerfeuchten Tropen immer in einem gewissen Bereich liegen, wo eben dieser Regen, der kommt, wirklich das ganze Jahr da ist oder so gut wie das ganze Jahr. Und wenn zum Beispiel der Einfallspunkt, seitlich gesehen beim Äquator sich jetzt nach Norden verlagert und wirklich weiter im Norden ist bei uns, dann haben wir erstens auch mehr Sonnenzeit und zweitens ist es da bei uns Sommer. Diese ganzen Luftgeschichten verschieben sich ja auch ein bisschen. Zwar ein kleines bisschen verzögert, das es ein bisschen Zeit braucht, aber nicht unbedingt so viel verzögert und dadurch, dass es eben immer Stückchen für Stückchen wandert, kriegen dann eben die Bereiche hier drüben, wo jetzt die Luft runter fällt, wenn sich jetzt das ganze hier verschiebt, dann gibt es hier hinten einfach keinen Regen mehr oder generell gar keinen Regen, weil ja Wüstengebiete vorherrschen. Und wenn sich jetzt hier das verschiebt, kommt ja die feuchte Luft dahin. Und dann regnet es hier die ganze Zeit. Ja, das wandert immer weiter bis zu dem Punkt, die Sonnenwende, und dann geht es eben wieder zurück und jetzt ist es eigentlich genau anders herum wieder. Dann geht das zum Äquator, wandert da weiter zum anderen Punkt und dann wieder zurück. Im Jahr gibt es halt eine Sommersonnenwende, eine Wintersonnenwende. **(Typ 37)**

**Fabian** (322):

Ich würde sagen, dass es je nach Gegend darauf ankommt, weil in der Wüste oder so, da ist das bestimmt auch der Fall oder so. Da gibt es ja auch keinen Wasserdampf, der entstehen kann. Und deshalb kommt es auch nicht zu Niederschlägen. **(Typ 38)**

**Jonas** (383-392):

Die Wolke wird vom Wind übers Land getrieben und dann ist die gerade über dem Gebiet (*unverständlich*). Wenn es dort sehr heiß ist, dann kommt heiße Luft hoch zur Wolke, dann regnet es. Wenn nicht, dann zieht sie wieder weiter. **(Typ 38)**

**INTERVIEW 10:**

**Bernd** (291-309, 397-435):

Wolken und Niederschlag entstehen, indem Wasserdampf von der Warmluft nach oben transportiert wird und sich dort dann sozusagen sammelt, weil es zu viel Wasserdampf ist. In den wechselfeuchten Tropen gibt es monatelang keine Niederschläge. Wenn die Luft herabsinkt bis auf 1000 Meter Höhe, nimmt die vielleicht nicht so viel Wasserdampf auf wie Luft, die 10 Meter oder 5 Meter über dem Boden ist. Und daher gelangt auch nicht so viel Wasserdampf in die obere Atmosphäre. So entstehen dann auch in dem Fall keine Wolken. 1000 Meter ist schon eine lange Zeit. Bis man das mit Wasserdampf füllt, das sind ja weiß Gott wie viel Kubikmeter. Millionen? Milliarden? Das dauert verdammt lange, diesen Bereich 0 - 1000 mit Wasserdampf aufzufüllen. Und der steigt ja auch erst mal hoch, bis es diese Schicht erreicht hat. Das heißt, es arbeitet sich langsam runter und irgendwann ist es ganz unten wieder. Und wenn es dort halt dann regnet, dann regnet es richtig, weil die ganze kalte Luft, also der Regen kühlt das dann ja ab und die ganze kalte Luft fällt durch den Regen runter, dann steigt die warme Luft von unten wieder auf und es regnet sich wieder ab. Und es kann ja dort diese monatelangen Regen hervorrufen. Wenn das feuchte Gebiet sich ganz auffüllt, dass dann hier vom Trockenen sozusagen Luftfeuchtigkeit entzogen wird und hier kommt halt wirklich viel Luftfeuchtigkeit hinzu. Deswegen wechselt das. **(Typ 38)**

**Jan** (397-435):

Wenn die wasserdampfhaltige Luft dann aufsteigt, gibt es eine Regenzeit und wenn die dann wieder abgesunken ist und solange sich das wieder auffüllt mit Wasserdampf ist eine Trockenzeit da. Oder es hängt damit zusammen aus welchen Gebieten, aus feuchten oder trockenen Gebieten, der Wind kommt. **(Typ 35,38)**

**Rainer** (397-435):

*(Stimmt Jan zu, dass sich Luft mit Wasserdampf auffüllen muss.)* **(Typ 38)**