

Rahmenkriterien für die didaktische Umsetzbarkeit
von
Modellen und Modell-Experimenten
im Geographieunterricht

Eine praxisorientierte und empirische Untersuchung
am Beispiel der Corioliskraft

Dissertation
der Fakultät für Geowissenschaften
der Ludwig-Maximilians-Universität München

vorgelegt von
Matthias Stober
Februar 2012

1. Gutachter: Prof. Dr. V. Kaminske

2. Gutachter: Prof. Dr. O. Baume

Tag der Disputation: 23.05.2012

Kurzfassung

Auch wenn die Ergebnisse der Pisa-Studien in Deutschland regional sehr stark variieren, wurde spätestens mit deren Analyse klar, dass unser Bildungssystem in seiner Gesamtheit methodisch und konzeptionell neue Impulse benötigt. Einen wichtigen Beitrag dazu kann das Konzept der „Bildung für nachhaltige Entwicklung“ darstellen, das vernetztes Denken zum Ziel hat und somit den Menschen ermöglicht, die Konsequenzen des eigenen Handelns besser abzuschätzen und zu reflektieren. Dabei kommt dem Fach Geographie als Beziehungswissenschaft und damit als Bindeglied zwischen den Gesellschaftswissenschaften und den Naturwissenschaften eine wichtige Position zu. Um diesen Gedanken zu verdeutlichen, soll im Hinblick auf die schulische Umsetzung dieser Position die naturwissenschaftliche Basis für das Phänomen der intensiv diskutierten Klimaverschiebung einer näheren inhaltlichen und methodischen Analyse unterzogen werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde exemplarisch das Thema „Corioliskraft“ aufgegriffen, weil es für das Verständnis einer Vielzahl klimatologischer Prozesse unabdingbar ist. Mehrere Erklärungs- und Beurteilungsschritte bauen hier aufeinander auf, um eine möglichst umfassende Beurteilungsgrundlage für die Einschätzung der darzustellenden klimatologischen Situation und daraus zu ziehender Folgen zu erreichen. Als Grundlage wurde zunächst die fachwissenschaftliche Basis sowie deren Umsetzung in eine modellhafte Darstellung beschrieben, diese dann mit der entwicklungspsychologischen Situation der Gymnasiasten in Beziehung gesetzt und in einem dritten Schritt diese Situation mit den Bildungsvorgaben der einzelnen Bundesländer konfrontiert. Dass Theorie (Bildungsvorgaben) und Praxis (tatsächlicher Unterricht) allerdings zweierlei Dinge sind, wurde mit Hilfe einer deutschlandweiten Umfrage festgestellt, die an insgesamt 140 Gymnasien durchgeführt wurde und das Ziel hatte, die konkrete Unterrichtssituation an den Schulen zu erfassen. Es zeigte sich, dass die Corioliskraft häufig fachlich falsch sowie methodisch-didaktisch ungeschickt unterrichtet wird und in der Thematik eine oft nur periphere Bedeutung besitzt.

Die im Rahmen der didaktischen Umsetzung untersuchten Modelle, Modell-Experimente und Visualisierungsansätze wurden deshalb im Hinblick auf ihre fachliche Korrektheit, die Qualität der Visualisierung, die Durchführbarkeit unter Unterrichtsbedingungen und nicht zuletzt hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit im Lernprozess bewertet. Dabei stellte sich heraus, dass sämtliche didaktischen Umsetzungen mit

Mängeln behaftet sind und der Grad der Vereinfachung sich gegensätzlich zum zeitlichen und apparativen Aufwand verhält.

Es galt also, ein möglichst praktikables Konzept zu entwickeln und auszutesten, mit dessen Hilfe das Thema Corioliskraft angepasst an das Leistungsniveau der jeweiligen Lerngruppe unterrichtet werden kann. Um dies zu erreichen wurden die Vorteile mehrerer vorhandener Erklärungsmöglichkeiten zielgenau so kombiniert, dass die Umsetzungen an den entsprechenden Stellen optimiert und durch eine anschauliche Visualisierung ergänzt werden konnten. Letztendlich entstand ein Modell, mit dessen Hilfe die Schüler das Phänomen der Corioliskraft selbst nachvollziehen können und das durch seinen modularen Aufbau an die jeweilige Lerngruppe und das jeweilige Unterrichtsziel angepasst werden kann. Dieses Modell ist fachlich richtig und trotzdem didaktisch so vereinfacht, dass es auch schon in der Mittelstufe des Gymnasiums (Kl. 7-10) eingesetzt werden kann. Weiterhin ist der apparative Aufwand sowie der Zeitbedarf so gestaltet, dass jede Schule in der Lage sein dürfte, dieses Modell im Klassensatz und in Einzelstunden einsetzen zu können. Durch Ergänzungen lässt sich das Grundmodell auch zu einem wirklichen Experiment erweitern, das reproduzierbare Ergebnisse liefert und die Schüler im Sinne der gymnasialen Wissenschaftspropädeutik an naturwissenschaftliche Arbeitsweisen heranführt.

Mit Hilfe des hier entwickelten und mehrfach erprobten Modells wird den Schülern ein Hilfsmittel an die Hand gegeben, ein schwieriges, bisher wenig anschauliches (und damit meist vernachlässigtes) Thema der Klimatologie und Meteorologie zu erschließen. Sie erhalten so die Möglichkeit, an konkreten Beispielen (z.B. den Passaten, den Monsunen, der atmosphärischen Zirkulation oder der Klimaverschiebung) das Prinzip von Ursache und Wirkung nachzuvollziehen und somit in interdisziplinären Ansätzen mögliche Zusammenhänge zu klären. Für die Lehrer ist dies ein wichtiger Weg, Schüler in ihrer Bildung für nachhaltige Entwicklung zu begleiten und ihnen inhaltliche Orientierungshilfen zu geben.

Insofern lässt sich das Ergebnis dieser Arbeit auch als Impuls für neue Bildungspläne verstehen.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----|
| Kurzfassung..... | I |
| Inhaltsverzeichnis | III |
| Abbildungsverzeichnis..... | VI |
| Danksagungen | XI |
| 1. Einleitung..... | 1 |
| 2. Theoretische Herleitung der Corioliskraft | 3 |
| 2.1. Vorüberlegungen..... | 3 |
| 2.2. Mathematische Herleitung..... | 3 |
| 2.3. Anschauliche Erklärung im Kontext klimatologischer Fragestellungen..... | 15 |
| 3. Entwicklungspsychologische Betrachtung..... | 28 |
| 4. Die Corioliskraft in den Bildungs- und Lehrplänen..... | 34 |
| 5. Möglichkeiten der didaktischen Umsetzung | 44 |
| 5.1. Modelle und Modell-Experimente..... | 45 |
| 5.1.1. Gezogenes Blatt | 47 |
| 5.1.2. Das Pappscheibenmodell | 49 |
| 5.1.3. Der Schreibglobus | 52 |
| 5.1.4. Stummer Globus mit Wassertropfen | 56 |
| 5.1.5. Rotierender Kegelstumpf | 58 |
| 5.1.6. Modelle und Modell-Experimente auf rotierenden Scheiben..... | 61 |
| 5.1.7. Das Flachsüsselmodell | 65 |
| 5.1.8. Das Nachspiel-Modell | 67 |
| 5.2. Deskriptive Erklärungen | 68 |
| 5.2.1. Der Joggeransatz..... | 69 |
| 5.2.2. Erklärung mit Hilfe des Querschnitts einer Kugel..... | 71 |
| 5.2.3. Die Corioliskraft im Vektorraum | 73 |
| 5.2.4. Argumentation über die vereinfachte Formel | 76 |

| | | |
|----------|---|-----|
| 5.3. | Einsatz von audiovisuellen und interaktiven Medien | 77 |
| 5.3.1. | Arbeitsblatt Geogebra | 78 |
| 5.3.2. | Interaktive Software „Corioliskraft“ | 80 |
| 5.3.3. | Webgeo-Module..... | 81 |
| 5.3.4. | Lernvideos | 83 |
| 5.3.4.1. | „Die Kraft, die keine ist“ | 83 |
| 5.3.4.2. | University of Illinois: Corioliskraft und Kinderkarussell | 85 |
| 5.3.4.3. | alpha-Centauri: Was ist die Corioliskraft?..... | 86 |
| 5.4. | Zusammenfassung und Bewertung..... | 87 |
| 6. | Die Corioliskraft im Unterricht – Ergebnisse einer bundesweiten Umfrage | 91 |
| 6.1. | Wahl der Stichprobe..... | 92 |
| 6.2. | Gestaltung des Fragebogens | 93 |
| 6.3. | Interpretation der Umfrageergebnisse..... | 97 |
| 6.3.1. | Rückmeldungen | 97 |
| 6.3.2. | Klassenstufen | 101 |
| 6.3.3. | Benennung..... | 103 |
| 6.3.4. | Erklärungsmöglichkeiten..... | 105 |
| 6.3.5. | Didaktische Reduktion | 107 |
| 6.3.6. | Material | 110 |
| 6.3.7. | Zufriedenheit mit dem Unterrichtsmaterial | 111 |
| 6.3.8. | Fachliche Sicherheit..... | 113 |
| 6.3.9. | Probleme bei der Vermittlung der Corioliskraft..... | 115 |
| 6.4. | Zusammenfassung und Forderungen | 115 |
| 7. | Visualisierung der Kernforderungen am Beispiel geeigneter Modelle | 118 |
| 8. | Ein möglicher Lösungsansatz..... | 124 |
| 8.1. | Übergang der Dreidimensionalität in die Zweidimensionalität | 125 |
| 8.2. | Optimierung der Modelle und Modell-Experimente auf der Drehscheibe | 128 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 8.3. | Retransformation in den dreidimensionalen Raum..... | 134 |
| 8.4. | Erweiterungsmöglichkeiten | 137 |
| 8.4.1. | Rotationsgeschwindigkeit der Platte | 139 |
| 8.4.2. | Teilchengeschwindigkeit | 140 |
| 8.4.3. | Teilchenmasse | 141 |
| 8.4.4. | Videoanalyse | 141 |
| 8.5. | Bewertung | 145 |
| 9. | Zusammenfassung und Fazit | 148 |
| 10. | Literatur- und Quellenverzeichnis | 150 |
| 10.1. | Sekundärliteratur | 150 |
| 10.2. | Zitierte Schulbücher | 153 |
| 10.3. | Bildungspläne..... | 153 |
| 10.4. | Eingesetzte Software | 154 |
| 11. | Anhang | 156 |
| 11.1. | Liste der angeschriebenen Schulen | 156 |
| 11.2. | Schulen, an denen Lehrerinterviews durchgeführt wurden | 158 |
| | Lebenslauf..... | 159 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|----------|--|----|
| Abb. 1: | Beobachter im Inertialsystem und im rotierenden System | 4 |
| Abb. 2: | Kartesische Koordinaten im Inertialsystem | 5 |
| Abb. 3: | Inertialsystem mit Ortsvektor r | 5 |
| Abb. 4: | Inertialsystem (rot) mit rotierendem System (blau) | 6 |
| Abb. 5: | Beispielhafte Bahngeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Breitengrad | 15 |
| Abb. 6: | Abhängigkeit der Geschwindigkeit vom Breitengrad..... | 16 |
| Abb. 7: | Bewegung ausgewählter Luftteilchen in meridionaler Richtung (polwärts) | 17 |
| Abb. 8: | Bahngeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der geographischen Breite | 18 |
| Abb. 9: | Bewegung ausgewählter Luftteilchen in meridionaler Richtung (äquatorwärts)..... | 19 |
| Abb. 10: | Erhöhung der Zentrifugalkraft durch zusätzliche Eigengeschwindigkeit nach Osten | 21 |
| Abb. 11: | Zerlegung der zusätzlichen Zentrifugalkraft in eine radiale und eine tangentielle Komponente. | 22 |
| Abb. 12: | Zerlegung der verringerten Zentrifugalkraft in eine radiale und eine tangentielle Komponente..... | 23 |
| Abb. 13: | Meridional, polwärts gerichtete Bewegung ausgewählter Luftteilchen auf der Südhalbkugel (vereinfachte Darstellung)..... | 24 |
| Abb. 14: | Meridional, äquatorwärts gerichtete Bewegung ausgewählter Luftteilchen auf der Südhalbkugel (vereinfachte Darstellung)..... | 25 |
| Abb. 15: | Zerlegung der zusätzlichen Zentrifugalkraft in eine radiale und eine tangentielle Komponente (Südhalbkugel) | 25 |
| Abb. 16: | Experiment zur Drehbewegung von Levin, Siegler und Druyan..... | 30 |
| Abb. 17: | Die Corioliskraft in den Bildungsvorgaben der Bundesländer..... | 41 |
| Abb. 18: | Modell „gezogenes Blatt“ | 47 |
| Abb. 19: | Skizze „gezogenes Blatt“ | 48 |
| Abb. 20: | Skizze Pappscheibenmodell (Nagy, 1999, S. 43)..... | 49 |
| Abb. 21: | Skizze Pappscheibenmodell (Forkel, 2008)..... | 50 |

| | | |
|----------|---|----|
| Abb. 22: | Darstellung der Corioliskraft am Schreibglobus bei äquatorwärts gerichteter Bewegung..... | 52 |
| Abb. 23: | Darstellung der Corioliskraft am Schreibglobus bei polwärts gerichteter Bewegung..... | 53 |
| Abb. 24: | Der Monsun in Südostasien (Flath, 2010, S. 189) | 54 |
| Abb. 25: | Darstellung der Corioliskraft am Schreibglobus bei N-S-Bewegung und Äquatorübertritt | 55 |
| Abb. 26: | Plastikball mit Wassertropfen (Fraedrich, 1997, S. 13)..... | 56 |
| Abb. 27: | Wassertropfen auf einem Schreibglobus | 57 |
| Abb. 28: | Konstruktionsskizze des Modells "rotierender Kegelstumpf-Mantel" (Wolf, 1952/1953, S. 241)..... | 58 |
| Abb. 29: | Äquatorwärts gerichtete Bewegungen im Modell "rotierender Kegelstumpf-Mantel" (Wolf, 1952/1953, S. 241)..... | 59 |
| Abb. 30: | Variation des Modells "rotierender Kegelstumpf-Mantel" bei gleichzeitiger Darstellung von pol- und äquatorwärts gerichteten Bewegungen (Wolf, 1952/1953, S. 242, leicht verändert)..... | 60 |
| Abb. 31: | Kugel auf einer rotierenden Scheibe (Muckenfuß, 1997, S. 20) | 61 |
| Abb. 32: | Ablenkung einer Kugel auf einer rotierenden Scheibe (Muckenfuß, 1997, S. 20) | 62 |
| Abb. 33: | Schematischer Versuchsaufbau auf rotierender Scheibe mit Kameras in beiden Bezugssystemen (Diehl u.a., 2008, entnommen aus Video)..... | 62 |
| Abb. 34: | Versuchsaufbau auf rotierender Scheibe mit Kameras in beiden Bezugssystemen (Diehl u.a., 2008, entnommen aus Video) | 63 |
| Abb. 35: | Darstellung der Bahn eines äquatorwärts gerichteten Luftteilchens auf der Südhalbkugel aus zwei verschiedenen Kameraperspektiven (Diehl u.a., 2008, leicht verändert, entnommen aus Video)..... | 64 |
| Abb. 36: | Flachschüsselmodell (Klaus, Janßen, 1982, S. 38) | 65 |
| Abb. 37: | Projektion des Flachschüsselmodells (Klaus, Janßen, 1982, S. 37)..... | 66 |
| Abb. 38: | Nachspiel-Modell der Corioliskraft (Nagy, 1999, S. 42) | 67 |
| Abb. 39: | Joggeransatz, polwärts | 69 |
| Abb. 40: | Joggeransatz, äquatorwärts..... | 70 |

| | | |
|----------|--|----|
| Abb. 41: | Bahngeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der geographischen Breite (Obermann, 1999, S. 21)..... | 71 |
| Abb. 42: | Ablenkung durch die Corioliskraft (Obermann, 1999, S. 21)..... | 72 |
| Abb. 43: | Darstellung der Ablenkung durch die Corioliskraft (Falk, Scholliers, 2010, S. 80) | 73 |
| Abb. 44: | Darstellung der Wirkung der Corioliskraft mit Hilfe von Vektorpfeilen (Latz, 2011, S. 35) | 74 |
| Abb. 45: | Darstellung der Wirkung der Corioliskraft mit Hilfe von Vektorpfeilen (Häckel, 1990, S. 203) | 75 |
| Abb. 46: | Darstellung der Wirkung der Corioliskraft mit Hilfe von Vektorpfeilen (Falk, Scholliers, 2010, S. 80)..... | 76 |
| Abb. 47: | Darstellung der Beeinflussung einer äquatorwärts gerichteten Bewegung durch die Corioliskraft mit Hilfe der interaktiven Geometriesoftware GeoGebra (Screenshot) | 78 |
| Abb. 48: | Darstellung der Beeinflussung einer polwärts gerichteten Bewegung durch die Corioliskraft mit Hilfe der interaktiven Geometriesoftware GeoGebra (Screenshot) | 79 |
| Abb. 49: | Interaktive Software "Corioliskraft" (Roth, 2005, Screenshot)..... | 80 |
| Abb. 50: | Webgeo-Modul „Bezugssysteme“ (Schnirch, o. J., Screenshot)..... | 81 |
| Abb. 51: | Raketenflug-Experiment (Schnirch, 2004, Screenshot)..... | 82 |
| Abb. 52: | Video "Die Kraft, die keine ist" – Bahngeschwindigkeiten (Knoll, Schumann, 2003, Screenshot) | 83 |
| Abb. 53: | Video "Die Kraft, die keine ist" – Ablenkung (Knoll, Schumann, 2003, Screenshot) | 84 |
| Abb. 54: | Video zur Corioliskraft (Department of Atmospheric Sciences at the University of Illinois at Urbana-Champaign, Screenshots)..... | 85 |
| Abb. 55: | Coriolis-Karussell (Swiss Science Center Technorama, www.technorama.ch) | 86 |
| Abb. 56: | alpha-Centauri „Was ist die Corioliskraft?“ (Lesch, 2005, entnommen aus Video)..... | 86 |
| Abb. 57: | Fragebogen, Seite 1 | 95 |
| Abb. 58: | Fragebogen, Seite 2 | 96 |
| Abb. 59: | Rücklauf nach Bundesländern | 98 |

| | | |
|----------|--|-----|
| Abb. 60: | Rückmeldequote in Verbindung mit dem Bildungsplanbezug nach Bundesländern..... | 99 |
| Abb. 61: | Rückmeldequote nach Bildungskooperationen..... | 100 |
| Abb. 62: | Thematisierung der Corioliskraft nach Jahrgangsstufen (Nennungen)..... | 101 |
| Abb. 63: | Thematisierung der Corioliskraft nach Klassenstufen. Aufgeschlüsselt nach Bundesländern..... | 102 |
| Abb. 64: | Benennung des Phänomens mit der Bezeichnung „Corioliskraft“ (Nennungen)..... | 103 |
| Abb. 65: | Benennung des Phänomens mit der Bezeichnung „Corioliskraft“. Aufgeschlüsselt nach Bundesländern..... | 104 |
| Abb. 66: | Erklärungsmöglichkeiten (Nennungen)..... | 105 |
| Abb. 67: | Didaktische Reduktion wichtiger Erklärungsaspekte | 107 |
| Abb. 68: | Didaktische Reduktion. Aufgeschlüsselt nach Zweifächern..... | 108 |
| Abb. 69: | Eingesetzte Materialien (Nennungen)..... | 110 |
| Abb. 70: | Zufriedenheit mit dem Unterrichtsmaterial (Nennungen) | 111 |
| Abb. 71: | Zufriedenheit mit dem Unterrichtsmaterial nach Bundesländern | 111 |
| Abb. 72: | Zufriedenheit: Abweichung einzelner Lehrergruppen vom Mittelwert der Gesamtstichprobe (82,3 Prozent)..... | 112 |
| Abb. 73: | Fachliche Sicherheit (Nennungen)..... | 113 |
| Abb. 74: | Fachliche Sicherheit: Abweichungen einzelner Lehrergruppen vom Mittelwert der Gesamtstichprobe (67,9 Prozent)..... | 114 |
| Abb. 75: | Probleme bei der Vermittlung (Nennungen) | 115 |
| Abb. 76: | Visualisierung der Kernforderungen | 118 |
| Abb. 77: | Visualisierung der Kernforderungen am Beispiel des gezogenen Blatts..... | 119 |
| Abb. 78: | Visualisierung der Kernforderungen am Beispiel des Schreibglobus | 120 |
| Abb. 79: | Visualisierung der Kernforderungen am Beispiel des stummen Globus mit Wassertropfen | 121 |
| Abb. 80: | Visualisierung der Kernforderungen am Beispiel des rotierenden Kegelstumpfs | 122 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| Abb. 81: | Visualisierung der Kernforderungen am Beispiel von Modell-Experimenten auf rotierenden Scheiben (nach Muckenfuß)..... | 123 |
| Abb. 82: | Transformation einer dreidimensionalen Darstellung der Erde in die Zweidimensionalität (Knoll, Schumann, 2003, entnommen aus Video) | 125 |
| Abb. 83: | Transformation von der dreidimensionalen Erde auf eine zweidimensionale Darstellung mit Hilfe einer Kugellampe aus Papier (Erde als Kugel)..... | 126 |
| Abb. 84: | Transformation von der dreidimensionalen Erde auf eine zweidimensionale Darstellung mit Hilfe einer Kugellampe aus Papier (Erde als Scheibe)..... | 127 |
| Abb. 85: | Beschriftung der einzelnen Breitenkreise | 128 |
| Abb. 86: | Rampe mit Auslösevorrichtung..... | 129 |
| Abb. 87: | Befestigung der Auslösevorrichtung am „Äquator“ | 130 |
| Abb. 88: | Modell mit Papier zur Dokumentation der Bewegung | 131 |
| Abb. 89: | Arbeitsblatt zum Modell-Experiment zur Corioliskraft | 133 |
| Abb. 90: | Kugellampe mit meridional, polwärts gerichteter Luftströmung..... | 134 |
| Abb. 91: | Kugellampe mit abgelenkter Luftströmung | 135 |
| Abb. 92: | Übertragung der Rechtsablenkung in die Dreidimensionalität | 136 |
| Abb. 93: | Versuchsergebnisse Moschny (Moschny, 2009, S. 73)..... | 138 |
| Abb. 94: | Antrieb des Modell-Experiments mit einem Elektromotor | 139 |
| Abb. 95: | Variation der Kugelgeschwindigkeit bei konstanter Rotationsgeschwindigkeit der Platte | 140 |
| Abb. 96: | Kamerapositionen..... | 141 |
| Abb. 97: | Rechtsablenkung der Kugel aus Sicht einer Kamera im rotierenden System..... | 142 |
| Abb. 98: | Videoanalyse mit Viana (Screenshot)..... | 143 |
| Abb. 99: | Zeichnerische Bestimmung des Radius im Auswertungsbild von Viana | 145 |
| Abb. 100: | Netzdiagramm zum möglichen Lösungsansatz | 146 |

Danksagungen

Die vorliegende Arbeit entstand auf Anregung von Herrn Prof. Dr. V. Kaminske im Zusammenhang mit meiner Tätigkeit am Staatlichen Seminar für Didaktik und Lehrerbildung (Gymnasien) Karlsruhe. Ich danke ihm ganz besonders für die Möglichkeit, diesen, für mich so interessanten Themenbereich, bearbeiten zu können, für seine wissenschaftliche Unterstützung, seine ständige Diskussionsbereitschaft, die zahlreichen Impulse und nicht zuletzt für die motivierenden Worte.

Herrn Prof. Dr. O. Baume danke ich für seine Bereitschaft, diese Arbeit als Zweitgutachter zu beurteilen und die damit verbundenen Anstrengungen und Verpflichtungen zu übernehmen.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die durch den fachlichen Diskurs, die Teilnahme an der Umfrage und den Fachlehrerinterviews und die Bereitschaft, mir ihre Klassen zum Testen des vorgestellten Modells zur Verfügung zu stellen, diese Arbeit erst ermöglichten.

1. Einleitung

Tropische Wirbelstürme wie Taifune und Hurrikans, sowie Medicanes aber auch Dürren, Starkniederschläge und andere Wetter- und Klimakatastrophen beherrschen immer wieder die Nachrichtensendungen und die Titelseiten der Zeitungen und Zeitschriften. Prognosen zufolge werden diese Ereignisse auf Grund des Klimawandels immer häufiger auftreten und auch Orte heimsuchen, die bisher weitgehend verschont geblieben sind. Doch wen und welche Regionen werden diese Katastrophen in Zukunft häufiger treffen? Diese Frage beschäftigt auch die Schule und hier vor allen Dingen das Fach Geographie. Zu ihrer Beantwortung muss man sich, ausgehend von den geographischen Gegebenheiten, zunächst einmal mit den physikalischen Prozessen in unserer Atmosphäre und ihrem Einfluss auf die globale Zirkulation beschäftigen. Den initialen Faktor stellt dabei die Erderwärmung dar, die den Energiegehalt der gesamten Atmosphäre bestimmt, durch unterschiedliche Einstrahlwinkel aber auch zu größeren Temperaturunterschieden führt. Durch starke Konvektionsvorgänge, welche wiederum die thermischen Bedingungen der Klimazonen bestimmen, werden die sich in Luftdruckgegensätzen bemerkbar machenden Wärmeunterschiede ausgeglichen. Bei diesen großräumigen Bewegungen fließen die Luftmassen aber nicht einfach nur vom Hoch zum Tief, sondern werden durch die Corioliskraft¹ abgelenkt und damit durch die Drehung der Erde beeinflusst.

Dabei stellt die Corioliskraft einen Schlüssel zum Verständnis von globalen Windsystemen, Meeresströmungen sowie der Verschiebung der Klimazonen dar und kann deshalb auch als Indikator klimageographischen Wissens und damit fächerverbindender naturwissenschaftlicher Inhalte angesehen werden, wie sie auch in den letzten Jahren in den PISA-Studien evaluiert wurden.

Erst durch Einbeziehung der Corioliskraft lassen sich die Folgen der Klimaerwärmung exakt kausal bestimmen, verstehen, berechnen und simulieren.

¹ Obwohl es sich bei der Corioliskraft um eine Scheinkraft handelt und das Phänomen korrekterweise als Coriolisscheinkraft, Coriolisablenkung oder noch besser als Coriolisscheinablenkung bezeichnet werden müsste, wird im Rahmen dieser Arbeit aus Gründen der Lesbarkeit ausschließlich der Begriff Corioliskraft verwendet.

Doch in wie weit werden Schüler² im Geographieunterricht unserer Gymnasien mit diesen klimatologischen Grundlagen vertraut gemacht? Herrscht in den Klassenzimmern das von Lethmate beschriebene „Ich-bin-Germanistin“-Symptom³ vor und damit von Lehrerseite eine mehr oder weniger deutliche Ablehnung physisch-geographischer Inhalte oder werden von den Lehrkräften gemäß ihrer Lehraufgabe auch schwierige naturwissenschaftliche Themen kompetent und altersgerecht vermittelt? Diesen Fragen versuche ich im Rahmen dieser Arbeit nachzugehen und in ihrer Bedeutung für den Geographieunterricht zu bewerten.

Zunächst einmal wäre die Entstehung der Corioliskraft und ihre mathematische Herleitung zu betrachten und damit das fachwissenschaftliche Fundament dieser Untersuchung klarzulegen. Zur Bewertung verschiedener didaktischer Umsetzungen dienen als Grundlage sowohl entwicklungspsychologische Betrachtungen als auch die bildungspolitischen Vorgaben der einzelnen Bundesländer, die in unserem föderalistischen System deutlich variieren. Eine Status-quo-Analyse der tatsächlichen Unterrichtsrealität beim Thema Corioliskraft war der erste Schritt und sollte auf Basis einer bundesweiten Umfrage erstellt und mit Hilfe einer Vielzahl von Fachlehrerinterviews genauer analysiert werden. Davon ausgehend ließen sich didaktische Verständnisprobleme erkennen, hieraus Kernforderungen an eine optimale unterrichtliche Umsetzung der Corioliskraft ableiten und in ein praktikables Modell umsetzen. Dieses erfüllt, trotz seiner Einfachheit, nahezu alle Anforderungen und weist zusätzlich den Vorteil auf, modular erweiterbar zu sein.

Das Hauptziel dieser Arbeit ist also, den Schülern ein zentrales Werkzeug zum Verständnis klimatologischer Zusammenhänge an die Hand zu geben und ihnen damit zu ermöglichen, sich intensiv mit dem System Erde-Atmosphäre auseinanderzusetzen. Nur allein dadurch können die Jugendlichen befähigt werden, potentielle Folgen des Klimawandels zu realisieren, Rückkopplungen zu verstehen, Abhängigkeiten kritisch zu bewerten und ggf. ihr eigenes klimawirksames Handeln zu reflektieren.

² Im Zuge einer besseren Lesbarkeit werden in der Folge anstelle von „Schülerinnen und Schüler“ bzw. „Lehrerinnen und Lehrer“ die Begriffe „Schüler“ bzw. „Lehrer“ verwendet. Dies soll in keinerlei Hinsicht eine Abwertung der Schülerinnen bzw. der weiblichen Lehrkräfte darstellen.

³ vgl. Lethmate (2005), S. 273.

2. Theoretische Herleitung der Corioliskraft

2.1. Vorüberlegungen

Im Grunde lässt sich die Corioliskraft in nur einem Satz erklären: Es handelt sich hierbei um die Überlagerung zweier Bewegungen, nämlich der Erdrotation und der Eigenbewegung eines Teilchens.

Kognitiv sind diese Bewegungen allerdings nur schwer zu fassen, da die Betrachtung einerseits auf der gekrümmten Oberfläche einer Kugel stattfindet, andererseits aber auch das gesamte beobachtete System um seine eigene Achse rotiert. Erschwerend kommt hinzu, dass es sich bei der Corioliskraft um eine so genannte Scheinkraft handelt, die nur ein Beobachter, der sich auf der rotierenden Erde befindet, direkt erfahren kann.

Wissenschaftlich korrekt kann man die Corioliskraft und ihre Auswirkungen nur mathematisch beschreiben. Die Probleme dabei sind allerdings die geringe Anschaulichkeit und der hohe Abstraktionsgrad.

An dieser Stelle muss also zwischen einer mathematisch korrekten, aber auch anspruchsvollen *Herleitung* und einer anschaulichen, didaktisch reduzierten und vereinfachten *Erklärung* unterschieden werden.

2.2. Mathematische Herleitung

Nach Weltner bestimmt „die Wahl des Koordinatensystems, in dem ein physikalisches oder technisches Problem behandelt wird, [...] zu einem beträchtlichen Teil den Schwierigkeitsgrad und den Aufwand der Rechnung.“⁴ Dies ist insbesondere für die Betrachtung der Corioliskraft von Bedeutung, da hier zwischen zwei verschiedenen Koordinatensystemen unterschieden werden muss: Dies ist einerseits das *Inertialsystem*, andererseits das *rotierende System*.

⁴ Weltner (1988), S. 87.

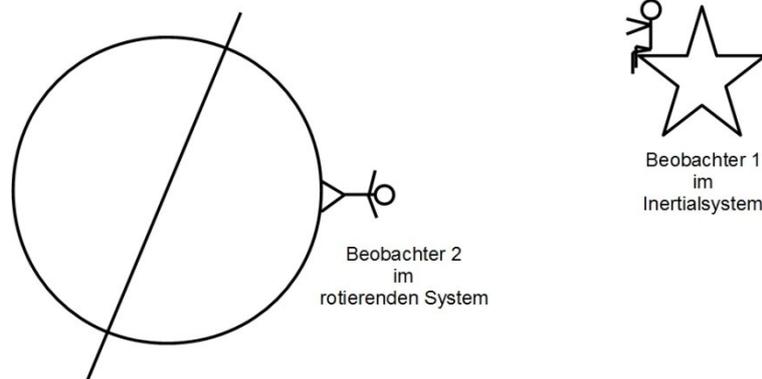


Abb. 1: Beobachter im Inertialsystem und im rotierenden System

Unter einem Inertialsystem (von lateinisch iners „untätig, träge“) versteht man ein ruhendes Bezugssystem, wie es einem im Fixsternhimmel verankerten Betrachter entspräche⁵ (vgl. Abb.1, Beobachter 1). Das rotierende System ist in unserem Fall die Erde, die sich mit konstanter Winkelgeschwindigkeit ω um ihre eigene Achse dreht. Dieses Bezugssystem entspricht dem eines Beobachters, der auf der Erdoberfläche steht und sich demnach mit diesem System bewegt (vgl. Abb.1, Beobachter 2).

Diese beiden Bezugssysteme lassen sich mathematisch mit Hilfe von Koordinatensystemen fassen. Im Rahmen dieser Ausarbeitung werden, wie beispielsweise auch bei Erdmann⁶, Etling⁷ oder Müller⁸, hierfür die kartesischen Koordinaten genutzt, die meines Erachtens den Rechenweg zwar geringfügig verlängern, den mathematischen Kenntnissen von Schülern aber eher entsprechen als beispielsweise Kugelkoordinaten.

⁵ vgl. Gobrecht, Bergmann, Schaefer (1975), S. 54.

⁶ vgl. Erdmann (2011), S. 50ff.

⁷ vgl. Etling (1996), S. 109ff.

⁸ vgl. Müller (2010), S. 344ff.

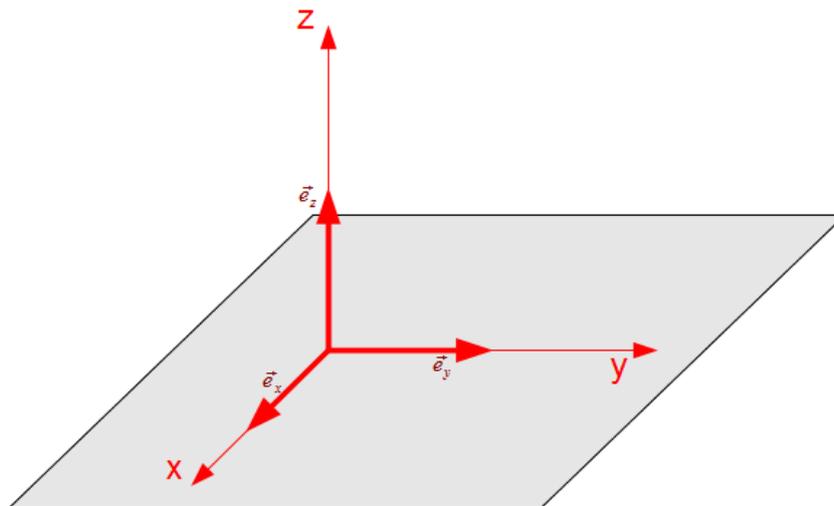


Abb. 2: Kartesische Koordinaten im Inertialsystem

Um eine Position im kartesischen Koordinatensystem darzustellen, werden unter anderem Einheitsvektoren genutzt, die ausschließlich eine Richtung angeben (hier x , y und z , der Betrag ist 1). Hierbei sind die Einheitsvektoren in Richtung der Koordinatenachsen von besonderer Bedeutung. Im dreidimensionalen Koordinatensystem bezeichnet man sie häufig mit \vec{e}_x , \vec{e}_y und \vec{e}_z (vgl. Abb. 2).

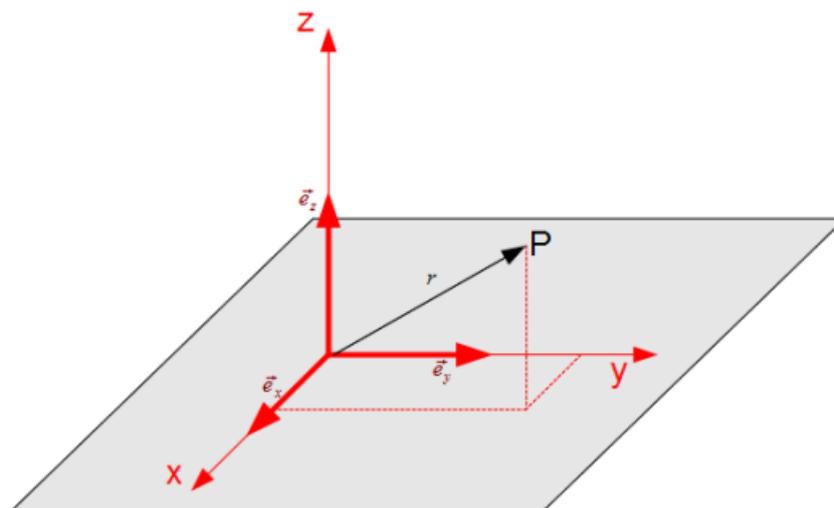


Abb. 3: Inertialsystem mit Ortsvektor r

Um einen Punkt eindeutig anzugeben, benötigt man nun noch jeweils einen Faktor, mit dem man den entsprechenden Einheitsvektor multipliziert. Ein Punkt P (x,y,z) lässt sich also mit den Komponenten $x \cdot \vec{e}_x$, $y \cdot \vec{e}_y$, $z \cdot \vec{e}_z$ beschreiben. Alternativ kann man diesen Punkt auch mit einem Ortsvektor \vec{r} angeben, der den Nullpunkt des Ko-

ordinatensystems mit dem Punkt P verbindet (vgl. Abb. 3). Dieser lässt sich nun als Summe der einzelnen Komponenten schreiben:

$$\vec{r} = x \cdot \vec{e}_x + y \cdot \vec{e}_y + z \cdot \vec{e}_z \quad (1)$$

Wenn sich der Punkt P bewegt, so muss zusätzlich noch der Zeitpunkt der Betrachtung berücksichtigt werden. Damit ändert sich die Formel nur unwesentlich:

$$\vec{r}(t) = x(t) \cdot \vec{e}_x + y(t) \cdot \vec{e}_y + z(t) \cdot \vec{e}_z \quad (2)$$

Mit dem Vektor $\vec{r}(t)$ wird also die Bewegung eines Teilchens in einem ruhenden kartesischen Koordinatensystem beschrieben. Dies entspricht auch der Betrachtung im Inertialsystem, also der eines im Fixsternhimmel ruhenden Beobachters (in den Abbildungen rot dargestellt).

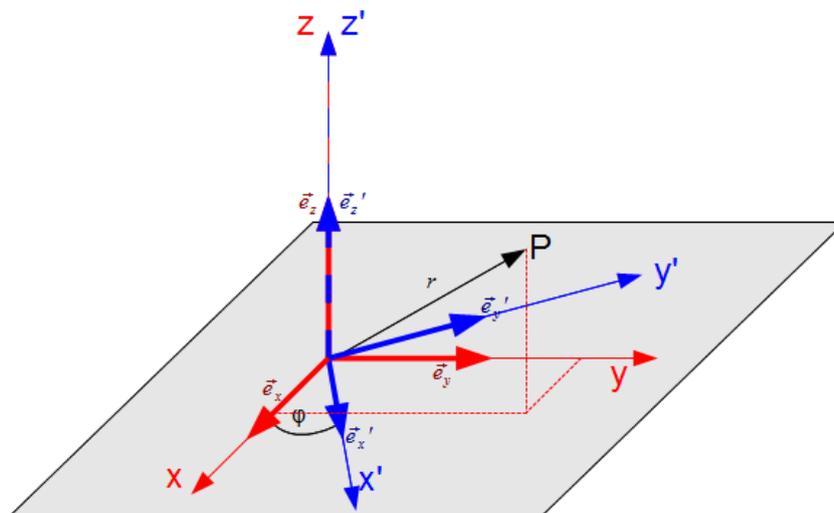


Abb. 4: Inertialsystem (rot) mit rotierendem System (blau)

Aus Sicht eines Beobachters auf der Erdoberfläche stellt sich die gleiche Situation etwas anders dar: Da der Beobachter ständig um die Erdachse rotiert, führt auch sein Bezugssystem diese Bewegung aus. Das neue Koordinatensystem (blau dargestellt) rotiert also ebenfalls um die Erdachse, die hier mit der z-Achse gleichzusetzen ist. Dies wird in Abb. 4 deutlich. Das ruhende Inertialsystem ist mit den Koordinatenachsen x, y und z dargestellt, das rotierende System, das hier um den Winkel φ gedreht ist, nutzt die Koordinatenachsen x', y' und z', wobei die z-Achsen und die Ur-

sprünge beider Systeme identisch sind. Betrachtet man jetzt wieder den Punkt P und den dazugehörigen Ortsvektor r , sieht man, dass diese sich nicht verändert haben. Es gilt also:

$$\vec{r}(t) = \vec{r}'(t)^9 \quad (3)$$

Im rotierenden Bezugssystem wird der Ortsvektor $\vec{r}'(t)$ durch folgende Gleichung dargestellt:

$$\vec{r}'(t) = x'(t) \cdot \vec{e}_{x'} + y'(t) \cdot \vec{e}_{y'} + z'(t) \cdot \vec{e}_{z'} \quad (4)$$

Nachdem bislang nur der Ort eines Teilchens betrachtet wurde, soll nun auf die Geschwindigkeit eingegangen werden. Generell gilt, dass die erste Ableitung der Ortsfunktion nach der Zeit¹⁰ die Geschwindigkeit angibt. In diesem Fall beschreibt \vec{v} also die Geschwindigkeit des Punktes P zum Zeitpunkt t . Demnach gilt:

$$\vec{v} = \dot{\vec{r}}^{11} \quad (5)$$

Bei der Ableitung muss nun die Produktregel¹² angewendet werden:

$$\begin{aligned} \dot{\vec{r}} &= \dot{x}\vec{e}_x + \dot{y}\vec{e}_y + \dot{z}\vec{e}_z \\ &+ x\dot{\vec{e}}_x + y\dot{\vec{e}}_y + z\dot{\vec{e}}_z \end{aligned} \quad (6)$$

Da das hier betrachtete Inertialsystem und das dazugehörige Koordinatensystem sich nicht bewegen, verändern sich die Einheitsvektoren \vec{e} nicht. Daher ergibt $\dot{\vec{e}}$ null, so dass die zweite Zeile der Gleichung 6 ebenfalls den Wert null besitzt und damit weggelassen werden kann.

⁹ Zur besseren Übersichtlichkeit werden auch die Gleichungen in den Farben der damit verbundenen Koordinatensysteme dargestellt (rot = Inertialsystem, blau = rotierendes Koordinatensystem).

¹⁰ Im Folgenden wird die erste Ableitung nach der Zeit mit einem Punkt dargestellt.

¹¹ Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird im Folgenden die Abhängigkeit von der Zeit nicht mehr explizit in den Gleichungen kenntlich gemacht. Demnach ist beispielsweise $\vec{v} = \vec{v}(t)$.

¹² Für die Ableitung eines Produktes zweier Funktionen gilt: $(uv) = \dot{u}v + u\dot{v}$

$$\vec{v} = \dot{x}\vec{e}_x + \dot{y}\vec{e}_y + \dot{z}\vec{e}_z \quad (7)$$

Versetzt man sich nun wieder in die Rolle eines fixen Beobachters von außen und beschreibt die Bewegung des Teilchens in den Koordinaten des rotierenden Systems, so müssen auch hier wieder die Koordinaten einmal nach der Zeit abgeleitet werden.

$$\vec{v}(x', y', z') = \dot{\vec{r}}' \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \dot{\vec{r}}' &= \dot{x}'\vec{e}_{x'} + \dot{y}'\vec{e}_{y'} + \dot{z}'\vec{e}_{z'} \\ &+ x'\dot{\vec{e}}_{x'} + y'\dot{\vec{e}}_{y'} + z'\dot{\vec{e}}_{z'} \end{aligned} \quad (9)$$

Da sich im rotierenden System die Richtungen der Einheitsvektoren ständig ändern, sind hier die Terme mit $\dot{\vec{e}}$ nicht unbedingt null, sie lassen sich also nicht wie im Inertialsystem einfach weglassen.

Zur besseren Lesbarkeit wird nun die erste Ableitung nach der Zeit, also \dot{x}' , \dot{y}' und \dot{z}' durch die Variable v' ersetzt.

$$\begin{aligned} \dot{\vec{r}}' &= v_x'\vec{e}_{x'} + v_y'\vec{e}_{y'} + v_z'\vec{e}_{z'} \\ &+ x'\dot{\vec{e}}_{x'} + y'\dot{\vec{e}}_{y'} + z'\dot{\vec{e}}_{z'} \end{aligned} \quad (10)$$

Verzichtet man nun auf die Schreibweise mit den Einheitsvektoren, lässt sich die Gleichung noch weiter vereinfachen:

$$\begin{aligned} \dot{\vec{r}}' &= \vec{v}' \\ &+ x'\dot{\vec{e}}_{x'} + y'\dot{\vec{e}}_{y'} + z'\dot{\vec{e}}_{z'} \end{aligned} \quad (11)$$

Ein Beobachter aus dem fixen Inertialsystem hat also zwei Möglichkeiten die Bewegung eines Teilchens zu beschreiben:

1. Er beschreibt einfach nur die Bewegung des Teilchens in seinem Koordinatensystem: $\vec{v} = \dot{x}\vec{e}_x + \dot{y}\vec{e}_y + \dot{z}\vec{e}_z$
2. Er beschreibt die Bewegung des Teilchens aus Sicht eines Beobachters auf der Erde \vec{v}' und die Bewegung des rotierenden Koordinatensystems $x'\dot{\vec{e}}_{x'} + y'\dot{\vec{e}}_{y'} + z'\dot{\vec{e}}_{z'}$.

Im bisherigen Rechenweg wurde die Bewegung des Koordinatensystems noch sehr allgemein betrachtet. Berücksichtigt man nun die Tatsache, dass es mit konstanter Winkelgeschwindigkeit ω um die z-Achse rotiert, kann der zweite Teil der Gleichung 10 weiter vereinfacht und umgeformt werden. „Bei Drehbewegungen gilt, daß die Bahngeschwindigkeit eines beliebigen Punktes das Vektorprodukt aus Winkelgeschwindigkeit und einem Ortsvektor von der Drehachse zum Punkt P ist.“¹³ Dies kann durch die allgemeingültige Formel $\vec{v} = \vec{\omega} \times \vec{r}$ bzw. $\dot{\vec{r}} = \vec{\omega} \times \vec{r}$ ausgedrückt werden. Überträgt man dies wieder auf die Darstellung durch Einheitsvektoren im rotierenden System, stellen sich die Ableitungen der einzelnen Vektoren nach der Zeit folgendermaßen dar:

$$\dot{\vec{e}}_{x'} = \vec{\omega} \times \vec{e}_{x'}$$

$$\dot{\vec{e}}_{y'} = \vec{\omega} \times \vec{e}_{y'}$$

$$\dot{\vec{e}}_{z'} = \vec{\omega} \times \vec{e}_{z'}$$

Setzt man diese Umformungen nun in die oben hergeleitete Gleichung 11 ($\dot{\vec{r}} = \vec{v}' + x'\dot{\vec{e}}_{x'} + y'\dot{\vec{e}}_{y'} + z'\dot{\vec{e}}_{z'}$) ein, so kann man Folgendes schreiben:

$$\begin{aligned} \dot{\vec{r}} &= \vec{v}' + \vec{\omega} \times x'\vec{e}_{x'} + \vec{\omega} \times y'\vec{e}_{y'} + \vec{\omega} \times z'\vec{e}_{z'} \\ &= \vec{v}' + \vec{\omega} \times \vec{r}' \end{aligned} \quad (12)$$

Wie am Anfang der Herleitung erwähnt, ist $\vec{r}(t) = \vec{r}'(t)$, so dass

¹³ Weltner (1987), S. 192.

$$\dot{\vec{r}} = \vec{v}' + \vec{\omega} \times \vec{r} \quad (13)$$

bzw.

$$\vec{v} = \vec{v}' + \vec{\omega} \times \vec{r} \quad (14)$$

ist.

Im Rahmen der bisherigen Herleitung wurden der Ort und die Geschwindigkeit eines Teilchens in den beiden Bezugssystemen beschrieben. Da das betrachtete Teilchen aber eine Rotationsbewegung ausführt und seine Richtung auf der Kreisbahn ständig ändert, muss es auch zu jedem Zeitpunkt eine Beschleunigung \vec{a} erfahren. Diese wird in der Physik durch die Bildung der zweiten Ableitung des Ortsvektors nach der Zeit¹⁴ berechnet. Die Beschleunigung des Teilchens im fixen Inertialsystem lässt sich also mit folgender Formel beschreiben:

$$\vec{a} = \ddot{x}\vec{e}_x + \ddot{y}\vec{e}_y + \ddot{z}\vec{e}_z \quad (15)$$

Auch hier versetzt man sich nun wieder in die Rolle eines fixen Beobachters von außen und beschreibt die Beschleunigung des Teilchens in den Koordinaten des rotierenden Systems. Anstelle der zweiten Ableitung des Ortes wird nun die erste Ableitung der Geschwindigkeit, die bereits hergeleitet wurde, genutzt.

$$\vec{a}(x', y', z') = \dot{\vec{v}} \quad (16)$$

$$\vec{a}(x', y', z') = (\vec{v}' + \vec{\omega} \times \vec{r})^{15} \quad (17)$$

Da die Ableitung der oben stehenden Gleichung relativ aufwendig und damit unübersichtlich ist, wird nun zunächst nur der Term \vec{v}' betrachtet. Auch hier wechselt man dazu in die Schreibweise mit Einheitsvektoren.

¹⁴ Im Folgenden wird die zweite Ableitung nach der Zeit mit zwei Punkten dargestellt.

¹⁵ Entgegen der üblichen Schreibweise $\frac{d}{dt}$ wird aus Gründen der Einheitlichkeit hier und auch im Folgenden die Ableitung nach der Zeit wieder mit einem Punkt markiert.

$$\vec{v}' = v_x' \vec{e}_{x'} + v_y' \vec{e}_{y'} + v_z' \vec{e}_{z'} \quad (18)$$

Es kommt wieder die Produktregel zum Einsatz:

$$\begin{aligned} \dot{\vec{v}}' &= \dot{v}_x' \vec{e}_{x'} + \dot{v}_y' \vec{e}_{y'} + \dot{v}_z' \vec{e}_{z'} \\ &+ v_x' \dot{\vec{e}}_{x'} + v_y' \dot{\vec{e}}_{y'} + v_z' \dot{\vec{e}}_{z'} \end{aligned} \quad (19)$$

Nun kann die Ableitung der Geschwindigkeitskomponenten durch die Beschleunigung a' ersetzt werden.

$$\begin{aligned} \dot{\vec{v}}' &= a_x' \vec{e}_{x'} + a_y' \vec{e}_{y'} + a_z' \vec{e}_{z'} \\ &+ v_x' \dot{\vec{e}}_{x'} + v_y' \dot{\vec{e}}_{y'} + v_z' \dot{\vec{e}}_{z'} \end{aligned} \quad (20)$$

Verlässt man jetzt wieder die Schreibweise mit den Einheitsvektoren, erhält man:

$$\begin{aligned} \dot{\vec{v}}' &= \vec{a}' \\ &+ v_x' \dot{\vec{e}}_{x'} + v_y' \dot{\vec{e}}_{y'} + v_z' \dot{\vec{e}}_{z'} \end{aligned} \quad (21)$$

Die unteren Terme lassen sich nun durch Einsetzen der oben hergeleiteten Gleichungen $\dot{\vec{e}}_{x'} = \vec{\omega} \times \vec{e}_{x'}$; $\dot{\vec{e}}_{y'} = \vec{\omega} \times \vec{e}_{y'}$; $\dot{\vec{e}}_{z'} = \vec{\omega} \times \vec{e}_{z'}$ und durch den Verzicht auf die Schreibweise mit Einheitsvektoren weiter vereinfachen.

$$\begin{aligned} \dot{\vec{v}}' &= \vec{a}' + \vec{\omega} \times v_x' \vec{e}_{x'} + \vec{\omega} \times v_y' \vec{e}_{y'} + \vec{\omega} \times v_z' \vec{e}_{z'} \\ &= \vec{a}' + \vec{\omega} \times \vec{v}' \end{aligned} \quad (22)$$

Nachdem bisher nur \vec{v}' betrachtet wurde, muss nun noch der zweite Term aus Gleichung 17 ($\vec{\omega} \times \vec{r}$) abgeleitet werden. Auch hier kommt wieder die Produktregel zum Einsatz.

$$(\vec{\omega} \times \vec{r}) = \dot{\vec{\omega}} \times \vec{r} + \vec{\omega} \times \dot{\vec{r}} \quad (23)$$

Da die Winkelgeschwindigkeit der Erde konstant ist und sich somit der Wert von ω nicht ändert, ist die Ableitung von ω gleich null. Damit vereinfacht sich die Gleichung weiter:

$$(\vec{\omega} \times \dot{\vec{r}}) = \vec{\omega} \times \dot{\vec{r}} \quad (24)$$

Hier lässt sich nun die Ableitung des Ortsvektors wieder durch die Geschwindigkeit ersetzen.

$$(\vec{\omega} \times \dot{\vec{r}}) = \vec{\omega} \times \vec{v} \quad (25)$$

Durch Einsetzen der oben hergeleiteten Gleichung 14 ($\vec{v} = \vec{v}' + \vec{\omega} \times \vec{r}$) folgt:

$$(\vec{\omega} \times \dot{\vec{r}}) = \vec{\omega} \times (\vec{v}' + \vec{\omega} \times \vec{r}) \quad (26)$$

Nun wird die Klammer ausmultipliziert:

$$(\vec{\omega} \times \dot{\vec{r}}) = \vec{\omega} \times \vec{v}' + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}) \quad (27)$$

Im nächsten Schritt werden die ab Gleichung 17 ($\vec{a}(x', y', z') = (\dot{\vec{v}}' + \dot{\vec{\omega}} \times \vec{r})$) getrennt betrachteten und umgeformten Terme für \vec{v}' und $(\vec{\omega} \times \vec{r})$ wieder zusammengeführt, so dass sich für die Beschleunigung \vec{a} die folgende Formel ergibt:

$$\begin{aligned} \vec{a}(x', y', z') &= \vec{a}' + \vec{\omega} \times \vec{v}' + \vec{\omega} \times \vec{v}' + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}) \\ &= \vec{a}' + 2(\vec{\omega} \times \vec{v}') + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}) \end{aligned} \quad (28)$$

Um nun die Beschleunigung des beobachteten Teilchens aus Sicht eines Betrachters innerhalb des rotierenden Systems – also auf der Erde – zu berechnen, löst man die Gleichung nach \vec{a}' auf.

$$\vec{a}' = \vec{a} - 2(\vec{\omega} \times \vec{v}') - \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}) \quad (29)$$

Anhand dieser Gleichung lässt sich erkennen, dass ein Beobachter im rotierenden System zusätzlich zur Beschleunigung im Inertialsystem (\vec{a}) (also der von außen beobachtbaren Beschleunigung) zwei weitere Beschleunigungen berücksichtigen muss. Dies ist einerseits die Coriolisbeschleunigung

$$\vec{a}_C = -2 (\vec{\omega} \times \vec{v}'), \quad (30)$$

andererseits die Zentrifugalbeschleunigung

$$\vec{a}_F = -\vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}). \quad (31)$$

Um die Beschleunigungen in Kräfte umzurechnen, nutzt man das physikalische Gesetz $F = m \cdot a$ und erhält:

Die Corioliskraft

$$\vec{F}_C = -2 m (\vec{\omega} \times \vec{v}') \quad (32)$$

und die Zentrifugalkraft

$$\vec{F}_Z = -m \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}). \quad (33)$$

Abschließend wird nun die Formel für die Corioliskraft in die Schreibweise umgewandelt, die in den meisten Schulbüchern eingesetzt wird. Dazu muss das Vektorprodukt durch eine Sinusfunktion ersetzt werden¹⁶, wobei φ die geographische Breite angibt:

$$F_C = 2 m \omega v \sin \varphi \quad (34)$$

¹⁶ vgl. z.B. Kittel u.a. (1986), S. 22.

Hierbei spricht man häufig auch von der vereinfachten Formel der Corioliskraft, da bei dieser Umformung der Vektorcharakter und damit die Richtung verlorengegangen ist. Es lässt sich also mit Hilfe dieser Gleichung lediglich der Betrag der Corioliskraft berechnen, der immer positiv sein muss. Aus diesem Grund wurde in Gleichung 34 das negative Vorzeichen weggelassen.

2.3. Anschauliche Erklärung im Kontext klimatologischer Fragestellungen

Wie bereits bei der mathematischen Herleitung, muss man auch für eine didaktisch veranschaulichte Erklärung¹⁷ ein bewegtes Teilchen aus unterschiedlichen Perspektiven und damit in verschiedenen Koordinatensystemen betrachten. Auch hier geht man von einem Inertialsystem und von einem rotierenden System aus.

Obwohl die Corioliskraft als Scheinkraft zu bezeichnen ist, gelten dennoch die Newtonschen Gesetze, wobei das erste Gesetz den Ausgangspunkt der anschaulichen Erklärung bildet:

„Erstes Newtonsches Gesetz: Ein Körper verharrt im Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen Bewegung (keine Beschleunigung), falls keine äußeren Kräfte auf ihn wirken, [...]“¹⁸

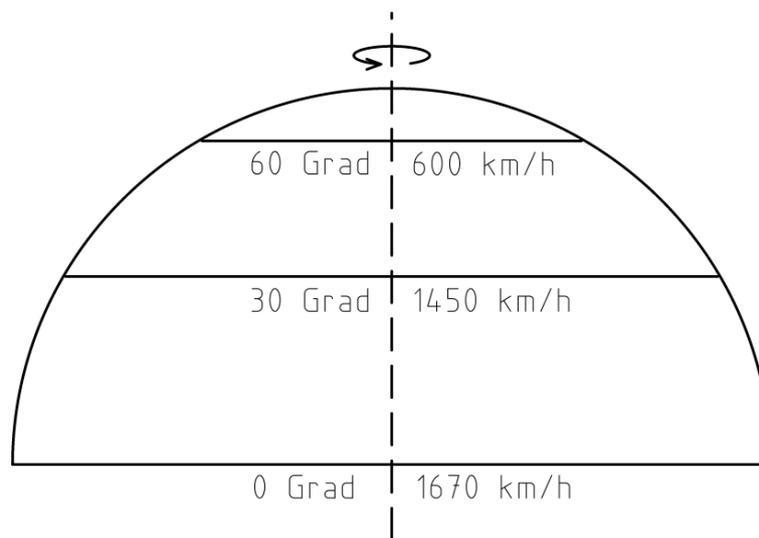


Abb. 5: Beispielhafte Bahngeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Breitengrad

Alternativ ließe sich auch über den Impulserhaltungssatz argumentieren: Der Impuls¹⁹ eines Teilchens bleibt erhalten, so lange keine äußeren Kräfte auf es wirken.²⁰ Man spricht dabei auch von der Trägheit der Masse. Dies ist eine Erfahrung aus dem täglichen Leben: Beim Bremsen eines Autos ändert sich dessen Geschwindigkeit

¹⁷ Für eine didaktisch veranschaulichte Erklärung bieten sich verschiedene Wege an. Diese sind dennoch teilweise sehr abstrakt, wie beispielsweise in Pohls Einführung in die Physik (Pohl, Lüders, 2004, S. 87ff). Deutlich anschaulicher aber dennoch korrekt sind dagegen einige eher populärwissenschaftliche Texte, wie beispielsweise die Ausführungen von Salzmann (Salzmann, 2009) oder die Erklärung in der „Wetterkunde für Piloten“ von Knapp (Knapp, 1990), denen ich hier in weiten Teilen folge.

¹⁸ Kittel u.a. (1986), S. 37.

¹⁹ Der Impuls ist definiert als Masse mal Geschwindigkeit: $p = m \cdot v$

²⁰ Falk, Ruppel (1989), S. 30f.

und damit sein Impuls, während der Fahrer seine Geschwindigkeit bzw. seinen Impuls zunächst beibehält. Damit ist der Fahrer schneller als das Auto und wird in den Sicherheitsgurt gedrückt. Erst dort wird der Impuls des Fahrers verringert bzw. an das Fahrzeug weitergegeben. Ähnliche Geschwindigkeitsänderungen treten auch bei bewegten Luftmassen in unserer Atmosphäre auf. Hierfür bietet es sich an, wie in Abb. 5, die Erde von der Seite, also mit Blick auf den Äquator zu betrachten. Ein Luftteilchen, das sich am Äquator befindet und sich gemeinsam mit der Erde und der Atmosphäre dreht, legt innerhalb von 24 Stunden einmal den Erdumfang²¹ zurück. Seine Geschwindigkeit beträgt also ca. 1670 km/h ($v = \frac{s}{t} = \frac{40\,000\text{ km}}{24\text{ h}}$).²² Betrachtet man nun ein Luftteilchen bei 30° nördlicher Breite, so verringert sich die Strecke, die das Teilchen in 24 Stunden zurücklegt auf ca. 34 660 km, so dass es sich nur noch mit ungefähr 1450 km/h bewegt.

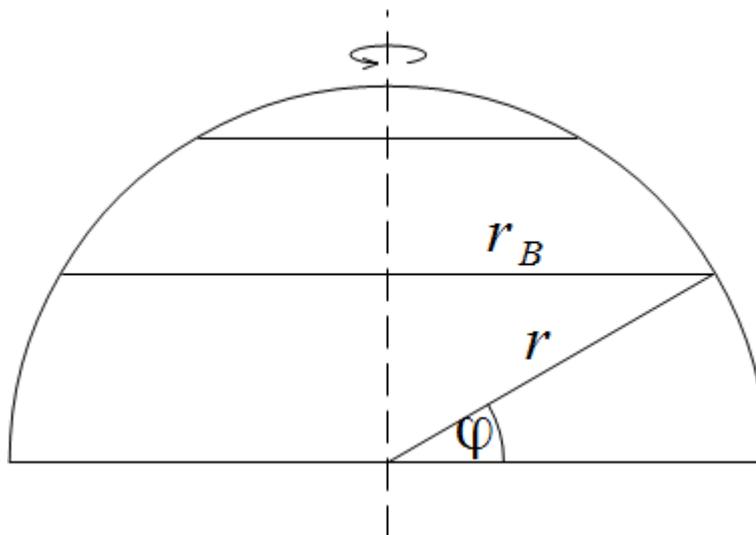


Abb. 6: Abhängigkeit der Geschwindigkeit vom Breitengrad

In Abb. 6 lässt sich erkennen, dass der Bahnradius r_B mit zunehmender geographischer Breite abnimmt. Rechnerisch gilt: $r_B = r \cdot \cos \varphi$, wobei r den mittleren Erdradius von ca. 6370 km und φ die geographische Breite angeben. Für die Bahngeschwindigkeit gilt also $v = \frac{s}{t} = \frac{2 \pi r_B}{t} = \frac{2 \pi r \cos \varphi}{t}$, wobei $t = 24\text{ h}$ für die Dauer einer Erdumdrehung steht.

²¹ Zur Vereinfachung wird der Erdumfang als Rechengröße mit dem Wert 40 000 km genutzt.

²² vgl. Häckel (1990), S. 203.

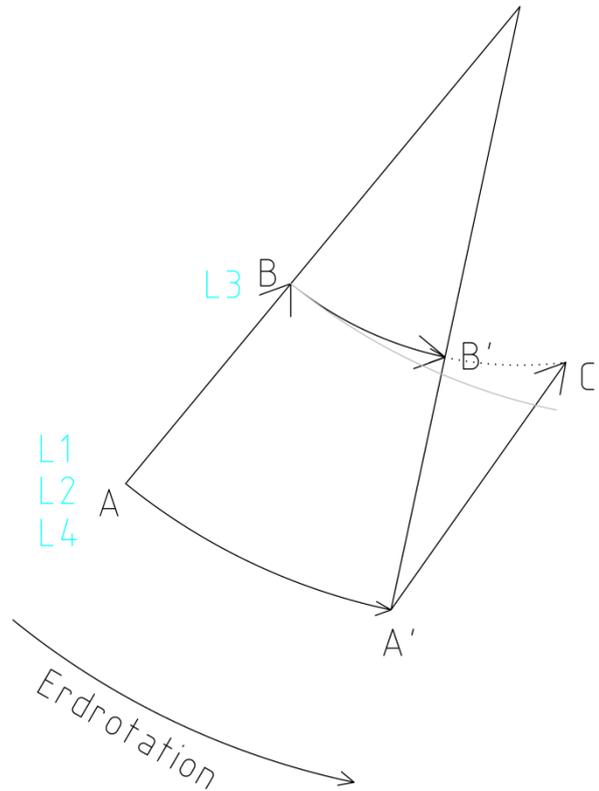


Abb. 7: Bewegung ausgewählter Luftteilchen in meridionaler Richtung (polwärts)

Luftteilchen bewegen sich aber normalerweise nicht nur breitenkreisparallel mit den Luftmassen, sondern haben meist durch Druckunterschiede auch eine meridionale Bewegungskomponente. Damit kommen sie in Bereiche anderer Breiten und damit anderer Bahngeschwindigkeiten. Es lassen sich nun vier verschiedene Bewegungen unterscheiden, die im Folgenden durch vier Luftteilchen verdeutlicht werden (vgl. Abb. 7). Zu Beginn dieses Gedankenmodells befinden sich die Luftteilchen L1, L2 und L4 an der Position A, während sich L3 an der Position B befindet. Für die Teilchen, die zunächst in den Koordinaten des Inertialsystems betrachtet werden, gelten aber unterschiedliche Voraussetzungen:

- L1 ist das einzige Teilchen, bei dem die Erdrotation unberücksichtigt bleiben soll. Es bewegt sich in meridionaler Richtung direkt nach Norden. Demzufolge erreicht es nach der Zeit t den Punkt B.
- L2 soll keine Bewegungskomponente in meridionaler Richtung aufweisen, folgt aber der Erdrotation. Demzufolge erreicht es nach der Zeit t den Punkt A'.

- L3 soll ebenfalls keine Bewegungskomponente in meridionaler Richtung aufweisen und folgt der Erdrotation. Da es in Punkt B startet und damit eine geringere Bahngeschwindigkeit als die anderen Teilchen hat, legt es in der Zeit t einen kürzeren Weg zurück und erreicht Punkt B'.
- L4 bewegt sich in meridionaler Richtung nach Norden. Bei ihm wird nun auch die Erdrotation berücksichtigt. Auf Grund seiner Trägheit behält es bei seiner Bewegung in meridionaler Richtung allerdings seine höhere Bahngeschwindigkeit (im Vergleich zu L3) bei. Die tatsächliche Bewegung, die L4 ausführt, ist also eine Überlagerung der Bewegungen von L1 und L2. Zum Zeitpunkt t hat es demnach in meridionaler Richtung die gleiche Strecke wie L1, in zonaler Richtung die gleiche Strecke wie L2 zurückgelegt. Da der Radius mit zunehmender geographischer Breite abnimmt, lässt sich aber der Kreisbogen von A nach A' nicht einfach verschieben (wie zur Anschauung in Abb. 7 grau dargestellt), sondern die Strecke muss auf den nun engeren Radius übertragen werden. Im Endeffekt erreicht L4 damit nach der Zeit t den Punkt C'.

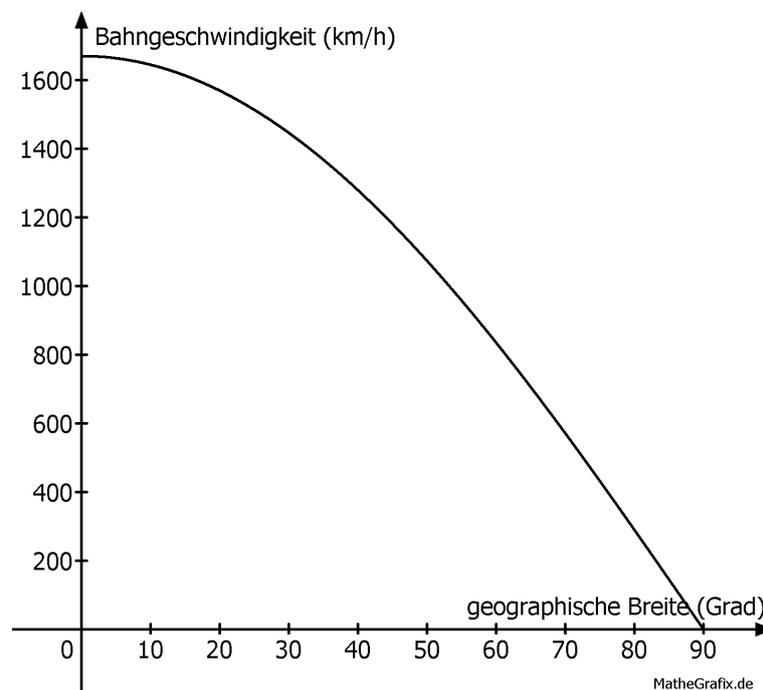


Abb. 8: Bahngeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der geographischen Breite

Versetzt man sich nun in die Lage eines Beobachters, der am Punkt A auf der rotierenden Erdoberfläche steht und dem nach Norden losfliegenden Teilchen nachschaut, so erwartet man, dass sich L4 geradeaus, entlang eines Meridians bewegt. Nach der Zeit t befindet sich der Beobachter an Punkt A'²³. Er stellt fest, dass sich L4 in Blickrichtung rechts neben der erwarteten meridionalen Bahn befindet. Das Teilchen hat für ihn also eine Ablenkung nach rechts erfahren. Dabei suggeriert Abb. 7, dass die Flugbahn des Teilchens mit einem konstanten Winkel vom Meridian abweicht. Dies stimmt allerdings nicht, da beim Erstellen der Abbildung nur zwei Punkte herausgegriffen wurden. Tatsächlich würde aus Sicht des Beobachters das Teilchen eine Kurvenbahn beschreiben, da die Bahngeschwindigkeit eines Punktes auf der Erdoberfläche mit zunehmender geographischer Breite nicht linear abnimmt, sondern der Kosinus in die Funktion eingeht (vgl. Abb. 8).

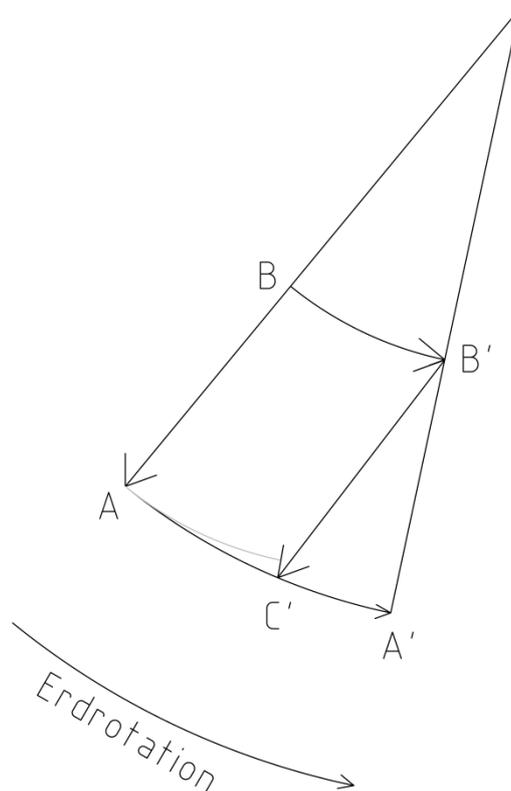


Abb. 9: Bewegung ausgewählter Luftteilchen in meridionaler Richtung (äquatorwärts)

²³ Da sich der Beobachter im rotierenden System befindet und er sich mit der Erde mitdreht, sind die Punkte A und A' für ihn identisch.

Betrachtet man nun Bewegungen vom Pol zum Äquator, stellt sich die Situation folgendermaßen dar (vgl. Abb. 9): Ein Luftteilchen befindet sich am Punkt B und bewegt sich in meridionaler Richtung auf Punkt A zu. Dabei behält es auf Grund seiner Trägheit seine niedrige Bahngeschwindigkeit bei, erreicht aber Gebiete mit höheren Bahngeschwindigkeiten. Es hat also eine geringere Bewegungskomponente in zonalen Richtung als seine Umgebung, so dass es gegenüber dieser zurückbleibt. In der Zeit t legt es also eine Distanz zurück, die der Strecke von B nach B' entspricht (in Abb. 9 grau eingezeichnet). Da das Luftteilchen aber einem Bogen mit größerem Radius folgen muss, erreicht es letztendlich nach der Zeit t den Punkt C'. Nun versetzt man sich in die Position eines Beobachters am Punkt B, der sich mit der Erde mitdreht, nach der Zeit t den Punkt B' erreicht und dem Teilchen hinterher schaut. Statt der erwarteten geradlinigen Bewegung beobachtet er wieder eine Ablenkung nach rechts.

Mit dieser Überlegung wird deutlich, dass sowohl bei polwärts als auch bei äquatorwärts gerichteten meridionalen Bewegungen auf der Nordhalbkugel für einen Beobachter im rotierenden System die Bewegung eines Luftteilchens nach rechts abgelenkt wird.

Während bisher nur Luftbewegungen betrachtet wurden, die (bei Vernachlässigung der Erdrotation) entlang der Meridiane verlaufen, soll der Fokus im Folgenden auf Luftteilchen gerichtet sein, die sich in zonalen Richtung, also mit oder entgegen der Erdrotation, bewegen.

Betrachtet man zuerst ein Luftteilchen, das sich mit der Erde mitdreht, also im rotierenden Koordinatensystem keine Eigengeschwindigkeit aufweist, so wirkt auf Grund der Kreisbewegung um die Erdachse eine Zentrifugalkraft \vec{F}_Z . Diese steht prinzipiell senkrecht auf der Erdachse und ihr Betrag wird von der breitenkreisabhängigen Bahngeschwindigkeit bestimmt.

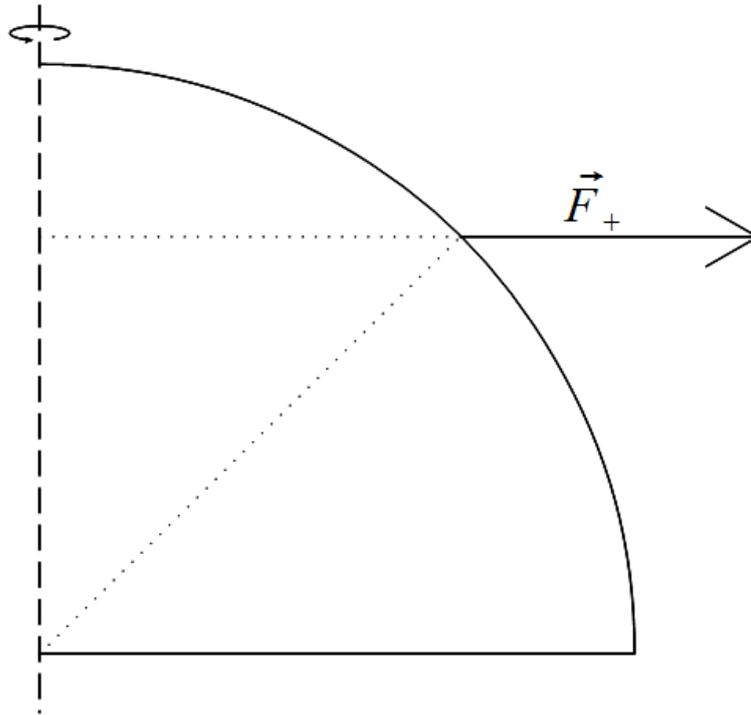


Abb. 10: Erhöhung der Zentrifugalkraft durch zusätzliche Eigengeschwindigkeit nach Osten

Richtet man nun den Blick auf ein Luftteilchen, das eine Eigengeschwindigkeit in zonaler Richtung hat, so addieren sich für einen Beobachter im Inertialsystem bei ostwärts gerichteten Bewegungen die Bahngeschwindigkeit der Erdoberfläche und die Eigengeschwindigkeit des Teilchens. Auf Grund dieser höheren Geschwindigkeit erfährt das mitgeführte Teilchen auch eine Zunahme der Zentrifugalkraft. Diese Erhöhung der Zentrifugalkraft wird in Abb. 10 als \vec{F}_+ ²⁴ dargestellt. Bereits jetzt kann man erkennen, dass für einen auf der Erde stehenden Beobachter, der dem bewegten Luftteilchen in Richtung Osten nachschaut, die zusätzlich ablenkende Kraft \vec{F}_+ nach rechts oben zeigt.

²⁴ Diese zusätzliche Komponente \vec{F}_+ wird beispielsweise bei Salzmänn als „Vertikale Komponente der Corioliskraft“ (Salzmänn, 2009, S. 5) bezeichnet.

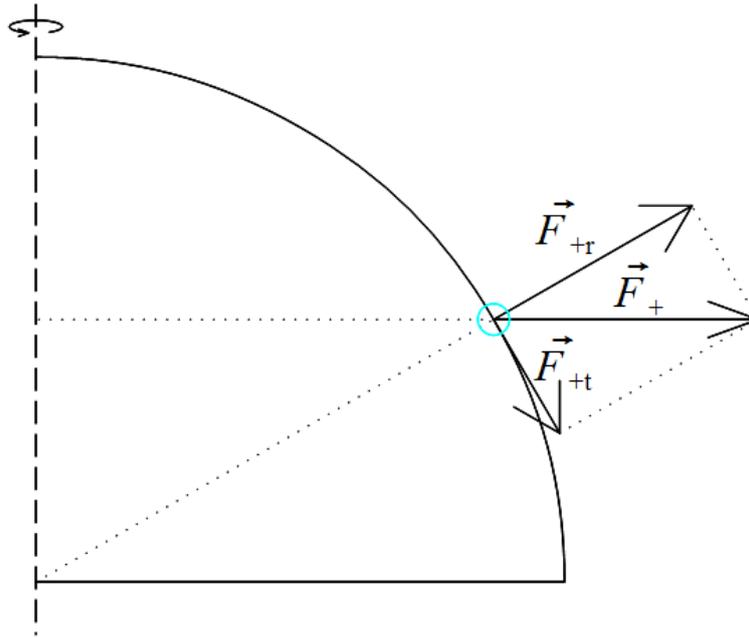


Abb. 11: Zerlegung der zusätzlichen Zentrifugalkraft in eine radiale und eine tangentielle Komponente. Dabei bewegt sich das blau eingezeichnete Luftteilchen nach Osten, also in die Zeichenebene hinein.

Deutlicher wird dies, wenn \vec{F}_+ in eine radiale (\vec{F}_{+r}) und eine tangentielle Komponente (\vec{F}_{+t}) zerlegt wird (vgl. Abb. 11). Da die radiale Komponente senkrecht auf der Erdoberfläche steht, kann diese keine Richtungsänderung für das Teilchen bedeuten. Die tangentielle (\vec{F}_{+t}) Komponente ist dagegen äquatorwärts gerichtet, so dass diese zur Ablenkung nach rechts führt.²⁵

²⁵ Führt man dieses Gedankenspiel weiter, so erhält das Teilchen nun auch wieder eine Bewegungskomponente in meridionaler Richtung. Es kommt also wieder, wie bereits beschrieben, in Bereiche anderer Bahngeschwindigkeiten usw.

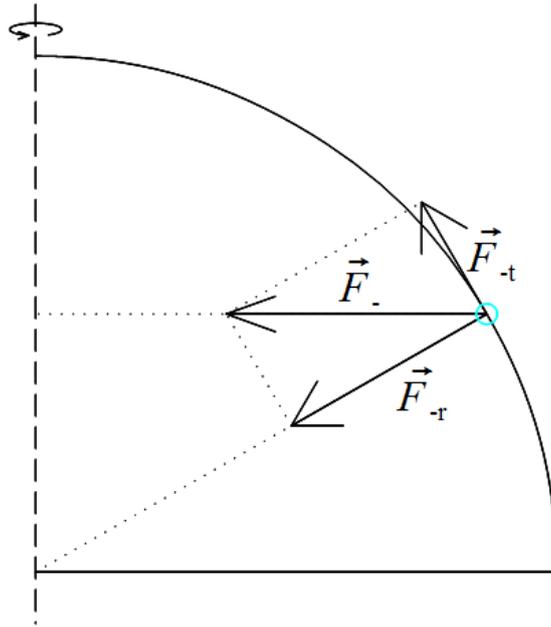


Abb. 12: Zerlegung der verringerten Zentrifugalkraft in eine radiale und eine tangentielle Komponente. Dabei bewegt sich das blau eingezeichnete Luftteilchen nach Westen, also aus der Zeichenebene heraus.

Hat das betrachtete Luftteilchen nun eine Bewegungskomponente in westlicher Richtung, so muss seine Eigengeschwindigkeit von der Bahngeschwindigkeit der Erdoberfläche subtrahiert werden. Demnach verändert sich die Zentrifugalkraft um \vec{F}_- . Diese Kraft ist (im Gegensatz zu \vec{F}_+) zur Erdachse hin gerichtet (vgl. Abb. 12). Spätestens nach der Zerlegung von \vec{F}_- in eine radiale (\vec{F}_{-r}) und eine tangentielle Komponente (\vec{F}_{-t}) wird wieder deutlich, dass es auch hier aus Sicht eines Beobachters, der dem Luftteilchen nachschaut, zur Ablenkung nach rechts kommt.

In der bisherigen Erklärung wurden Sonderfälle betrachtet, bei denen sich die Luftteilchen im rotierenden System entweder vollständig längen- oder breitenkreisparallel bewegen. Andere Richtungen lassen sich aber immer in eine meridionale und eine zonale Komponente zerlegen, die jeweils getrennt betrachtet und anschließend wieder zusammengeführt werden können. Demnach wird jedes entlang der Erdoberfläche bewegte Luftteilchen auf der Nordhalbkugel nach rechts abgelenkt.

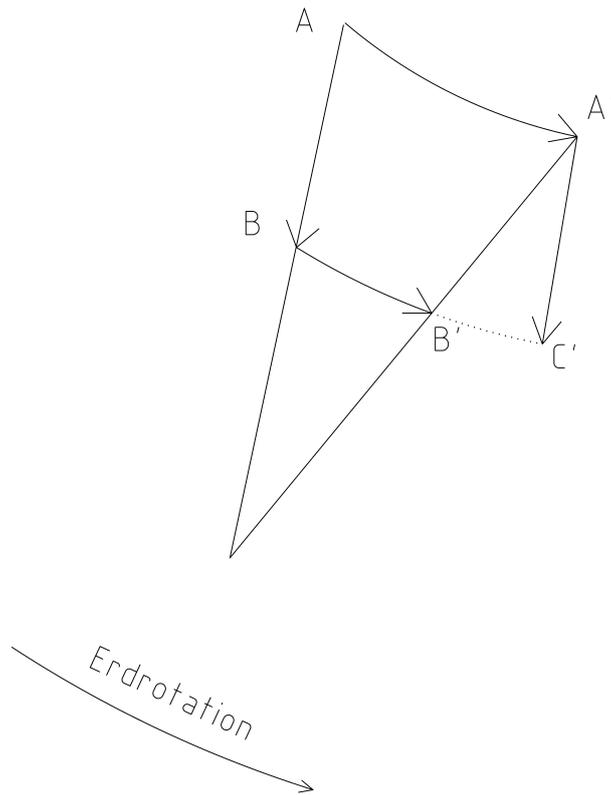


Abb. 13: Meridional, polwärts gerichtete Bewegung ausgewählter Luftteilchen auf der Südhalbkugel (vereinfachte Darstellung)

Auch auf der Südhalbkugel nimmt die Bahngeschwindigkeit polwärts ab. Betrachtet man ein Luftteilchen, das sich meridional in Richtung Südpol, also in Abb. 13 von A nach B bewegt, so kommt es aus Bereichen hoher in Bereiche niedriger Bahngeschwindigkeiten. Auch hier eilt es scheinbar den stationären Luftmassen voraus, so dass ein Beobachter, der dem Teilchen nachschaut, eine Ablenkung nach links erkennen kann (vgl. Abb. 13).

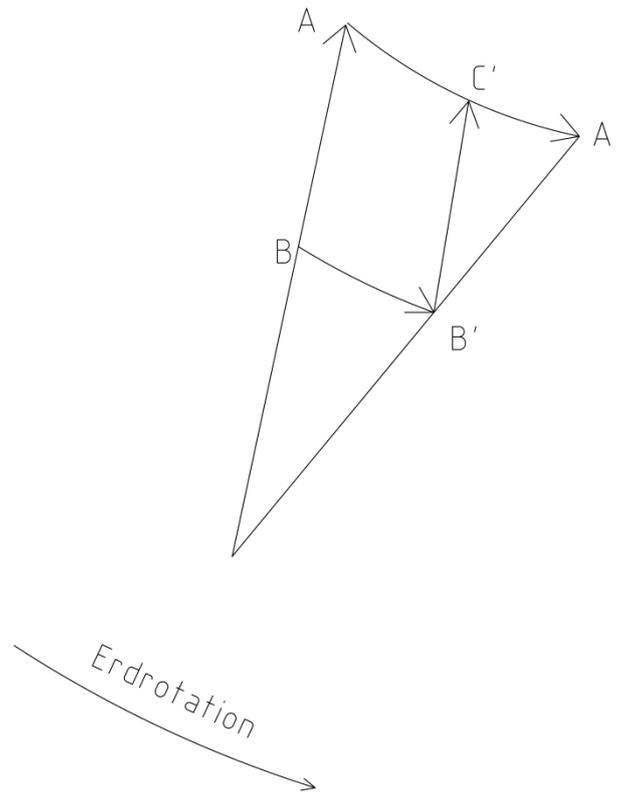


Abb. 14: Meridional, äquatorwärts gerichtete Bewegung ausgewählter Luftteilchen auf der Südhalbkugel (vereinfachte Darstellung)

Wandert nun ein Luftteilchen meridional in Richtung Äquator, so weist es eine geringere Bahngeschwindigkeit als die umliegenden Luftteilchen auf. Es lässt sich also wieder eine Ablenkung nach links erkennen (vgl. Abb. 14).

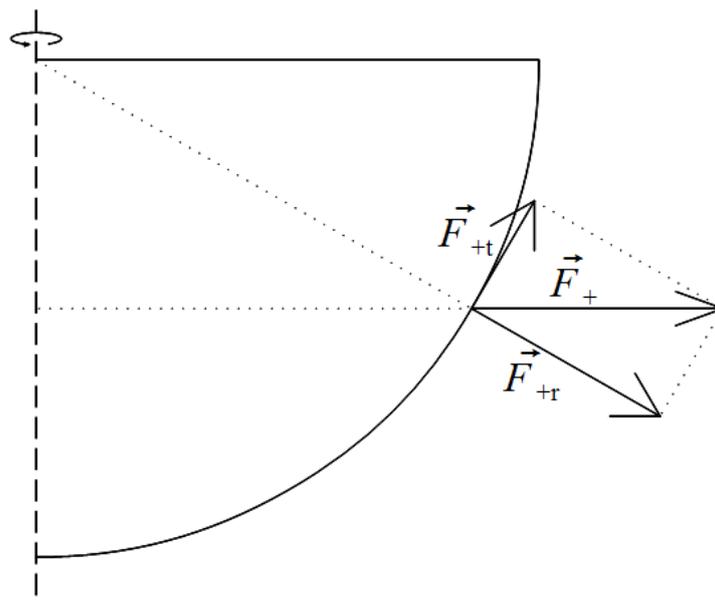


Abb. 15: Zerlegung der zusätzlichen Zentrifugalkraft in eine radiale und eine tangentielle Komponente (Südhalbkugel)

Auch bei zonalen Bewegungen auf der Südhalbkugel kann man analog zur Nordhalbkugel argumentieren: Bewegt sich ein Luftteilchen zonal mit einer zusätzlichen Eigengeschwindigkeit in Richtung der Erdrotation, so erhöht sich seine Gesamtgeschwindigkeit im Inertialsystem und es erfährt eine größere Zentrifugalkraft. Diese lässt sich wieder in eine tangentielle und eine radiale Komponente zerlegen, wobei die tangentielle zu einer Richtungsänderung zum Äquator hin, also nach links führt (vgl. Abb. 15).

Bewegt sich das Luftteilchen in die Gegenrichtung, also zonal entgegen der Erdrotation, so nimmt seine Gesamtgeschwindigkeit (im Inertialsystem) ab. Die Zentrifugalkraft, die auf es wirkt, wird geringer und es kommt folglich wieder zu einer Ablenkung nach links.

Demnach wird jedes entlang der Erdoberfläche bewegte Luftteilchen auf der Südhalbkugel nach links abgelenkt.

In der bisherigen Erklärung wurde versucht, die Entstehung der Corioliskraft zu veranschaulichen. Diese zeichnerische Darstellung führt aber noch nicht zur Formel der Corioliskraft, wie sie in Kapitel 2.2. hergeleitet wurde ($F_C = 2 m \omega v \sin \varphi$). Dennoch lassen sich die Einflussgrößen - zwar nicht quantitativ aber qualitativ - plausibel machen:

- Die Masse:
 - Nimmt die Masse eines Teilchens zu, so hat das Luftteilchen auch eine größere Trägheit und es bedarf zur Ablenkung einer größeren Kraft.
 - Nimmt die Masse eines Teilchens zu, so wirkt auf das Luftteilchen eine höhere Zentrifugalkraft.
- Die Geschwindigkeit:
 - Nimmt die Geschwindigkeit eines Teilchens zu, so erreicht es schneller die Regionen anderer Bahngeschwindigkeiten. Es kommt also zu einer stärkeren Ablenkung.
 - Nimmt die Geschwindigkeit eines Teilchens zu, so ist auch der Zuwachs oder die Verminderung der Zentrifugalkraft größer und es kommt zu einer größeren ablenkenden Komponente.

- Die geographische Breite:
 - Da sich die Bahngeschwindigkeit der Erde mit zunehmender geographischer Breite stärker ändert (vgl. Abb. 8), kommt es auch zu einer größeren Ablenkung des Luftteilchens.
 - Zerlegt man den Zuwachs der Zentrifugalkraft \vec{F}_+ oder deren Abnahme \vec{F}_- in die jeweiligen radialen und tangentialen Komponenten, so nimmt mit zunehmender geographischer Breite, der Anteil der tangentialen Komponente zu.
- Die rezente Rotationsgeschwindigkeit der Erde:

Die Rotationsgeschwindigkeit der Erde kann als konstant angesehen werden. Würde sie sich aber ändern, käme es in gleichem Maße zu einer Zu- bzw. Abnahme der Corioliskraft.

3. Entwicklungspsychologische Betrachtung

Das Verständnis der Corioliskraft stellt hohe kognitive Anforderungen an den Lernenden. Dabei sind die erforderlichen physikalischen Grundvorstellungen der Größen Geschwindigkeit und Kraft unerlässlich, ebenso die Fähigkeit zum logischen und abstrakten Denken sowie ein ausgeprägtes räumliches Vorstellungsvermögen. Hinzu kommt die Tatsache, dass eine direkte Beobachtung der auf der Erde wirkenden Corioliskraft nur im großen Maßstab und damit nur über den Einsatz von Hilfsmitteln möglich ist, wie beispielsweise durch Satellitenbilder oder Wetterkarten.

Doch ab welchem Alter ist ein Kind nun in der Lage, die Corioliskraft vollständig zu verstehen? Einen wichtigen Anhaltspunkt gibt Piaget, der die kognitive Entwicklung grob in vier aufeinander aufbauende Stufen unterteilt, die zwar nacheinander durchlaufen werden, individuell aber in unterschiedlichem Alter erreicht werden.²⁶

1. Die sensomotorische Stufe (0-2 Jahre): In dieser Phase verfügt das Kind über einfache Reflexe, wie Saugen oder Greifen und reagiert damit auf seine Umwelt. Der Raum wird lediglich handelnd im Sinne eines Greif- oder Krabbelraums erlebt.
2. Die präoperationale Stufe (2-7 Jahre): Hier beginnt der Gebrauch von Sprache und Vorstellung. Gegenstände und Räume werden aus einem egozentrischen Blickwinkel wahrgenommen, so dass sich das Kind als Zentrum versteht und alles nur aus seiner Perspektive sieht. Es ist ihm also kognitiv nicht möglich, sich in andere Bezugssysteme hineinzusetzen.
3. Die konkret-operationale Stufe (7-11 Jahre): In dieser Phase kommt es zu einer allmählichen Auflösung des egozentrischen Blickwinkels. Die Denkweise wird zunehmend logischer und die Wahrnehmung objektiver. So ist es dem Kind nun möglich, die Lage einzelner Objekte zueinander genauer zu erfassen und zunehmend konkreter mit Präpositionen (z.B. neben, über, bei, ...) zu beschreiben. Dabei ist allerdings das „Denken noch an konkrete oder potenziell mögliche Dinge gebunden, d.h. das Kind muss sich anschaulich vorstellen können, was gemeint ist.“²⁷

²⁶ vgl. z.B. Bovet, Huwendiek (2005), S. 208 und Haubrich (2006), S. 70ff.

²⁷ Bovet, Huwendiek (2005), S. 209.

4. Die formal-logische Stufe (ab 11/12 Jahren): Ausgehend von den naturwissenschaftlichen Versuchen, die Piaget mit seinen Probanden durchgeführt hat, konnte er erkennen, dass sie in diesem Alter in der Lage waren, in ihrem „Denken über das konkret Vorstellbare hinauszugehen, zu abstrahieren und einem formal-logischen Gedankengang zu folgen bzw. diesen selbst zu entwickeln.“²⁸ Demnach sind die Kinder erst in dieser Phase in der Lage, Hypothesen zu formulieren, einen Versuch logisch zu planen, den Einfluss verschiedener Variablen zu untersuchen und abschließend ihre Hypothesen zu überprüfen.

Gleichzeitig entwickelt das Kind „eine euklidische Raumvorstellung, d.h. es werden komplexe metrische Relationen mit Proportionen und Entfernungen erfasst und verarbeitet.“²⁹ Demnach ist der Jugendliche nun auch in der Lage, den Raum in kartesischen Koordinaten zu beschreiben und somit mathematisch zu fassen.

Wie bereits erwähnt, ist für das tiefere Verständnis der Corioliskraft ein ausgeprägtes räumliches Vorstellungsvermögen unerlässlich. Dabei kommt es in diesem Zusammenhang besonders auf die Fähigkeit an, unterschiedliche Blickwinkel und Beobachtungspositionen einnehmen und miteinander synchronisieren zu können. Dies untersuchten Piaget und Inhelder unter anderem mit dem Versuch „Die drei Berge“³⁰. Dazu benutzten sie ein Modell aus Pappmaché, das drei verschieden hohe Berge darstellte, die zusätzlich unterschiedlich ausgestaltet waren. Auf dieses Modell wurde nun eine Puppe gesetzt und den Versuchspersonen die Aufgabe gegeben, aus zehn Fotografien diejenige herauszusuchen, die dem Blickwinkel der Puppe entspricht. Eine Variante des Experiments bestand darin, anhand einer Fotografie die Kameraperspektive zu bestimmen und die Puppe entsprechend zu platzieren. Diese Gesamtkoordinierung erreichten die Kinder mit ca. 9-10 Jahren, also gegen Ende der dritten, der konkret-operationalen Stufe.³¹

Im speziellen Fall der Corioliskraft sind die kognitiven Anforderungen an die Schüler aber noch deutlich höher. Sie müssen nicht nur, wie beim Drei-Berge-Experiment,

²⁸ ebd., S. 209f.

²⁹ Rinschede (2007), S. 80.

³⁰ Piaget, Inhelder (1999), S. 251.

³¹ vgl. ebd., S. 251ff.

den Wechsel zwischen den Perspektiven leisten, sondern zusätzlich gedanklich von einem ruhenden in ein rotierendes Bezugssystem und wieder zurück wechseln und auch hier ihre gemachten Beobachtungen synchronisieren. Um dies leisten und die gewonnenen Erkenntnisse interpretieren zu können, muss der Lernende seine Vorstellungen souverän im euklidischen Raum umsetzen können und sich demnach mindestens in der vierten Phase nach Piaget (formal-logische Stufe) befinden. Dies ist normalerweise im Alter von 11 bzw. 12 Jahren möglich, wobei aber nicht angenommen werden darf, dass jeder Mensch diese Stufe in dieser Altersphase auch erreicht.³²

Eine jüngere Untersuchung, bei der sich die Probanden gedanklich zur Beobachtung der Erde in einen Standort im Weltraum versetzen mussten, legt sogar nahe, dass erst im Alter von 16 Jahren dieser Perspektivenwechsel problemlos geleistet werden kann.³³

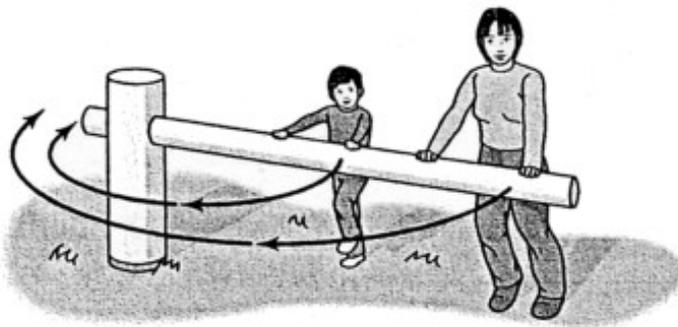


Abb. 16: Experiment zur Drehbewegung von Levin, Siegler und Druyan³⁴

Dass sich die Entwicklung der räumlichen Wahrnehmung aber, entgegen der Annahme von Piaget und Inhelder, nicht losgelöst vom sozialen und kulturellen Umfeld und den damit verbundenen Lernimpulsen betrachten lässt, konnten Levin, Siegler und Druyan 1990 nachweisen. Dabei stellten sie fest, dass sich die Raumwahrnehmung der Kinder durch gezielte Anregungen, eine optimale Veranschaulichung und aktives Erfahren problemlos fördern lässt. Im konkreten Beispiel ging es um die Frage, ob sich bei einem Pferd, das über eine runde Rennbahn läuft, die rechte und die

³² Kestler (2002), S. 113.

³³ ebd., S. 114.

³⁴ Dargestellt in: Siegler, DeLoache, Eisenberg (2005), S. 198.

linke Seite mit der gleichen Geschwindigkeit bewegen.³⁵ Zu Anfang hatten alle Probanden (Kinder unterschiedlichen Alters und Studenten) große Schwierigkeiten diese Frage zu beantworten und behaupteten durchgängig, dass „alle Teile eines einzigen Objekts mit der selben Geschwindigkeit unterwegs sind.“³⁶ Dabei ist allerdings anzumerken, dass diese Fragestellung sehr schwierig ist, da die Kinder im naturwissenschaftlichen Unterricht gewohnt sind, zunächst den Schwerpunkt eines Objektes ohne Berücksichtigung seiner Ausdehnung zu betrachten. Deutlich einfacher und auch kindgemäßer wäre es gewesen, zwei Objekte, z.B. zwei Pferde, zu betrachten, die parallel nebeneinander auf einer runden Rennbahn laufen (vgl. Kap. 5.2.1.). In einem zweiten Schritt führten Levin, Siegler und Druyan dann gemeinsam mit den Kindern einen Versuch durch, für den eine gut zwei Meter lange Metallstange drehbar montiert war (vgl. Abb. 16), an der sich jeweils ein Sechstklässler und einer der Forscher festhielten. In den ersten beiden Runden schob das Kind die Stange nahe am Drehpunkt, dann wechselten die beiden ihre Plätze und das Kind erhielt die Außenposition. „Die Unterschiede in den Geschwindigkeiten³⁷, mit denen man innen und außen an der Stange läuft, waren so drastisch, dass die Kinder ihre neue Erkenntnis auf andere Aufgaben übertragen konnten, an denen Kreisbewegungen beteiligt sind [...]. Mit anderen Worten konnte die körperliche Erfahrung vermitteln, was Jahre des formalen naturwissenschaftlichen Unterrichts nur selten schaffen.“³⁸ **Für ein so komplexes Thema wie die Corioliskraft bedeutet das also, dass man, wenn man dieses Phänomen den Schülern nahe bringen möchte, es sowohl optimal visualisieren als auch möglichst haptisch erfahrbar machen muss.**

Doch welches Erkenntnisverfahren sollte nun für die Vermittlung der Corioliskraft gewählt werden? Ein induktiver Erklärungsansatz versucht aus mehreren Einzelfällen und Teilergebnissen auf das Allgemeine zu schließen und somit ein Gesamtbild zu entwickeln.³⁹ Bei einem deduktiven Erklärungsansatz handelt es sich dagegen um die umgekehrte Richtung: Hier versucht man allgemeingültige Regeln in konkreten geographischen Einzelfällen wiederzufinden. Dieser Weg entspricht aber nicht dem

³⁵ vgl. Siegler, DeLoache, Eisenberg (2005), S. 198.

³⁶ Siegler (2001), S. 298.

³⁷ Levin, Siegler und Druyan bezogen sich bei Ihren Untersuchungen auf die Betrachtung der Geschwindigkeiten und ließen die unterschiedliche Wirkung der Kräfte außen vor.

³⁸ Siegler, DeLoache, Eisenberg (2005), S. 198.

³⁹ vgl. Brucker (2009), S. 36.

wissenschaftspropädeutischen Ansatz, da auf diese Art und Weise keine neuen Erkenntnisse gewonnen werden können.⁴⁰ Allerdings führt die deduktive Vorgehensweise ab einer Altersstufe von ca. 16 Jahren, wenn die verschiedenen Lernniveaus bis hin zum Transfer und dem problemlösenden Denken bereits gemeistert wurden, rascher zum Ziel⁴¹ und ist gerade bei Schülerexperimenten, die zur Bestätigung vorhandenen Wissens dienen, angebracht.⁴² Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass in der Sekundarstufe I die induktive Vorgehensweise und damit das praktische Erfahren der eindeutig erfolversprechendere Weg ist. In den höheren Klassen kann durchaus deduktiv gearbeitet werden, indem etwa die Formel der Corioliskraft auf diese Art und Weise im Schülerversuch bestätigt wird. In der unterrichtlichen Praxis ist aber eine strenge Abgrenzung der beiden Erkenntnisverfahren weder möglich noch unbedingt anzustreben.

Abschließend bleibt noch die häufig diskutierte Frage zu klären, ob die Corioliskraft im Rahmen des Geographieunterrichts auch in physikalischer Form angesprochen und durch eine Formel dargestellt werden soll. Für die Sekundarstufe I lässt sich das klar verneinen, da das fehlende mathematische Verständnis und das noch nicht vollständig entwickelte Abstraktionsvermögen nur eine Behandlung auf der deskriptiven Ebene erlauben. Anders stellt sich die Situation in der Oberstufe dar: Hier sollten, gerade bei Gymnasiasten, die kognitiven Anforderungen erfüllt sein und somit eine formelhafte Beschreibung der Corioliskraft kein Problem darstellen. Dabei muss aber beachtet werden, dass laut einer aktuellen Studie von Strahl u.a. (2009) selbst Oberstufenschüler, die das Fach Physik nicht abgewählt haben und bei denen somit ein gewisses naturwissenschaftliches Grundinteresse zu erwarten ist, Probleme haben, den Inhalt von Formeln zu verstehen. Auf die Frage, ob die im Unterricht verwendeten Formeln zu abstrakt sind und sie ihren Inhalt oft nicht verstehen, antwortete rund ein Viertel der Befragten zustimmend.⁴³

Für den Geographieunterricht erscheint es also sinnvoll, nach Unterrichtsgängen zu suchen, bei denen die mathematische Betrachtung nicht allzu sehr im Vordergrund steht. Der Schwerpunkt sollte vielmehr auf der Visualisierung und einer schülerakti-

⁴⁰ Kaminske (1993), S. 17.

⁴¹ vgl. ebd. (1993), S. 18.

⁴² Kestler (2002), S. 213.

⁴³ vgl. Strahl u.a. (2009), S. 170.

ven Durchführung eindeutiger Versuche liegen. Letztendlich führen dann die Beobachtungen aus den verschiedenen Bezugssystemen zu einer plausiblen, altersadäquaten Erklärung, wobei die Zusammenführung der Erkenntnisse nicht zuletzt Aufgabe des Lehrers ist.

4. Die Corioliskraft in den Bildungs- und Lehrplänen

Die Verankerung der Corioliskraft⁴⁴ in den Bildungs- und Lehrplänen bzw. Kerncurricula der einzelnen Bundesländer⁴⁵ ist sehr unterschiedlich. Dabei reicht die Bandbreite von ausschließlich anthropogeographischen Themen und damit dem faktischen Ausschluss der Corioliskraft bis hin zur expliziten Nennung derselben. Dazwischen gibt es Bundesländer, bei denen Themen⁴⁶ in den Bildungsplänen genannt werden, die der Lehrkraft die Einbindung der Corioliskraft in den Unterricht ermöglichen, sie aber nicht verpflichtend vorsehen. Außerdem ist in einigen Bundesländern beispielsweise die Entstehung der Westwindzone oder die tropische Zirkulation verpflichtend vorgeschrieben, die ohne ein tieferes Verständnis der Corioliskraft nur sehr bedingt und rezeptiv vermittelt werden kann.

Diese Unterschiede liegen im föderalistischen Bildungssystem begründet. Auch fand im Fach Geographie bisher noch keine Angleichung durch bundeseinheitliche „Bildungsstandards und Aufgabenpools für die gymnasiale Oberstufe“⁴⁷ statt, wie sie beispielsweise von der Kultusministerkonferenz im Oktober 2007 für die Fächer Deutsch, Mathematik, Englisch, Französisch, Biologie, Chemie und Physik beschlossen wurden.⁴⁸ Es gibt zwar Bildungsstandards der Deutschen Gesellschaft für Geographie, diese beziehen sich aber lediglich auf den mittleren Schulabschluss.⁴⁹

⁴⁴ An dieser Stelle sei noch einmal darauf hingewiesen, dass es sich bei der Corioliskraft, ähnlich wie bei der Zentrifugalkraft, um eine so genannte Scheinkraft handelt und die korrekte Bezeichnung eigentlich Coriolisscheinkraft, Coriolisablenkung oder noch besser Coriolisscheinablenkung lauten müsste. In den Bildungsvorgaben der einzelnen Bundesländer wird, wenn überhaupt, vereinfachend von der Corioliskraft gesprochen.

⁴⁵ Bei dieser Untersuchung wurden die Bildungsvorgaben aller Bundesländer mit einbezogen. Dabei wurde allerdings auf eine ausführliche Analyse der Bildungspläne der drei Stadtstaaten verzichtet. Es lässt sich aber zusammenfassend sagen, dass es in diesen Bundesländern Anknüpfungspunkte für die Einbettung der Corioliskraft jeweils in den Mittelstufenklassen 7 und 8 gibt. In der Oberstufe sind Themen aus dem Bereich Klimatologie nicht vorgesehen.

⁴⁶ beispielsweise die Themen Passat oder Monsun.

⁴⁷ Ständige Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland (o. J.).

⁴⁸ vgl. ebd.

⁴⁹ vgl. Deutsche Gesellschaft für Geographie (2010).

Betrachtet man zunächst die gymnasialen⁵⁰ Lehrpläne von Rheinland-Pfalz und Schleswig-Holstein, so wird deutlich, dass das Fach Erdkunde⁵¹ hier als reine Gesellschaftswissenschaft wahrgenommen wird. Es gibt über den gesamten Lernweg zum Abitur keinerlei Hinweise auf physisch-geographische Inhalte. Der Schwerpunkt liegt vielmehr auf der Orientierung, der Topographie und sämtlichen Teildisziplinen der Anthropogeographie. Dementsprechend ist in diesen beiden Ländern das Thema Corioliskraft in keiner Weise in den Lehrplänen präsent.

Auch in Hessen dominieren die anthropogeographischen Inhalte deutlich. Die wenigen physisch-geographischen Themen, die durch den Lehrplan für das Fach Erdkunde vorgegeben werden, sind jeweils unter einen humangeographischen Aspekt gestellt. So wird beispielsweise für Klasse 8 das Thema „Indien: Abhängigkeit vom Monsun“⁵² genannt, aber nicht klar gestellt, ob die Genese des Klimaphänomens ebenso behandelt werden muss. Auch in der Sekundarstufe II ist in der Einführungsphase 1 zwar das Thema „globale Luftmassenverteilung“ verpflichtend, wird aber hier aus dem humangeographischen Blickwinkel der „Geoökologischen Grundlagen einer Raumanalyse“ angesprochen. Es lässt sich also sagen, dass das Thema Corioliskraft (wenn überhaupt) im hessischen Lehrplan nur einen geringen Stellenwert einnimmt.

Ähnlich wie in Hessen, dominieren auch in Nordrhein-Westfalen die humangeographischen Inhalte, wobei hier in allen gymnasialen Unterrichtsstufen ein Schwerpunkt auf dem Bereich Migration liegt. Zwar werden im Lehrplan für die Sekundarstufe II einige physisch-geographische Aspekte genannt, diese aber nicht wirklich als verpflichtende Unterrichtsthemen gelistet, sondern lediglich als „Anregung zu Methoden und Formen selbstständigen Arbeitens und zur Lernorganisation“⁵³ angesehen (sog. Wahlpflichtthemen). So könnte die Corioliskraft beispielsweise im Themenbereich „Agrarproduktion unter dem Einflussbereich natürlicher Gegebenheiten und kolonia-

⁵⁰ Da dieses komplexe Thema bislang nahezu ausschließlich Einzug in die gymnasiale Bildung gefunden hat, sollen im Folgenden lediglich die Bildungsvorgaben für Schulen betrachtet werden, die zum Abitur führen. Dabei findet normalerweise der kürzere gymnasiale Zug (hier als G8 bezeichnet) Anwendung, wobei nur Regelzüge untersucht werden.

⁵¹ In den Bildungsvorgaben der Länder werden die Begriffe „Geographie“, „Erdkunde“ oder „Umweltkunde“ verwendet. Wenn hier diese Begriffe in der Originalform benutzt werden, ist aber immer die Geographie in der Schule gemeint.

⁵² Hessisches Kultusministerium (2010), S. 18.

⁵³ Ministerium für Schule und Weiterbildung, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen (1999), S. 62.

len Erbes⁵⁴ thematisiert werden, da hier unter den Anmerkungen die „Analyse eines Modells zur tropischen Zirkulation hinsichtlich der Nutzungsspielräume“⁵⁵ genannt wird. Demnach hat auch in Nordrhein-Westfalen das Thema Corioliskraft im Lehrplan nur einen geringen Stellenwert.

Für die bisher genannten Bundesländer lässt sich nun sagen, dass nach den Bildungsvorgaben eine grundlegende Beschäftigung mit Fragen der Klimaverschiebung u.ä. überhaupt nicht oder allenfalls in spekulativer Weise möglich ist.

In Niedersachsen liegt der Schwerpunkt der Bildungsstandards für das Fach Erdkunde im Bereich der ‚Schulung der räumlichen Orientierungs-, Methoden und Bewertungskompetenz‘. Dennoch findet sich im Kerncurriculum für die Sekundarstufe I auch eine Vielzahl fachwissenschaftlicher Themen, die einen Großteil des physisch- und humangeographischen Kanons abdecken. So wird beispielsweise für Klasse 7 im Rahmen des Raummoduls 7 ein Schwerpunkt auf die „Abhängigkeit vom Monsun“⁵⁶ gelegt und für das Ende des Schuljahrgangs 10 gefordert: „Die Schülerinnen und Schüler erklären Grundzüge der tropischen Zirkulation“⁵⁷, so dass sich hier gleich mehrere Anknüpfungspunkte für die Besprechung der Corioliskraft bieten. Da sich aber im Kerncurriculum für die Sekundarstufe II keine physisch-geographischen Themenfelder mehr finden⁵⁸, wird deutlich, dass auch in Niedersachsen die Corioliskraft in den Curricula nur geringe Bedeutung hat.

Während in Sachsen-Anhalt für die sogenannten Sekundarschulen (= Sek. I) gerade ein neuer Lehrplan in der Erprobung ist, gelten für die Gymnasien noch die Rahmenrichtlinien von 2003. Auch hier sind die Inhalte sehr stark regionalgeographisch geprägt, wobei aber durchaus ein physisch-geographischer Schwerpunkt zu erkennen ist. Dieser zeigt sich auch in den Anknüpfungsmöglichkeiten für das Thema Corioliskraft, die sich in Klasse 7/8 ergeben, wo die Rahmenrichtlinien im Fundamentum das Thema „Monsun und seine Auswirkungen auf das Leben und Wirtschaften der Menschen“⁵⁹ vorschreiben. Im Additum ist in der gleichen Klassenstufe auch das „Systematisieren von Luftmassen (beständig wehende und jahreszeitlich wechselnde) und

⁵⁴ ebd., S. 62.

⁵⁵ ebd., S. 62.

⁵⁶ Niedersächsisches Kultusministerium (2010), S. 20.

⁵⁷ Niedersächsisches Kultusministerium (2008), S. 12.

⁵⁸ vgl. Niedersächsisches Kultusministerium (2010), S. 17ff.

⁵⁹ Kultusministerium des Landes Sachsen-Anhalt (2003), S. 62.

deren regionale Zuordnung zu Windsystemen [sowie der] Nachweis der Lage Europas in der Westwindzone⁶⁰ möglich, so dass es, zumindest beim Unterrichten des Additums, bereits in der Mittelstufe kaum möglich erscheint, auf die Einführung der Corioliskraft zu verzichten. Da sich aber, ähnlich wie in Niedersachsen, in den höheren Klassen keinerlei Hinweise auf weitere Anknüpfungsmöglichkeiten finden, muss auch hier gesagt werden, dass das Thema Corioliskraft nur eine untergeordnete Bedeutung in den Rahmenrichtlinien in Sachsen-Anhalt besitzt.

Anders sieht das Bild in Baden-Württemberg aus: Hier finden sich bereits in den Bildungsstandards für Klasse 8 im Themenfeld „Natur- Lebens- und Wirtschaftsräume in unterschiedlichen Klimazonen“ klare Anknüpfungspunkte. Bereits hier, zu Beginn der Mittelstufe, fordert der Bildungsplan, „die Schülerinnen und Schüler können die innertropische Zirkulation erläutern“⁶¹. Es wird von ihnen also erwartet, dass sie die „Sachverhalte im Zusammenhang beschreiben und anschaulich mit Beispielen und Belegen erklären.“⁶² Zum Ende der Sekundarstufe I werden die Anforderungen nochmals durch den Standard die „Schülerinnen und Schüler können die Grundlagen der globalen atmosphärischen Zirkulation in ihrer Dynamik darlegen“⁶³ aufgenommen. Da dies ohne ein tieferes Verständnis der innerhalb der Atmosphäre wirkenden Kräfte kaum möglich ist, kann man sagen, dass die Corioliskraft im Bildungsplan des Landes Baden-Württemberg implizit einen wichtigen Stellenwert einnimmt. Dies lässt sich auch für die Sekundarstufe II belegen, wobei hier physisch-geographische Themen lediglich im 4-stündigen Kurs vorgesehen sind, dort aber einen großen Stellenwert einnehmen. Auffällig ist, dass die den Bildungsstandards beigefügten Niveauekonkretisierungen über alle Jahrgangsstufen hinweg kaum explizit klimatologische Beispiele aufweisen.⁶⁴ Dies deutet möglicherweise auf die methodischen Probleme bei der Umsetzung hin.

Der bayerische Lehrplan ist inhaltlich den baden-württembergischen Bildungsstandards sehr ähnlich. Während in der Unter- und Mittelstufe, ausgehend vom eigenen Heimatraum, ein eher regionalgeographischer Ansatz verfolgt wird, ist die Betrachtung

⁶⁰ ebd., S. 67.

⁶¹ Ministerium für Kultus, Jugend und Sport Baden-Württemberg (2004), S. 241.

⁶² Turgas (o. J.).

⁶³ Ministerium für Kultus, Jugend und Sport Baden-Württemberg (2004), S. 242.

⁶⁴ Ministerium für Kultus, Jugend und Sport Baden-Württemberg (o. J.).

tungsweise in der Oberstufe thematisch orientiert. Anknüpfungspunkte für das Thema Corioliskraft finden sich beispielsweise in Klasse 8 bei der Behandlung der „Merkmale des tropischen und arid-subtropischen Klimas“⁶⁵ und in Klasse 10, in der die Besprechung des Monsunklimas verpflichtend vorgeschrieben ist. Auch in der Oberstufe fordert der Lehrplan die Thematisierung der atmosphärischen Zirkulation, so dass wiederum zusammenfassend gesagt werden kann, dass das Thema Corioliskraft auch im bayerischen Lehrplan eine wichtige Rolle spielt.

In Brandenburg⁶⁶ ist der Geographieunterricht in der Sekundarstufe I, die dort erst mit Klasse 7 beginnt, ebenfalls regionalgeographisch ausgerichtet. Hier findet sich für den ersten Doppeljahrgang (7/8) im Rahmenlehrplan das Themenfeld 2, das mit dem Titel „Asien - Extreme des Naturraums“⁶⁷ überschrieben ist. Auch wenn mit der Formulierung „Die Schülerinnen und Schüler beschreiben die Erscheinung des Monsuns [...]“⁶⁸ lediglich ein deskriptives Vorgehen gefordert wird, so besteht hier bereits ein erster Anknüpfungspunkt für das Thema Corioliskraft. Für die Oberstufe wird dann aber eindeutig die Behandlung der allgemeinen atmosphärischen Zirkulation gefordert, so dass auch in Brandenburg die Corioliskraft einen wichtigen Stellenwert im Rahmenlehrplan einnimmt.

In Thüringen schreibt der Lehrplan bereits in Klasse 7 die Behandlung der „Entstehung der Klima- und Vegetationszonen der Erde“⁶⁹ vor, was aber mit dem Hinweis auf eine vereinfachte Darstellung wieder relativiert wird. In Klasse 8 entfällt dann der Hinweis auf die didaktische Reduktion beim Thema „Tropischer Monsun und dessen Auswirkungen“⁷⁰, so dass hier eine Erklärung ohne die Einführung der Corioliskraft kaum denkbar erscheint. Da nun auch für die Oberstufe das Thema „Atmosphärische Zirkulation (Überblick über das Gesamtsystem, Passat- und Westwindzone)“⁷¹ bereits im Grundkurs verpflichtend ist, kann man durchaus sagen, dass auch im thüringischen Lehrplan das Thema Corioliskraft implizit einen wichtigen Stellenwert einnimmt.

⁶⁵ Bayerisches Staatsministerium für Unterricht und Kultus (2009).

⁶⁶ Da der Rahmenlehrplan für die Sekundarstufe I für die Bundesländer Berlin und Brandenburg gilt, können alle Aussagen auch auf Berlin übertragen werden. Für die Sekundarstufe II trifft dies nicht zu.

⁶⁷ Ministerium für Bildung, Jugend und Sport des Landes Brandenburg (2008), S. 19.

⁶⁸ ebd., S. 22.

⁶⁹ Thüringer Kultusministerium (1999), S. 29.

⁷⁰ ebd., S. 35f.

⁷¹ ebd., S. 49.

Im Gegensatz zu den bisher besprochenen Bundesländern wird im Rahmenplan von Mecklenburg-Vorpommern die Corioliskraft explizit genannt. Anknüpfungspunkte bieten sich mit den Themen „Monsun – Fluch und Segen – Entstehung und Auswirkungen auf das Leben und Wirtschaften“⁷² und „Tropische Passatzirkulation – Überblick über die allgemeine atmosphärische Zirkulation“⁷³ bereits in Klasse 8. Für die neunte Klasse wird dann explizit im Themenbereich „Grundzüge der atmosphärischen Zirkulation“ die Durchführung des „Experiments“ „Corioliskraft am Schreibglobus“⁷⁴ gefordert, so dass hier der Lehrkraft sogar die Unterrichtsmethode vorgeschrieben wird. Bemerkenswert ist, dass das im Bildungsplan geforderte Experiment allenfalls als Modell bezeichnet werden kann, sowohl sachlich als auch didaktisch unzulänglich ist (vgl. Kap. 5.1.3.) und somit die Lehrkraft zur Vermittlung ungenauer Inhalte veranlasst.

Auch im Saarland steht die Behandlung der Corioliskraft als verpflichtendes Thema im Lehrplan. Bereits in Klasse 9 finden sich Anknüpfungspunkte im Rahmen der Einheit „Klimatische und edaphische Voraussetzungen Chinas“. Hier zählt die Thematisierung des Monsuns zu den verbindlichen Lehrplaninhalten.⁷⁵ Explizit genannt wird das Thema Corioliskraft dann im Lehrplan für die Einführungsphase in die gymnasiale Oberstufe, wo es sowohl in den verpflichtenden Lehrplaninhalten als auch als potentiell fächerübergreifendes Thema in Zusammenarbeit mit dem Fach Physik genannt wird.⁷⁶

Der sächsische Lehrplan ist für die Klassen 5 bis 9 von einem regionalgeographischen Ansatz geprägt, wobei eine Vielzahl physisch-geographischer Themen genannt werden. Die ersten Anknüpfungspunkte für das Thema Corioliskraft finden sich in der achten Klasse, in der der Lehrplan das „Kennen des tropischen Monsuns und seiner Auswirkungen auf das Leben der Menschen“⁷⁷ vorschreibt. Explizit genannt wird die Corioliskraft dann für den Grundkurs Geographie in Klasse 11, wo im Lernbereich 2 das „Kennen der Grundlagen atmosphärischer Prozesse“ sowie die „dyna-

⁷² Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur Mecklenburg-Vorpommern (2002), S. 26.

⁷³ ebd., S. 27.

⁷⁴ ebd., S. 34.

⁷⁵ Ministerium für Bildung, Kultur und Wissenschaft Saarland (2002-2005), S. 3.

⁷⁶ ebd., S. 2f.

⁷⁷ Sächsisches Staatsministerium für Kultus (2004, 2009, 2011), S. 22.

mische Entstehung von Gebieten unterschiedlichen Luftdrucks“⁷⁸ gefordert und bei den Anmerkungen der Westwindstrahlstrom und die Corioliskraft genannt werden. Interessanterweise findet sich im Lehrplan für den Leistungskurs kein direkter Hinweis auf die Behandlung der Corioliskraft, wobei hier aber mit dem „Übertragen der Grundlagen der atmosphärischen Prozesse auf die Entstehung und Verteilung der Luftdruck- und Windgürtel“⁷⁹ prinzipiell auf das Anspruchsniveau des Grundkurses aufgebaut wird.

Versucht man nun auf Grundlage der vorangegangenen Analyse den Stellenwert des Themas Corioliskraft in den Bildungsvorgaben der einzelnen Bundesländer zu klassifizieren, so lassen sich vier verschiedene Gruppen unterscheiden:

1. Länder, in denen es keine Anknüpfungspunkte für das Thema gibt, bzw. keine klimatologischen Inhalte genannt werden.
2. Länder, in denen es zwar Anknüpfungspunkte gibt, die aber beispielsweise nur wenig verpflichtenden Charakter haben oder sich ausschließlich auf niedrige Klassenstufen beziehen. In den Bildungsvorgaben finden sich zwar klimatologische Inhalte, aber keine Forderung nach einer genauen Analyse von Windsystemen.
3. Länder, in denen es beispielsweise mit der Forderung nach der Betrachtung von Windsystemen deutliche Anknüpfungspunkte gibt, die Corioliskraft aber nicht explizit in den Bildungsvorgaben genannt wird.
4. Länder, in denen die Corioliskraft explizit in den Bildungsvorgaben genannt wird.

⁷⁸ ebd., S. 32.

⁷⁹ ebd., S. 40.

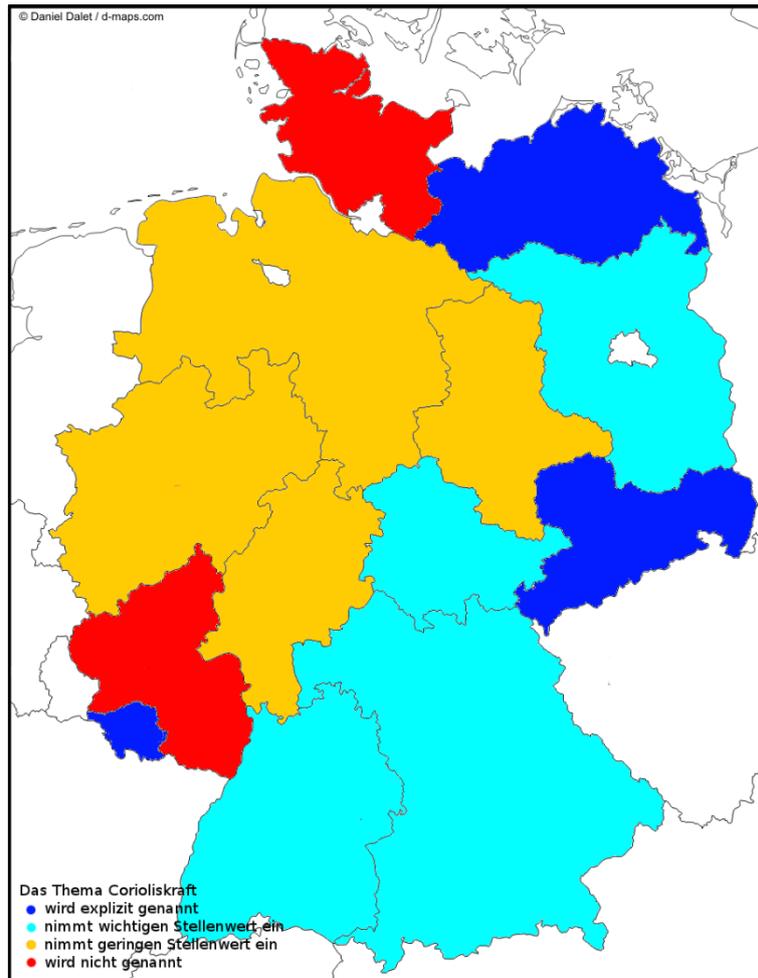


Abb. 17: Die Corioliskraft in den Bildungsvorgaben der Bundesländer

Überträgt man diese Kategorien nun auf eine Deutschlandkarte (vgl. Abb. 17), so ist zwar nach wie vor der bildungspolitische Flickenteppich zu erkennen, es zeigt sich aber auch eine Zweiteilung Deutschlands, deren Grenze grob von Südwest nach Nordost verläuft. Während in der nordwestlichen Hälfte Deutschlands die Corioliskraft in den Bildungsvorgaben nur eine untergeordnete Rolle spielt, nimmt sie in der südöstlichen Hälfte einen deutlich höheren Stellenwert ein.⁸⁰

Die ausgeprägte Verankerung des Themas Corioliskraft in den Bildungsvorgaben der neuen Bundesländer (mit Ausnahme von Sachsen-Anhalt) lässt sich in Anlehnung an

⁸⁰ Diese Zweiteilung zeigt sich auch in der PISA-Studie von 2006, deren Untersuchungsschwerpunkt auf den Naturwissenschaften lag. Die Schüler der Länder, in denen die Corioliskraft im Bildungsplan entweder explizit genannt wird oder zumindest einen wichtigen Stellenwert einnimmt, erreichten mit durchschnittlich 524 Kompetenzpunkten einen deutlich höheren Wert als die anderen Bundesländer (510 Punkte).

Budke (2010) teilweise mit der historischen Entwicklung dieser Länder begründen: Mit Öffnung der Berliner Mauer im Jahr 1989 ergab sich die Situation, dass „die ideologische Erziehung zu ‚gebildeten sozialistischen Persönlichkeiten‘ kein Ziel des Geographieunterrichts mehr sein konnte“⁸¹ und so die ehemaligen inhaltlichen Schwerpunkte zunächst einmal wegbrachen. Aus Mangel an Lehrmitteln wurden zunächst die alten DDR-Lehrbücher weiter verwendet, wobei diese erwartungsgemäß die in der BRD üblichen humangeographischen Inhalte nicht umfassten. Da aber die sozialistisch geprägten Themen einfach weggelassen wurden, blieben somit für den Unterricht nahezu ausschließlich physisch-geographische Inhalte übrig.⁸² Diese stark naturwissenschaftlich ausgerichtete Umbruchphase prägte auch die mit dem Schuljahr 1991/92 eingeführten Rahmenpläne der neuen Bundesländer.

Ein weiterer Trend lässt sich aus der tabellarischen Übersicht der Corioliskraft in den Bildungsplänen (Tabelle 1) ablesen: Während das Thema Corioliskraft in den Bundesländern, in denen das Fach Geographie auch diesen Titel trägt, einen wichtigen Stellenwert einnimmt, hat es in den Bundesländern, in denen das Fach Erdkunde heißt, eine geringere Bedeutung. Als Ausnahme ist hier lediglich das Saarland zu nennen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Bedeutung des Themas Corioliskraft in den Bildungsvorgaben sehr unterschiedlich ist, aber in den meisten Bundesländern spätestens in der 9. Klasse das Thema Passat bzw. Monsun eine Befassung mit der Ablenkung der bewegten Luftmassen und damit eine Einführung der Corioliskraft erforderlich macht.

⁸¹ Budke (2010), S. 327.

⁸² vgl. ebd., S. 338.

| Land | Fach | 5/6 | 7/8 | 9/10 | 11 - 13 |
|------------------------|------------|-----|-----|------|---------|
| Baden-Württemberg | Geographie | -- | + | + | + |
| Bayern | Geographie | -- | + | + | + |
| Brandenburg | Geographie | -- | + | -- | + |
| Hessen | Erdkunde | -- | + | -- | - |
| Mecklenburg-Vorpommern | Geographie | -- | + | ++ | -- |
| Niedersachsen | Erdkunde | -- | + | + | -- |
| Nordrhein-Westfalen | Erdkunde | -- | -- | -- | - |
| Rheinland-Pfalz | Erdkunde | -- | -- | -- | -- |
| Saarland | Erdkunde | -- | -- | -/+ | ++ |
| Sachsen | Geographie | -- | -/+ | -- | ++ |
| Sachsen-Anhalt | Geographie | -- | + | -- | -- |
| Schleswig-Holstein | Erdkunde | -- | -- | -- | -- |
| Thüringen | Geographie | -- | -/+ | -- | + |

Tabelle 1: Die Corioliskraft in den Bildungsvorgaben der Bundesländer (eigene Zusammenstellung)

- ++ Corioliskraft in den Bildungsvorgaben explizit genannt
- + Corioliskraft nimmt wichtigen Stellenwert in den Bildungsvorgaben ein
- /+ das Thema Monsun wird genannt, ist aber in erster Linie humangeographisch ausgerichtet
- Corioliskraft nimmt geringen Stellenwert in den Bildungsvorgaben ein
- Corioliskraft hat keinen Bezug zu den Bildungsvorgaben

5. Möglichkeiten der didaktischen Umsetzung

Die Aufgabe der Geographiedidaktik besteht nach der häufig zitierten Definition⁸³ von Böhn in der „adressatenbezogenen Auswahl und Anordnung von Inhalten, die räumlich bestimmbar oder raumwirksam sind, und ihrer Vermittlung in die Verständnisebene des Adressaten.“⁸⁴ Es ist zu betonen, dass demnach der „schülergemäße Vermittlungsprozess“⁸⁵ zu den wesentlichen Aufgaben der Fachdidaktik gehört. Dazu muss „aus der wissenschaftlich relevanten ursprünglichen Merkmalsgesamtheit [...] unter Wahrung der Wahrheit eine unterrichts- und schülergemäße Version“⁸⁶ werden. Diese didaktische Reduktion bildet gerade bei der unterrichtlichen Umsetzung eines so komplexen Themas wie der Corioliskraft den ersten Schritt.

Bei der didaktischen Reduktion ist zu gewährleisten, dass

1. „der Unterrichtsgegenstand [...] nicht durch ungenaue Erläuterungen, veraltete Erklärungen, Verfremdung durch ideologische oder auch nur interessensgeleitete subjektive Auswahl von Akzentsetzungen verfälscht werden“⁸⁷ darf,
2. sich das Thema mehr oder weniger nahtlos an das Vorwissen der Schüler anschließt und im weiteren Verlauf der schulischen Bildung erweitert werden kann⁸⁸ und
3. das Anspruchsniveau an das Vorwissen und die Leistungsfähigkeit der Lernenden angepasst ist.⁸⁹

Da nun aber die Thematik in der Geographie oftmals Räume betrifft, die auf Grund ihrer Ausdehnung, ihrer vertikalen Schichtenfolge usw. unüberschaubar sind (z.B. Grabenstruktur des Rheingrabens, Struktur des süddeutschen Schichtstufenlandes o.ä.) oder aber Vorgänge beschreibt, die auf Grund ihrer Zeitdauer oder der räumlichen Wirkung nicht auf direktem Wege beobachtbar sind (z.B. Driftbewegungen in der Plattentektonik, Vergletschervorgänge o.ä.), muss eine „Übersetzung“ gefunden werden, um die Thematik verständlich zu machen.

⁸³ so z.B. in Kestler (2002), S. 11 und Rinschede (2007), S. 17.

⁸⁴ Böhn 1999, S. 50, zitiert nach Kestler (2002), S. 11.

⁸⁵ Kestler (2002), S. 12.

⁸⁶ Köck (2005), S. 67.

⁸⁷ Rinschede (2007), S. 57.

⁸⁸ vgl. Anton (2008), S. 125.

⁸⁹ vgl. ebd., S. 125.

Dies führt nun in den meisten Fällen zur Bildung eines Modells, wobei „das ‚Original‘ zwar in einigen Punkten anders aussieht oder funktioniert als in der Modelldarstellung; es wird aber unterstellt, daß das *Prinzip* ähnlich oder gleich ist.“⁹⁰

Dabei lassen sich Modelle nach verschiedenen Kriterien differenzieren. Einerseits kann der Weg zu einer Modellvorstellung erkenntnistheoretisch begründet sein und induktiv oder deduktiv erfolgen, andererseits wäre eine Zuordnung nach dem Abstraktionsgrad denkbar oder eine Gliederung über die Wahl des eingesetzten Mediums möglich.

Im Zusammenhang mit der Corioliskraft bietet es sich an, die didaktischen Umsetzungsmöglichkeiten folgendermaßen zu ordnen:

1. praktisch umsetzbare *Modelle und Modell-Experimente*, die größtenteils mit apparativem Aufwand umgesetzt werden
2. *deskriptive Erklärungen*, wie sie beispielsweise im Frontalunterricht Anwendung finden
3. Erklärungen mit Hilfe von *audiovisuellen und interaktiven Medien*

5.1. Modelle und Modell-Experimente

Im Zusammenhang mit der unterrichtlichen Umsetzung der Corioliskraft wäre der Einsatz eines Funktionsmodells sinnvoll, das einen Einblick in die Vorgänge dieses komplexen Prozesses gibt und bei dem die Schüler die ungewöhnliche Bewegung selbst beobachten können. Besser wäre noch die Durchführung eines Experiments. Hierzu fordert H. Meyer die Lehrer auf, „im Unterricht zu experimentieren, um die Neugierde der Schüler zu wecken, um ihre Beobachtungsfähigkeit zu schulen, um ihnen einen Einblick in (naturwissenschaftliche) Forschungsmethoden zu geben usw.“⁹¹ Doch wie wird nun der Begriff „Experiment“ im Geographieunterricht verstanden und wie wird er dort eingesetzt?

Sowohl im Rahmen der Umfrage als auch bei der Analyse vieler verschiedener Unterrichtsmöglichkeiten taucht im Zusammenhang mit anschaulichen Darstellungen tatsächlich immer wieder der Begriff *Experiment* auf. In diesem Zusammenhang fordert C. Meyer, dass es sich bei einem Experiment um „eine planmäßige, grundsätz-

⁹⁰ Köck, Birkenhauer (1986), S. 35.

⁹¹ Meyer (2010), S. 313.

lich wiederholbare Beobachtung von natürlichen (aber auch gesellschaftlichen) Vorgängen unter künstlich erzeugten, möglichst kontrollier- und veränderbaren Bedingungen⁹² handelt. Nach Lethmate ergeben sich demnach drei Kriterien, die ein Experiment erfüllen muss, um als solches angesehen zu werden:

1. „Beobachtung unter künstlich hergestellten Bedingungen;
2. Isolation der zu untersuchenden Variablen;
3. Variation der zu untersuchenden Variablen.“⁹³

Diese Anforderungen erweitert er später noch um die Forderung nach der Durchführung eines Kontrollversuchs.⁹⁴

Betrachtet man nun die zur Erklärung der Corioliskraft untersuchten Unterrichtsmöglichkeiten, so stellt man fest, dass bei keiner diese Forderungen vollständig erfüllt werden, obwohl bei einigen Autoren durchaus der Begriff *Experiment* genutzt wird. Korrekter wäre es demnach, bei diesen Erklärungsansätzen von Modellen bzw. Funktionsmodellen zu sprechen und ggf. zusätzlich den Begriff des *Modell-Experiments* einzuführen, der eine experimentelle Ausrichtung eines Modells beschreibt, in dem einzelne Variablen variiert werden können. Dabei muss aber allen Beteiligten klar sein, dass das Modell-Experiment den wissenschaftspropädeutischen Ansatz der gymnasialen Ausbildungsgänge nicht vollständig abdecken kann.

Bei der Betrachtung und Bewertung der folgenden Modelle bleibt anzumerken, dass hiermit eine Beobachtung dieser Kraft angestrebt wird, auf deren Grundlage dann eine umfassende, wissenschaftlich korrekte Erklärung der Corioliskraft möglich sein sollte.

⁹² Meyer (2006), S. 128.

⁹³ Lethmate (2003), S. 42.

⁹⁴ vgl. Lethmate (2005), S. 264f.

5.1.1. Gezogenes Blatt

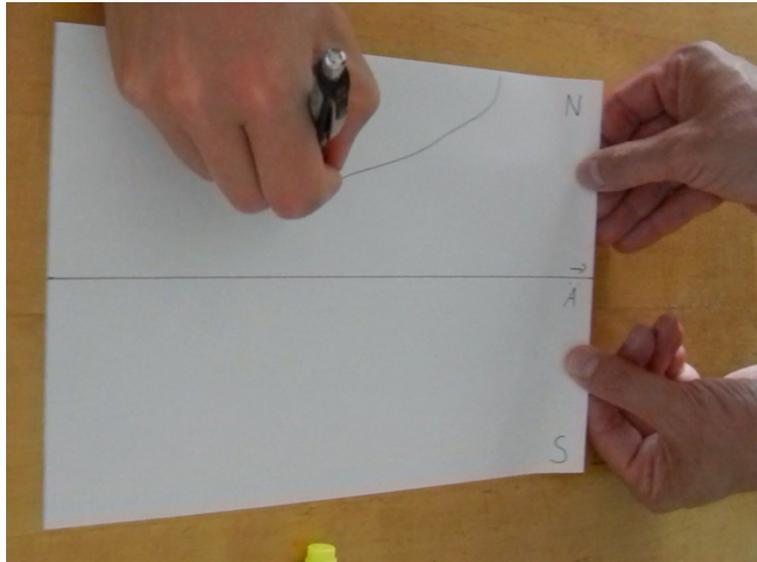


Abb. 18: Modell „gezogenes Blatt“⁹⁵

Im Rahmen der Umfrage wurde die Durchführung eines Modells beschrieben, das sich am besten mit dem Titel „gezogenes Blatt“ bezeichnen lässt (vgl. Abb. 18). Hierbei versetzt man sich zunächst in die Position eines Beobachters im Inertialsystem, der seinen Blick auf die Äquatorregion richtet. Er beobachtet nun ein Luftteilchen, das sich von den nördlichen mittleren Breiten zum Äquator hin bewegt. Bei Vernachlässigung der Erdrotation lässt sich dies mit dem Ziehen einer Linie (senkrecht zum Äquator) verdeutlichen, wie sie in Abb. 19 grau eingezeichnet ist. Für den Beobachter bewegt sich die Erdoberfläche durch die Erdrotation nach Osten, was durch das Ziehen des Blattes mit beiden Händen verdeutlicht wird. Überlagert man nun die beiden Bewegungen, so ergibt sich für das Luftteilchen eine nach Südwesten gerichtete Bahn, die für einen Beobachter im rotierenden System, der dem Luftteilchen nachschaut, nach rechts abgelenkt erscheint.

⁹⁵Hält man sich streng an die Versuchsanleitung, so würde man eine gerade Linie (vgl. Abb. 19) zeichnen. Da bei der Durchführung aber zunächst mit der äquatorwärts gerichteten Bewegung begonnen und erst dann das Blatt in zonaler Richtung gezogen wurde, kommt es zur dargestellten Bahn, die der Realität auch eher entspricht.

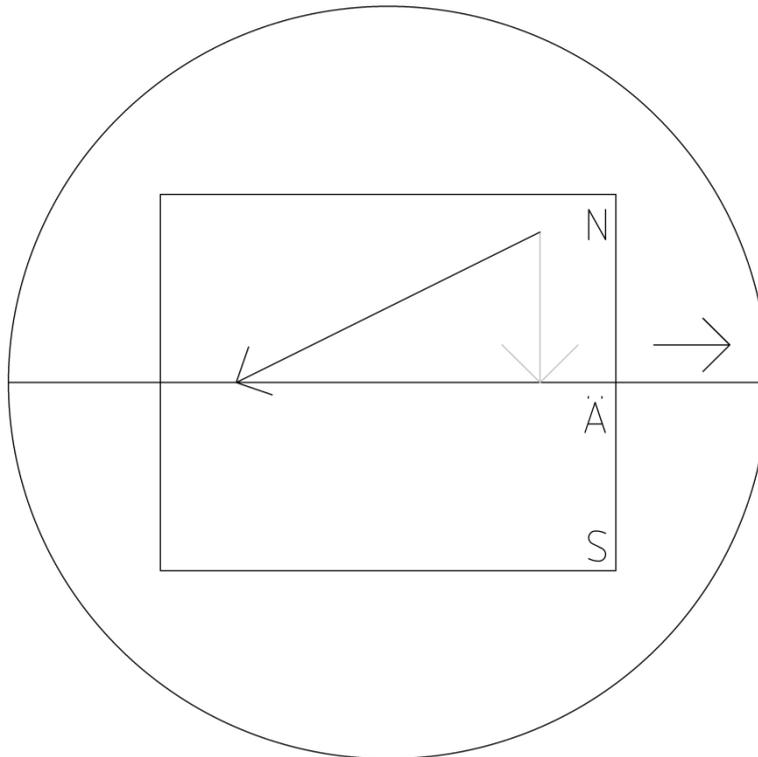


Abb. 19: Skizze „gezogenes Blatt“

Die Vorteile dieses Modells liegen vor allen Dingen in der extrem einfachen Durchführung, die im Unterricht als Freihandversuch z. B. in Partnerarbeit erfolgen kann und im geringen Materialaufwand, der mit den Utensilien, die normalerweise im Klassenzimmer vorhanden sind, gedeckt werden kann. Zur Optimierung der Durchführung des Modells bietet es sich an, dass der zeichnende Schüler entweder die Augen schließt⁹⁶, sich an einem Ziel außerhalb des Blattes orientiert oder entlang eines Lineals zeichnet, unter dem ein anderer Schüler das Blatt wegzieht.

Insgesamt kann das „gezogene Blatt“ als extrem didaktisch reduziertes Modell bezeichnet werden. So wird nicht nur, wie bei einer Vielzahl der im Unterricht eingesetzten Modelle und Modell-Experimente, die Kugelgestalt der Erde vollständig ignoriert, sondern auch ihre Drehung in eine geradlinige Bewegung überführt. Dadurch kann die Abhängigkeit der Bahngeschwindigkeit von der geographischen Breite in diesem Modell nicht dargestellt werden. Gleichzeitig wird bei der Durchführung des Versuchs von der falschen Annahme ausgegangen, dass die Bahngeschwindigkeit des Stifts

⁹⁶ vgl. Hell (2002), S. 9.

ständig derjenigen eines Luftteilchens in der Atmosphäre entspricht. Da die Bahngeschwindigkeit des Stifts aber den Wert Null aufweist, trifft dies nur zu, wenn sich das Luftteilchen direkt über einem der Pole befindet und somit keine Bewegungskomponente in zonaler Richtung innehat. Auf Grund dieser restriktiven Annahme kann das Modell - wenn überhaupt - nur auf äquatorwärts gerichtete Bewegungen angewendet werden. Besonders deutlich wird dies beim Überqueren des Äquators, wo sich in diesem Modell die Ablenkungsrichtung nicht ändert.

5.1.2. Das Pappscheibenmodell

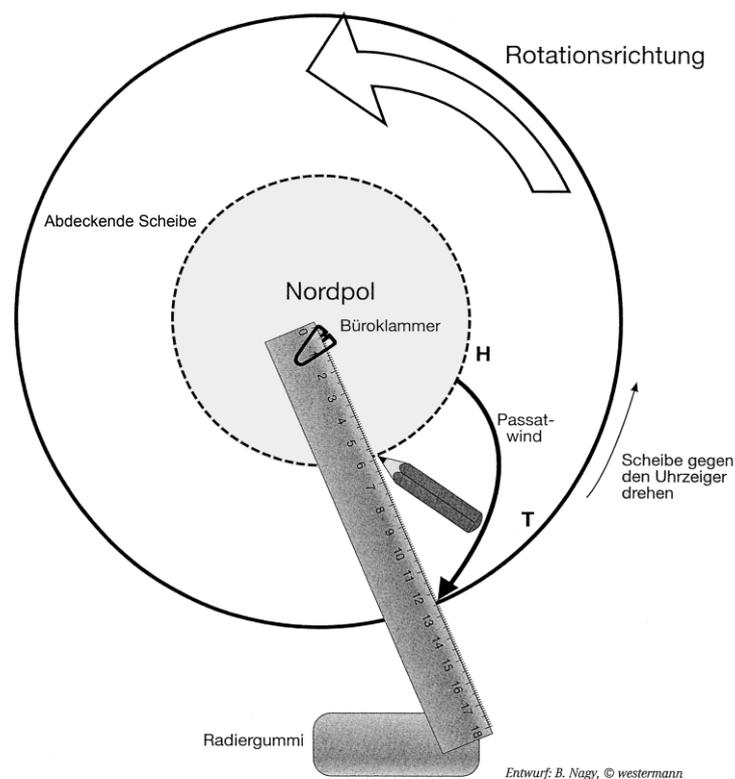


Abb. 20: Skizze Pappscheibenmodell (Nagy, 1999, S. 43)

Auch das Modell einer gedrehten Pappscheibe, das beispielsweise Nagy in ihrem Artikel „Die Ablenkung der Winde. Zwei Schülerversuche“ in der Praxis Geographie 11/1999 vorgestellt hat, wurde im Rahmen der Umfrage mehrmals als genutzte Unterrichtsmethode genannt.⁹⁷ Hierbei wird die Erde von oben betrachtet, wobei der Bereich zwischen dem Nordpol und dem subtropischen Hochdruckgürtel durch eine

⁹⁷ Ein ähnlicher Versuch wird beispielsweise auch bei Amtsfeld u.a. (2006), S. 38 vorgestellt.

zusätzliche Scheibe abgedeckt wird (vgl. Abb. 20). Dadurch versucht Nagy den Blick ausschließlich auf die Passatwindzone zu fokussieren, so dass die Ablenkung der dortigen Winde erklärt werden kann. Zur Vorbereitung fixieren die Schüler mit Hilfe einer Büroklammer, die im Zentrum einer Pappscheibe befestigt ist, ein Lineal, das zur besseren Drehbarkeit der Scheibe außen auf einem Radiergummi aufliegt. In der Durchführungsphase führt dabei „ein Schüler den Stift von Kreis H zu Kreis T am Lineal entlang, [...] während ein zweiter die Pappscheibe gegen den Uhrzeigersinn dreht.“⁹⁸ Die von den Schülern gezeichnete Linie, die nach rechts gekrümmt ist, soll den Passatwind darstellen.

Wie bereits beim „gezogenen Blatt“ können die Schüler auch bei der Durchführung dieses Modells relativ selbstständig arbeiten. Durch den geringen Materialaufwand ist es wiederum möglich, die Schüler in kleinen Gruppen, ggf. in Zweiertteams, sehr frei arbeiten zu lassen. Im Gegensatz zum vorherigen Modell wird hier die Rotation der Erde nicht in eine geradlinige Bewegung überführt, sondern, durchaus an der Realität, auch im Modell als Drehbewegung aufrecht erhalten, so dass hier die vom Radius abhängigen Bahngeschwindigkeiten berücksichtigt werden können. Dies wird aber mit einem deutlich höheren Aufwand beim Versuchsaufbau erkauft.

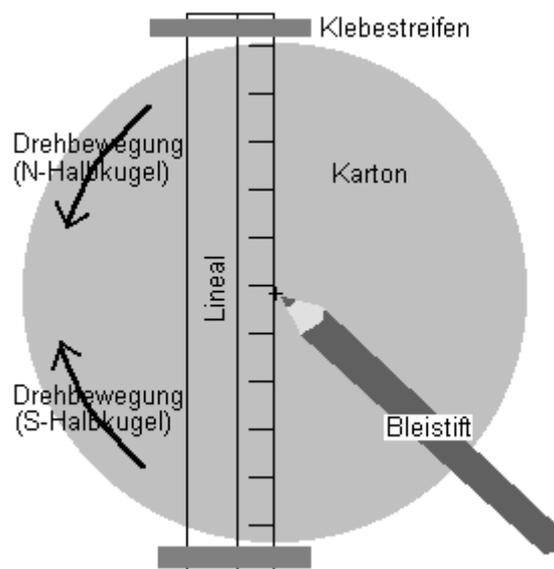


Abb. 21: Skizze Pappscheibenmodell (Forkel, 2008)

⁹⁸ Nagy (1999), S. 43.

Zudem tritt durch die Beschränkung des betrachteten Ausschnitts auf den Bereich zwischen dem subtropischen Hochdruckgürtel und der äquatorialen Tiefdruckrinne ein Fehler auf: Würden die Schüler die Bewegung eines vom Pol ausgehenden Luftteilchens zeichnen, wie es beispielsweise Forkel⁹⁹ (vgl. Abb. 21) vorschlägt, würde die Annahme stimmen, dass sowohl das Luftteilchen als auch der Stift an der Ausgangsposition keine Bahngeschwindigkeit aufweisen. Diese Annahme trifft aber auf eine Startposition am subtropischen Hochdruckgürtel nicht zu, da die Bahngeschwindigkeit des Stifts hier ebenfalls null ist, das entsprechende Luftteilchen aber bereits eine deutliche Geschwindigkeit aufweist. Letztendlich zeichnen die Schüler lediglich eine nach rechts gebogene Linie ein, die zwar in groben Zügen dem Verlauf des Nordostpassats entspricht, die ablenkende Wirkung der Corioliskraft aber nur ungenau wiedergibt. Durch das freie Arbeiten der Schüler ist außerdem die Wahrscheinlichkeit groß, dass einzelne Teams auch eine polwärts gerichtete Bewegung ausprobieren, die bei diesem Modell wiederum zu einem falschen Ergebnis führen würde. Die Schüler würden beim Einsetzen der Bewegung zunächst eine abrupte Ablenkung nach links beobachten, die dann in eine Rechtsablenkung übergeht (vgl. 5.1.3.). Dieser Fehler müsste dann im weiteren Unterricht thematisiert werden, was aber anhand des vorliegenden Modells nicht möglich ist und im Regelfall des Einsatzes weiterer Hilfen bedürfte.

⁹⁹ vgl. Forkel (2008)

5.1.3. Der Schreibglobus



Abb. 22: Darstellung der Corioliskraft am Schreibglobus bei äquatorwärts gerichteter Bewegung

Aus der im Rahmen dieser Untersuchung durchgeführten Umfrage ergibt sich, dass rund drei Viertel der Lehrer den Schreibglobus, der auch stummer oder Induktionsglobus genannt wird, zur Erklärung der Corioliskraft nutzen. Dabei wird der Globus langsam entsprechend der Rotationsrichtung der Erde (gegen den Uhrzeigersinn bzw. von W nach O) gedreht. Gleichzeitig wird während des Drehens ein Kreidestrich entlang des Haltebügels vom Pol Richtung Äquator gezogen (vgl. Abb. 22).¹⁰⁰ Im Transfer lässt sich erkennen, dass ein Luftteilchen, das ausgehend vom Nordpol eine Bewegungskomponente in Richtung Äquator aufweist, nicht dem direkten Weg folgt, sondern nach rechts abgelenkt wird, wobei diese Bahn in etwa auch der realen entspricht. Weitere Vorteile dieser Methode, die in vielen Unterrichtsmaterialien abgedruckt¹⁰¹ ist und im Rahmenplan des Landes Mecklenburg-Vorpommern für Klasse 9 verpflichtend vorgeschrieben ist, sind die extrem einfache Handhabung und die Durchführung auf einem **dreidimensionalen, rotierenden** Modell der Erde. Der benötigte Schreibglobus findet sich auch in den meisten Geographiesammlungen, kann

¹⁰⁰ vgl. z.B. Flath, Fischer (2010), S. 183 oder auch Amtsfeld u.a. (2006), S. 38.

¹⁰¹ vgl. z.B. Flath, Fischer (2010), S. 183 oder auch Hell (2002), S. 9.

aber ggf. auch durch einen normalen Globus ersetzt werden, auf den mit Folienstiften gezeichnet wird. Im Rahmen der Umfrage und einiger gezielter Lehrerinterviews wurde die Erklärung mit Hilfe des Schreibglobus vor allen Dingen wegen ihrer hohen Anschaulichkeit und der leichten Nachvollziehbarkeit für die Schüler gelobt. Ein Kollege erklärte auch, dass er mangels eines Globus für die Durchführung den Mülleimer aus dem Klassenzimmer als passendes Modell einsetzt, auf dessen zylindrischen Mantel er die Rechtsablenkung einzeichnet.

Schmidtke beschreibt in seinem Buch „Fünf-Minuten-Experimente für den Geographieunterricht“, eine weitere Versuchsvariante:

„Setzt man die Kreide am Äquator an und bewegt sie in Richtung Nordpol bei gleichzeitiger W-O-Drehung der Erde, wird die Bahn des Luftteilchens nach Osten abgelenkt.“¹⁰²

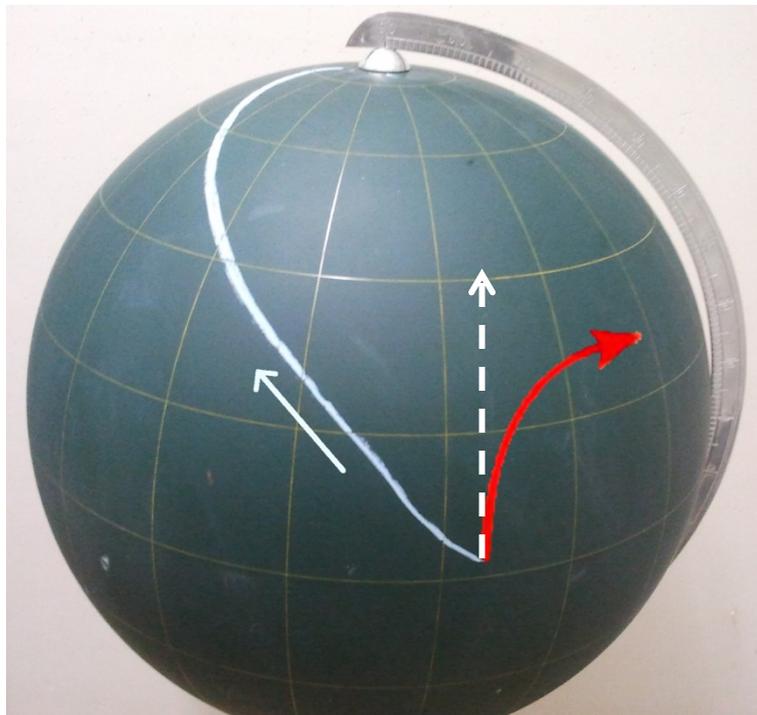


Abb. 23: Darstellung der Corioliskraft am Schreibglobus bei polwärts gerichteter Bewegung

Führt man nun genau diesen Versuch durch, so ergibt sich die Situation, die in Abb. 23 mit dem weißen Kreidestrich dargestellt wird. Hier zeigen sich die Grenzen des Modells: Zwar lässt sich im Verlauf der Bahn, zumindest in den höheren Breiten, eine Ablenkung nach rechts erkennen, das Luftteilchen, das laut Definition in meridionaler

¹⁰² Schmidtke (1995), S. 124.

Richtung gestartet ist (gestrichelter Pfeil), scheint sich hier zunächst aber nach Nordwesten und nicht direkt nach Norden zu bewegen. Eine tatsächlich mögliche Bahnkurve ist in Abb. 23 in Rot eingezeichnet. Der einfließende Fehler begründet sich, wie auch bei den beiden vorangegangenen Modellen, durch die Tatsache, dass im Gegensatz zum immobilen Stift, das beobachtete Luftteilchen am Äquator eine hohe Bahngeschwindigkeit aufweist. Anders ausgedrückt lässt sich auch sagen, dass das Luftteilchen sich im rotierenden System befindet, der Stift im ruhenden System.

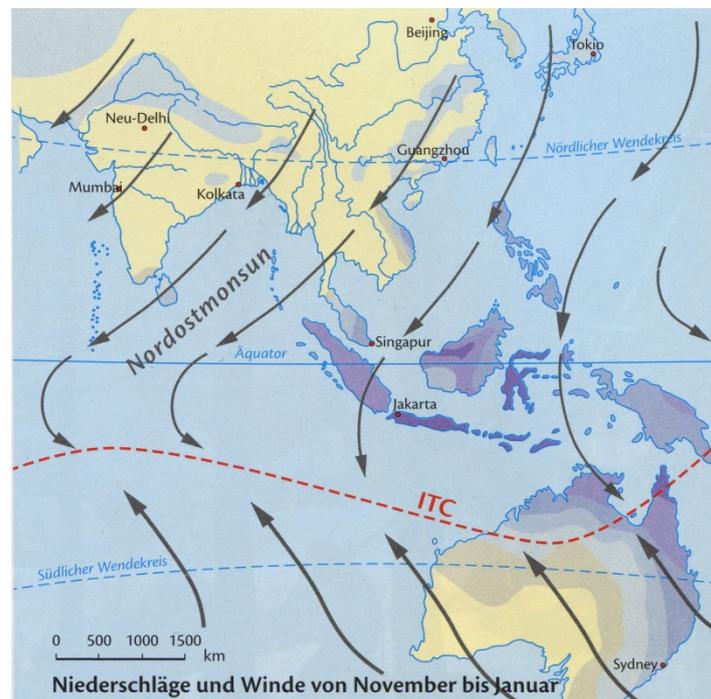


Abb. 24: Der Monsun in Südostasien (Flath, 2010, S. 189)

Ein weiterer Fehler ergibt sich beim Übertritt eines Luftteilchens von der Nord- auf die Südhalbkugel. Durch die jahreszeitliche Verschiebung der ITC überqueren die Passatwinde den Äquator sowohl in südlicher als auch in nördlicher Richtung. Dabei nimmt die Corioliskraft bei der Annäherung an den Äquator kontinuierlich ab, hat dort den Wert Null und ändert mit dem Wechsel auf die andere Halbkugel ihre Richtung. Dies wird beispielsweise im Bereich Südostasiens (vgl. Abb. 24) deutlich. Versucht man nun diese Situation am stummen Globus nachzustellen (vgl. Abb. 25), so zeigt sich, dass auch in diesem Modell die Stärke der Ablenkung im Bereich des Äquators sehr gering ist. Der Wechsel von einer Rechts- zu einer Linksablenkung ist erkennbar, wenngleich die Linksablenkung zunächst viel zu gering ausfällt und damit bei

Weitem nicht der Realität (vgl. Abb. 24) entspricht. Auch hier liegt der Fehler wieder an der Tatsache, dass der Stift keine Bahngeschwindigkeit aufweist.



Abb. 25: Darstellung der Corioliskraft am Schreibglobus bei N-S-Bewegung und Äquatorübertritt

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Darstellung mit Hilfe des Schreibglobus für den Sonderfall einer äquatorwärts gerichteten Bewegung, die nicht denselben überquert, sehr anschaulich ist, bei allen anderen Bewegungen das Modell aber mit gravierenden Fehlern behaftet ist.

5.1.4. Stummer Globus mit Wassertropfen

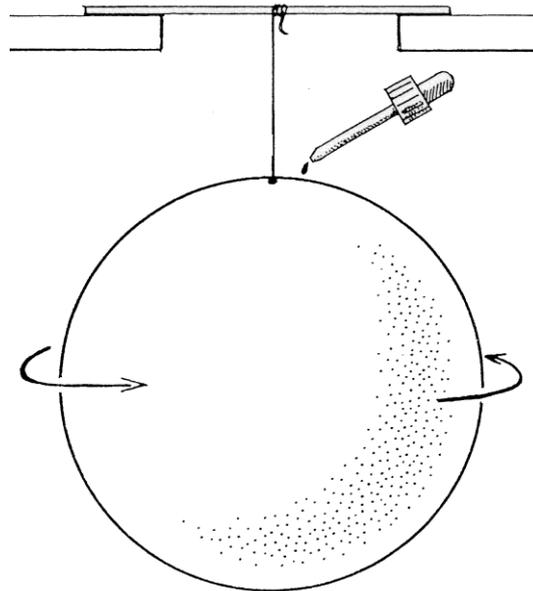


Abb. 26: Plastikball mit Wassertropfen (Fraedrich, 1997, S. 13)

Mit gerade einmal drei Nennungen in der Umfrage wird das von Fraedrich im Rahmen seiner Lernkartei beschriebene Modell-Experiment zur Corioliskraft¹⁰³ eher selten umgesetzt.

Bei diesem Modell wird ein einfarbiger Plastikball mit Wasser gefüllt und mit Hilfe einer Schnur drehbar aufgehängt (vgl. Abb. 26). Nun wird der Ball in Rotation versetzt und hält durch seine große Masse diese Bewegung relativ konstant bei. Mit einer Pipette bringt man einen Tropfen Wasser oder verdünnte Farbe in der Nähe des Nordpols auf. Durch die Schwerkraft erhält dieser Tropfen eine Bewegungskomponente nach unten (in Richtung Südpol) und wird durch die Corioliskraft auf der oberen Hälfte der Kugel nach rechts abgelenkt.

¹⁰³ Fraedrich (1997), S. 13.

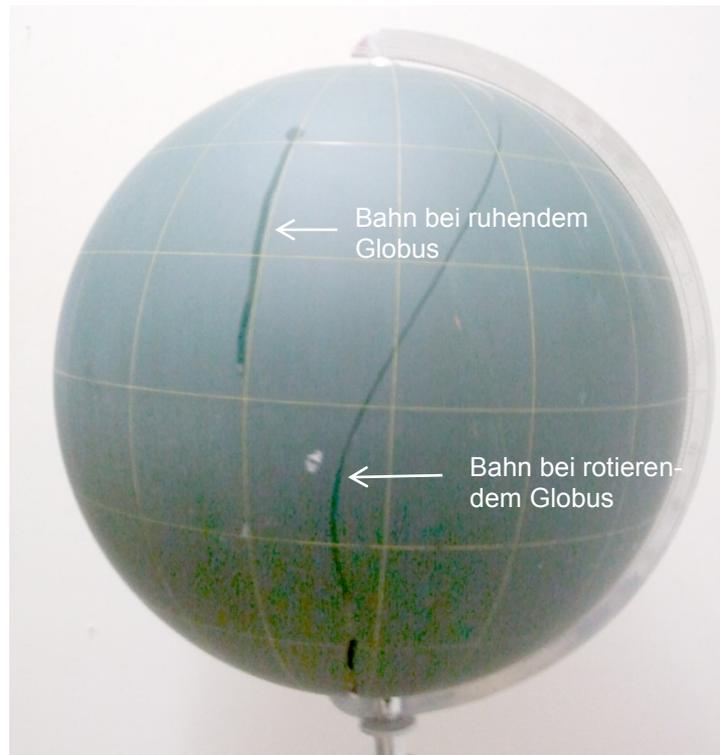


Abb. 27: Wassertropfen auf einem Schreibglobus

Alternativ lässt sich das von Fraedrich beschriebene Modell auch mit Hilfe eines Schreibglobus demonstrieren. Dabei sollte dessen Achse möglichst senkrecht stehen und die Rotationsgeschwindigkeit, wie auch bei der Variante mit dem Plastikball, relativ groß sein. In Abb. 27 sieht man auf der linken Seite einen Tropfen, der sich bei ruhendem Globus nach unten bewegt, auf der rechten Seite einen Tropfen, der seinen Weg bei rotierendem Globus zurückgelegt hat. Bei der Bahn des rechten Tropfens, der im Bereich des Nordpols aufgebracht wurde, sieht man auf der Nordhalbkugel eine deutliche Ablenkung nach rechts, die zum Äquator hin immer schwächer wird. Kurz nach dem Wechsel auf die Südhalbkugel wirkt nun die Corioliskraft in die entgegengesetzte Richtung und der Tropfen erfährt eine Ablenkung nach links. Dies entspricht auch in etwa der Situation des Monsuns in Südostasien (vgl. Abb. 24).

Im Gegensatz zur Zeichnung mit der Kreide (vgl. Kap. 5.1.3.), nimmt hier der Tropfen auf Grund der Reibung nach und nach die Rotationsbewegung des Globus an, wie es auch einem Luftteilchen in der Atmosphäre entsprechen würde. Da dadurch der Tropfen am Äquator nahezu die Bahngeschwindigkeit des Globus aufweist, lässt sich hier auch die Bewegung von niederen zu hohen Breiten und damit die Corioliskraft bei einer polwärts gerichteten Bewegung zeigen. Damit hebt sich dieses Modell deut-

lich von den vorangegangenen Erklärungsversuchen ab, bei denen lediglich die äquatorwärts gerichteten Bewegungen korrekt beobachtbar waren. Weitere Vorteile sind, gerade beim Einsatz des Schreibglobus, der geringe materielle Aufwand und die problemlose praktische Umsetzung.

Allerdings ist die Beobachtung des Prozesses auf Grund der benötigten hohen Rotationsgeschwindigkeit und dem damit verbundenen schnellen Ablauf direkt nicht möglich. Sie muss indirekt über die Spur des Tropfens erfolgen. Zudem lassen sich die einzelnen Faktoren der Corioliskraft im Rahmen dieses Modells nur bedingt kontrollieren. Insbesondere kann die anfängliche Bewegungsrichtung des Tropfens nicht variiert und seine meridionale Geschwindigkeit auf Grund der Kugelgestalt des Globus nicht konstant gehalten werden. Ebenso ist durch das Ablösen des Tropfens deutlich vor Erreichen des Südpols die Beobachtung im Bereich der unteren Halbkugel stark eingeschränkt.

5.1.5. Rotierender Kegelstumpf

Bereits 1952 wurde von Wolf¹⁰⁴ das relativ aufwendige Modell eines rotierenden Kegelstumpfs beschrieben, mit dessen Hilfe sich die Ablenkung sowohl einer äquatorwärts als auch einer polwärts gerichteten Bewegung durch die Corioliskraft verdeutlichen lässt.

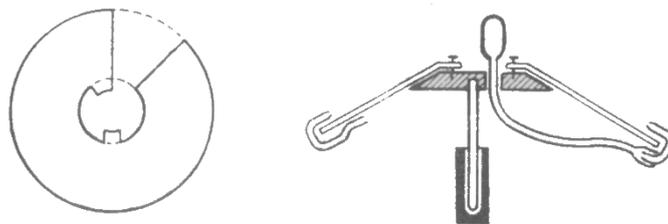


Abb. 28: Konstruktionsskizze des Modells "rotierender Kegelstumpf-Mantel" (Wolf, 1952/1953, S. 241)

„Als rotierende ‚Erdoberfläche‘ [...] dient ein Kegelstumpf-Mantel ($R = 35 \text{ cm}$; $r = 5 \text{ cm}$), der aus einem Kreisausschnitt ($7/8$ des Vollkreises) von steifem Glanzkarton oder Blech gebogen und durch einige Heftnadeln bzw. Nieten in dieser Form gehalten wird. An zwei stehen gelassenen Laschen ist die Spitze des Kegelstumpfes auf einem passenden Stück Holzleiste befestigt, die als zentrische Achse einen Rund-

¹⁰⁴ vgl. Wolf (1952/1953), S. 241f.

stab (z. B. lange Schraube ohne Kopf) hat. Letztere wird senkrecht drehbar gehalten¹⁰⁵ (vgl. Abb. 28).

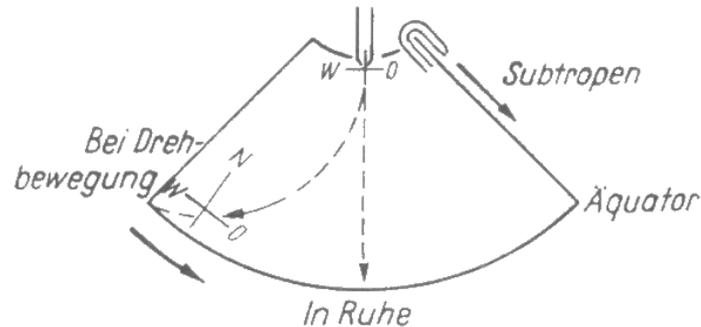


Abb. 29: Äquatorwärts gerichtete Bewegungen im Modell "rotierender Kegelmantel" (Wolf, 1952/1953, S. 241)

Zunächst wird an der Oberkante des Kegelmantels eine Düse angebracht (vgl. Abb. 29), über die mit Hilfe eines Pipettierballs, ähnlich wie bei einer Wasserpistole, durch einen kurzen Druck ein dünner Strahl über den Kegelmantel gespritzt werden kann. Dabei soll die Spur des Wassers die Bewegung der Luftmassen verdeutlichen.

In seinen Ausführungen zum Nordostpassat empfiehlt Wolf zunächst die Durchführung einer „Probesspritzung in Ruhe“¹⁰⁶, die die Bewegung eines äquatorwärts gerichteten Luftteilchens bei stehender Erde verdeutlicht. Nun wird der Kegelschirm in Rotation versetzt und die Spritzvorrichtung ein weiteres Mal betätigt. In Abhängigkeit von der Rotationsgeschwindigkeit und der Geschwindigkeit des Wasserstrahls, die sich durch verschieden starkes Drücken auf den Pipettierball variieren lässt, ist die Rechtsablenkung unterschiedlich stark (vgl. Abb. 29).

Im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Modellen lässt sich mit Hilfe des Kegelmantels problemlos auch die Bewegung vom Äquator zum Nordpol darstellen. Dazu wird lediglich die mit einer Wäscheklammer befestigte Düse vom oberen auf den unteren Mantelrand umgesteckt. „Nach einigem Probieren erhält man dann auch Bahnen, die der nahezu reinen Westrichtung entsprechen.“¹⁰⁷

¹⁰⁵ ebd., S. 241.

¹⁰⁶ ebd., S. 241.

¹⁰⁷ ebd., S. 241.

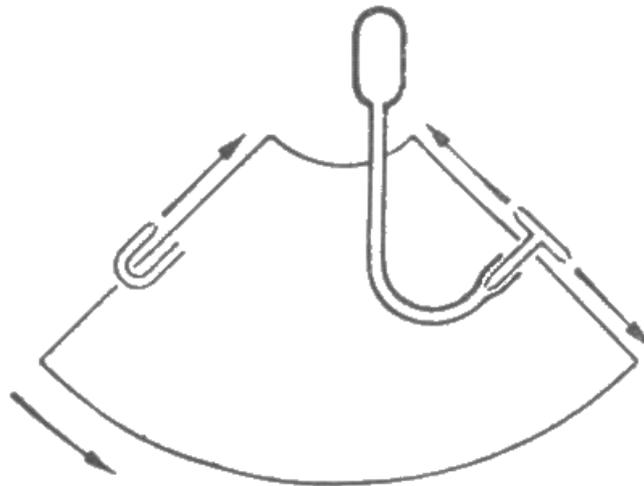


Abb. 30: Variation des Modells "rotierender Kegelstumpf-Mantel" bei gleichzeitiger Darstellung von pol- und äquatorwärts gerichteten Bewegungen (Wolf, 1952/1953, S. 242, leicht verändert)

Als weitere Variante beschreibt Wolf die Möglichkeit, eine t-förmige Doppeldüse in der Mitte des Mantels anzubringen, so dass man gleichzeitig eine äquatorwärts und eine polwärts gerichtete Bewegung beobachten kann (vgl. Abb. 30).

In didaktischer Reduktion wurde bei diesem Modell die Nordhalbkugel in einen Kegelstumpf-Mantel überführt, der, nach der Darstellung von Kohfahl, „einen Ausschnitt der Erdoberfläche ungefähr zwischen dem nördlichen Wendekreis und $60^\circ - 70^\circ$ N darstellen soll.“¹⁰⁸ Im Gegensatz zum vorhergenannten Modell des Schreibglobus (vgl. Kap. 5.1.3.) bzw. des stummen Globus (vgl. Kap. 5.1.4.) stellt dies natürlich eine deutliche Vereinfachung dar, die aber durch die Betrachtung eines kleinen Teilausschnitts der Erdoberfläche nicht allzu sehr ins Gewicht fällt. Außerdem sind die Ergebnisse dieses Modells nicht problemlos reproduzierbar. Dies liegt einerseits daran, dass die Geschwindigkeit des Strahls vom Druck auf den Pipettierball abhängig ist, wobei dieser durch die Tatsache, dass er mit der Apparatur mitrotiert, nur sehr schwer kontrolliert bedienbar ist. Andererseits wird, wie bei den vorangegangenen Modellen auch, die Rotationsgeschwindigkeit nicht konstant gehalten. Diese nimmt durch die einfache Lagerung der Achse und die damit verbundene starke Reibung in diesem Modell schnell ab.

¹⁰⁸ Kohfahl (1994), S. 44.

5.1.6. Modelle und Modell-Experimente auf rotierenden Scheiben

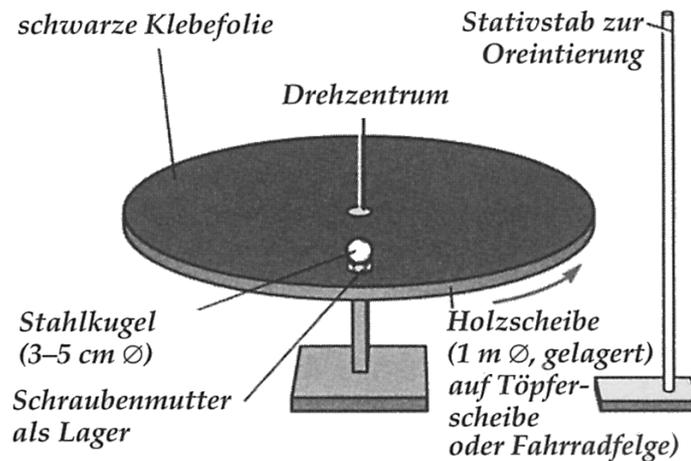


Abb. 31: Kugel auf einer rotierenden Scheibe (Muckenfuß, 1997, S. 20)

Insbesondere im Bereich der Unterrichtsmaterialien für den Physikunterricht finden sich immer wieder Versuche, die auf rotierenden Scheiben durchgeführt werden. Dafür setzt beispielsweise Muckenfuß eine horizontal montierte, kugelgelagerte Scheibe (z. B. Töpferscheibe oder Fahrradfelge) ein, die von Hand in Rotation versetzt wird. „Die betrachtete Luftmasse wird durch eine Stahlkugel (\varnothing 4-6 cm) repräsentiert, die auf einer kleinen Schraubenmutter so gelagert ist, dass sie bei langsam rotierender Scheibe liegen bleibt.“¹⁰⁹ (vgl. Abb. 31) Stößt man nun die Kugel mit dem Finger an, so rollt sie über die Scheibe. Betrachtet man dieses Modell von außen, also aus dem Inertialsystem, so lässt sich erkennen, dass die Kugel auf einer geraden Linie zum Scheibenrand rollt. Um diese Beobachtung zu erleichtern, stellt Muckenfuß zusätzlich einen Stativstab neben der rotierenden Scheibe auf und stößt die Kugel in dessen Richtung an. Da diese nun auch tatsächlich auf den Stativstab zurollt, wird ihre geradlinige Bewegung noch einmal deutlicher.

Die Beobachtung im rotierenden System erleichtert Muckenfuß durch das Einreiben der Kugel mit Kreidestaub, so dass diese eine deutliche Spur auf der Scheibe hinterlässt. Wie erwartet lässt sich bei einer nach links (also gegen den Uhrzeigersinn) rotierenden Scheibe eine Ablenkung der Kugel nach rechts erkennen.

¹⁰⁹ Muckenfuß (1997), S. 20.

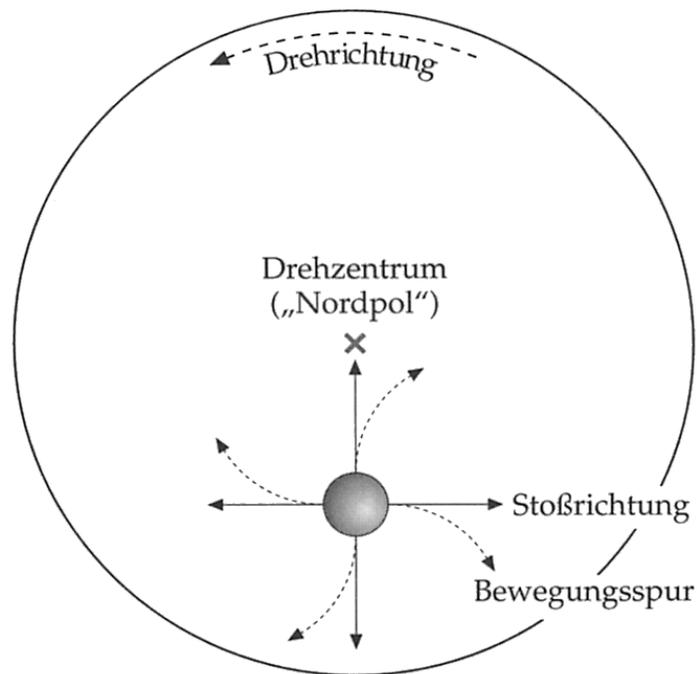


Abb. 32: Ablenkung einer Kugel auf einer rotierenden Scheibe (Muckenfuß, 1997, S. 20)

Im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Modellen ist hier nicht mehr nur die Beobachtung von Bewegungen in meridionaler Richtung, sondern in jeder beliebigen, also auch in zonaler Richtung möglich (vgl. Abb. 32).

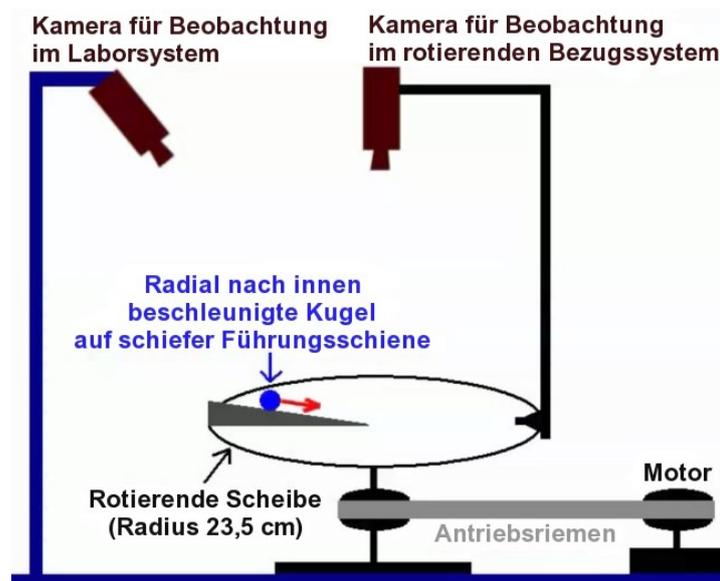


Abb. 33: Schematischer Versuchsaufbau auf rotierender Scheibe mit Kameras in beiden Bezugssystemen (Diehl u.a., 2008, entnommen aus Video)

Deutlich aufwendiger, aber nicht ganz so flexibel gestaltet sich ein ähnlicher Aufbau, der im Schulbuch Physik Oberstufe¹¹⁰ des Cornelsen-Verlags dargestellt wird. Hier treibt ein Motor über einen Antriebsriemen eine kleinere Scheibe an (vgl. Abb. 33). Die Kugel wird hier mit Hilfe einer fest montierten Rampe beschleunigt und zentral in der Mitte der Scheibe, die hier den Pol verdeutlicht, aufgesetzt. Die Beobachtung erfolgt mit zwei verschiedenen Kameras, wobei sich jeweils eine im rotierenden System („Scheibe“), eine im Inertialsystem (Laborsystem „Tisch“) befindet (vgl. Abb. 34).

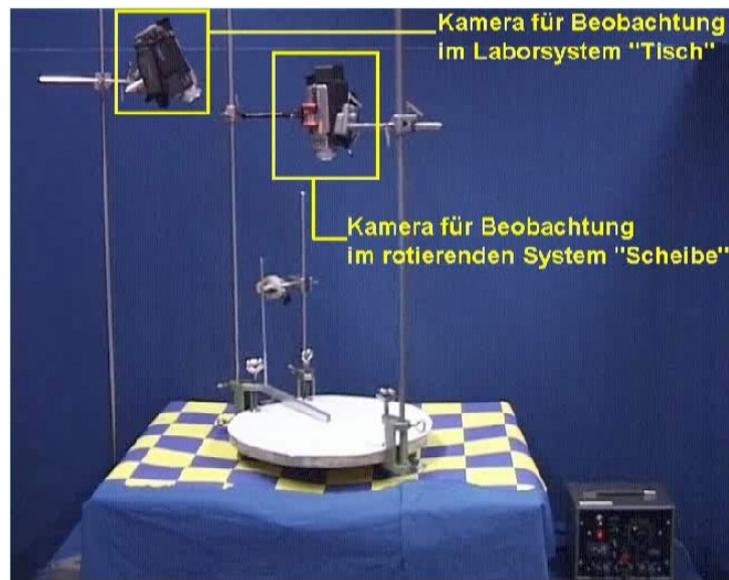


Abb. 34: Versuchsaufbau auf rotierender Scheibe mit Kameras in beiden Bezugssystemen (Diehl u.a., 2008, entnommen aus Video)

Durch die zwei Kameras ist es relativ einfach, die beiden Bewegungen zu vergleichen, wobei schnell deutlich wird, dass bei der Betrachtung aus dem Inertialsystem die gleichförmige, geradlinige Bewegung beibehalten wird, während es bei der Betrachtung aus dem rotierenden System zu einer Ablenkung kommt (vgl. Abb. 35). In diesem Beispiel wurde aus geographiedidaktischer Sicht allerdings ungeschickterweise eine Rotation im Uhrzeigersinn gewählt, so dass das Modell der Bewegung auf der Südhalbkugel entspricht und es somit zu einer Ablenkung nach links kommt.

¹¹⁰ Diehl u.a. (2008).



Blick aus dem Inertialsystem

Blick aus dem rotierenden System

Abb. 35: Darstellung der Bahn eines äquatorwärts gerichteten Luftteilchens auf der Südhalbkugel aus zwei verschiedenen Kameraperspektiven (Diehl u.a., 2008, leicht verändert, entnommen aus Video)

Auch bei diesem aufwendigen Aufbau aus dem Physikunterricht sind nicht alle Anforderungen an ein Experiment, wie es Lethmate (vgl. Kap. 5.1.) fordert, erfüllt. Zwar sind die Ergebnisse, vor allen Dingen durch den Einsatz eines elektrischen Antriebs, durchaus reproduzierbar und somit in Kontrollversuchen wiederholbar, die eingehenden Variablen werden aber im vorgestellten Beispiel in keiner Weise variiert, so dass es sich auch hier wiederum eindeutig um ein Modell handelt. Besonders einschränkend ist dabei die Tatsache, dass die Richtung der rollenden Kugel quasi fix vorgegeben ist und somit einer Bewegung vom Pol zum Äquator entspricht. Als zusätzlicher einschränkender Faktor für den Geographieunterricht geht, wie bereits angemerkt, ein, dass in Diehls Video die Rotation im Uhrzeigersinn erfolgt und damit der Situation auf der Südhalbkugel entspricht.

Bei beiden hier vorgestellten Modellen auf „rotierenden Scheiben“ bleibt aber auch, wie schon beim „Pappscheibenmodell“ (vgl. Kap. 5.1.2.), das Problem des Übergangs von der dreidimensionalen Erde auf eine zweidimensionale Scheibe ungelöst.

5.1.7. Das Flachschüsselmodell

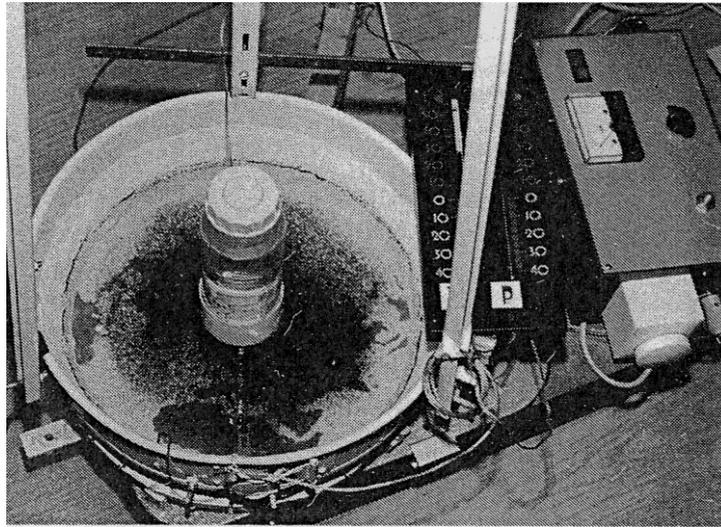


Abb. 36: Flachschüsselmodell (Klaus, Janßen, 1982, S. 38)

Das Flachschüsselmodell, das Klaus und Janßen im Jahre 1982 in der Zeitschrift „Geographie und Schule“¹¹¹ vorgestellt haben, hebt sich von allen bislang dargestellten Modellen deutlich ab: Hier wird nicht versucht, ein einzelnes Luftteilchen zu beobachten, sondern die gesamte atmosphärische Zirkulation einer Halbkugel mit relativ großem Aufwand nachzubilden. Dazu wird eine runde Flachschüssel aus Glas drehbar gelagert und mit Wasser bzw. einer Mischung aus Wasser und Glycerin gefüllt. Um die von der geographischen Breite abhängige Einstrahlung nachstellen zu können, befindet sich in ihrer Mitte ein Blechring, der den kalten Pol verdeutlicht. In ihn können Eiswürfel bzw. Kühlelemente eingefüllt werden. Die warme Äquatorregion wird nach der Beschreibung von Klaus und Janßen durch einen am Rand der Flachschüssel angebrachten elektrischen „Heizring, der aus einem Kupferrohr mit eingezogener Heizspirale besteht“¹¹² dargestellt (vgl. Abb. 36). Alternativ ließe sich der Aufwand der Beheizung auch deutlich verringern, indem man einfache Teelichter unter den äußeren Rand der Flachschüssel stellt.

In einem ersten Schritt streut man nun Aluminium- oder Kunststoffspäne in die Flachschüssel und beobachtet die sich einstellende Zirkulation, ohne die Apparatur in Rotation zu versetzen. „Kalte Flüssigkeit strömt am Boden äquatorwärts, wo sie

¹¹¹ vgl. Klaus, Janßen (1982), S. 36ff.

¹¹² ebd., S. 38.

aufsteigt und in der Höhe polwärts driftet. Mit wachsendem Temperaturgradient zwischen Pol und Äquator gewinnt diese Zirkulation vom Hadleytyp deutlich an Intensität [...].¹¹³

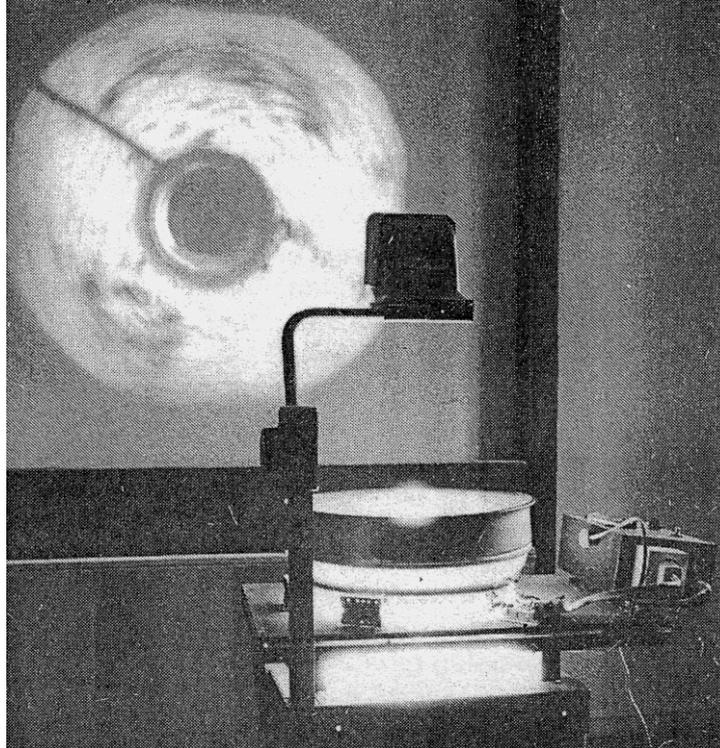


Abb. 37: Projektion des Flachschüsselmodells (Klaus, Janßen, 1982, S. 37)

Da sich ein so aufwendiges Modell nicht als Schülerversuch anbietet und es kaum möglich sein wird, eine komplette Klasse um die Flachschüssel zu versammeln, liegt es nahe, den gesamten Versuchsaufbau auf einen Overheadprojektor zu stellen und die Bewegungen auf eine Leinwand zu projizieren (vgl. Abb. 37).

Versetzt man nun in einem zweiten Versuchsschritt die gesamte Apparatur in langsame Rotation, so verändert sich die bisher beobachtete Zirkulation in eine spiralförmige Bewegung. Erhöht man nun die Rotationsgeschwindigkeit weiter, so bildet sich eine zonale Strömung gegen den Uhrzeigersinn (also mit der Bewegungsrichtung der Apparatur) aus. Damit lässt sich, neben einigen anderen Prozessen, auch die Ablenkung durch die Corioliskraft beobachten.

Das Flachschüsselmodell bietet aber nicht nur die Möglichkeit, die Corioliskraft, sondern eine Vielzahl weiterer Erscheinungen im Zusammenhang mit der atmosphäri-

¹¹³ ebd., S. 38.

schen Zirkulation darzustellen. Erhöht man beispielsweise die Drehzahl noch weiter, so kann man neben einem Strahlstrom auch die Bildung von zyklonalen und antizyklonalen Wirbeln an der Wasseroberfläche beobachten.

Beim Einsatz dieses Modells lässt sich nicht nur die Rotationsgeschwindigkeit durch die Veränderung der Drehzahl variieren, sondern auch die Strömungsgeschwindigkeit in der Zirkulation. Dies geschieht beispielsweise durch die Erhöhung der Heizleistung und die damit verbundene Veränderung des Temperaturgradienten. Durch diese vielen Variationsmöglichkeiten und die daraus resultierende Komplexität bietet sich der Einsatz der Flachsüssel zur Erklärung der Corioliskraft nur sehr bedingt an, da diese als Einzelphänomen hieraus nur schwer zu isolieren ist.

5.1.8. Das Nachspiel-Modell

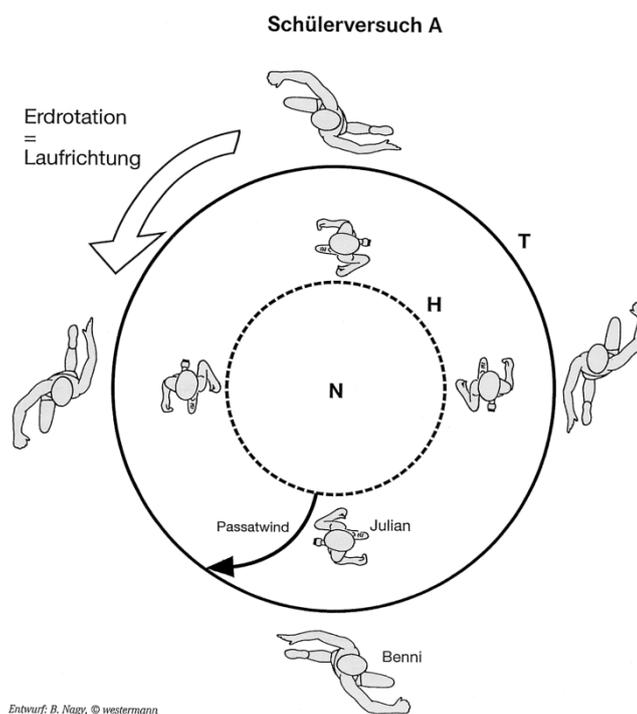


Abb. 38: Nachspiel-Modell der Corioliskraft (Nagy, 1999, S. 42)

Eine völlig andere Herangehensweise, aber dennoch modellartig, beschreibt Nagy in ihrem Aufsatz „Die Ablenkung der Winde. Zwei Schülerversuche.“¹¹⁴ Dazu zeichnet

¹¹⁴ vgl. Nagy (1999), S. 42f.

sie im Schulhof mit Kreide zwei konzentrische Kreise auf, wobei der äußere die äquatoriale Tiefdruckrinne, der innere den subtropischen Hochdruckgürtel verdeutlicht (vgl. Abb. 38). Nun werden vier Schülerpaare so positioniert, dass jedes Schülerteam einen Längengrad darstellt. Dabei steht je ein Schüler im Bereich der äquatorialen Tiefdruckrinne, einer im Bereich des subtropischen Hochdruckgürtels. Nun beginnen die Schülerteams sich in Richtung der Erdrotation zu bewegen, wobei selbstverständlich die zusammengehörenden Schüler weiterhin mit dem Kreismittelpunkt eine Linie bilden. Demzufolge bewegen sich die Schüler auf dem inneren Kreis deutlich langsamer als die auf dem äußeren.

Nun werden die innen gehenden Schüler aufgefordert „den ‚subtropischen Hochdruckgürtel‘ (Kreis H) zu verlassen und unter Beibehaltung ihrer Geschwindigkeit und Richtung als ‚Passatwinde‘ zur ‚äquatorialen Tiefdruckrinne‘ (Kreis T) zu gehen.“¹¹⁵ Dabei wird deutlich, dass die innen gehenden Schüler hinter ihren schnelleren Teamkollegen zurückbleiben. Im optimalen Fall lässt sich so eine kontinuierliche Rechtsablenkung der „Passatschüler“ erkennen.

An dieser Stelle enden die Ausführungen Nagys, wobei es durchaus auch möglich wäre, die Gegenbewegung, also polwärts gerichtete Winde, darzustellen.

So einfach diese Umsetzung auch erscheint, so kann sie doch als fachlich durchaus korrekt bezeichnet werden, wenn auch die Projektion der kugelförmigen Erde auf den flachen Schulhof als Vereinfachung im Sinne einer didaktischen Reduktion einget. Die Probleme entstehen aber dadurch, dass die Schüler ihre Geschwindigkeit ohne Hilfsmittel nicht konstant beibehalten können und sich ihre Bewegung nur schwer dokumentieren lässt. Dies ließe sich beispielsweise dadurch umgehen, dass die Schüler im inneren Kreis immer nur einen Fuß vor den anderen setzen dürfen, während die im äußeren Kreis normale Schritte machen. Hiermit verbunden wäre auch der Vorteil, dass man die Veränderungen im wahrsten Sinne des Wortes „schrittweise“ beobachten könnte.

5.2. Deskriptive Erklärungen

Neben dem Einsatz von Modellen und Modell-Experimenten gibt es auch rein deskriptive Erklärungen für die Corioliskraft. Gerade die ersten beiden der folgenden

¹¹⁵ ebd., S. 43.

Umsetzungen (vgl. Kap. 5.2.1. und 5.2.2.) stellen sogenannte Gedankenmodelle dar und sind den bisher vorgestellten Erklärungsmöglichkeiten sehr ähnlich, werden aber ohne praktischen Anteil durchgeführt.

Meist ergänzen diese deskriptiven Erklärungen den Einsatz eines Modells zu einer Kombinationserklärung, so dass die Schüler die im Versuch beobachteten Tatsachen auch logisch begründen können.

5.2.1. Der Joggeransatz

Die Erklärung mit Hilfe des Joggeransatzes wurde im Rahmen der Umfrage und einiger Gespräche mit Fachkollegen mehrmals als Unterrichtsvariante genannt. Dabei unterscheidet sie sich nur minimal von dem in Kapitel 5.1.8. vorgestellten Modell, bei dem die Bewegungen der Luftteilchen von den Schülern nachgespielt werden.

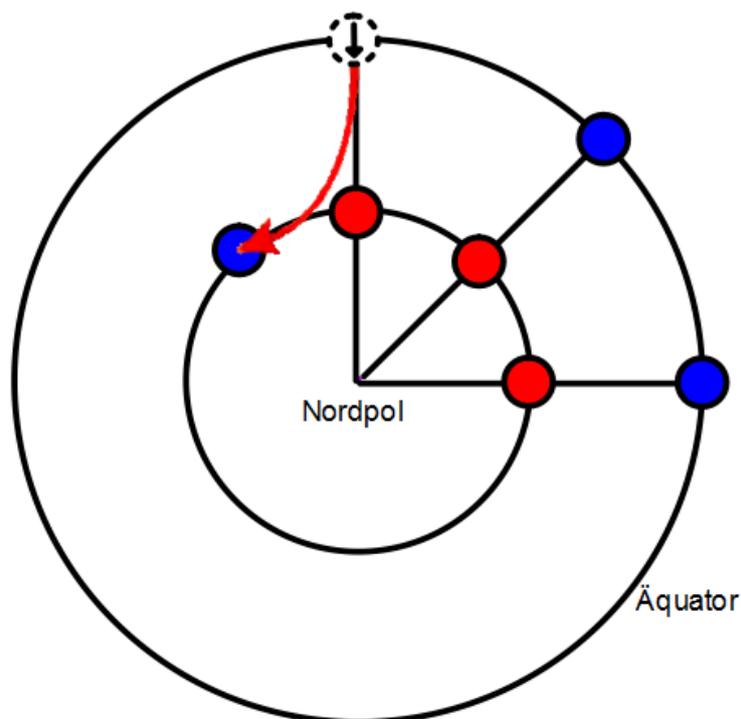


Abb. 39: Joggeransatz, polwärts
(Screenshot der Darstellung auf einem interaktiven Whiteboard)

Zwei Jogger laufen nebeneinander auf zwei konzentrischen Kreisen. Um auf gleicher Höhe zu bleiben, muss der Äußere pro Runde einen längeren Weg zurücklegen als der Innere. Demzufolge läuft der Jogger auf der Außenbahn mit einer höheren Geschwindigkeit als sein Sportkollege. Wechselt er nun unter Beibehaltung seiner Geschwindigkeit auf die innere Bahn, so ist er seinem Kollegen voraus (vgl. Abb. 39).

Wechselt dagegen der Sportler auf der inneren Bahn (ebenfalls unter Beibehaltung seiner Geschwindigkeit) auf die Außenbahn, so bleibt er hinter seinem Partner zurück (vgl. Abb. 40).

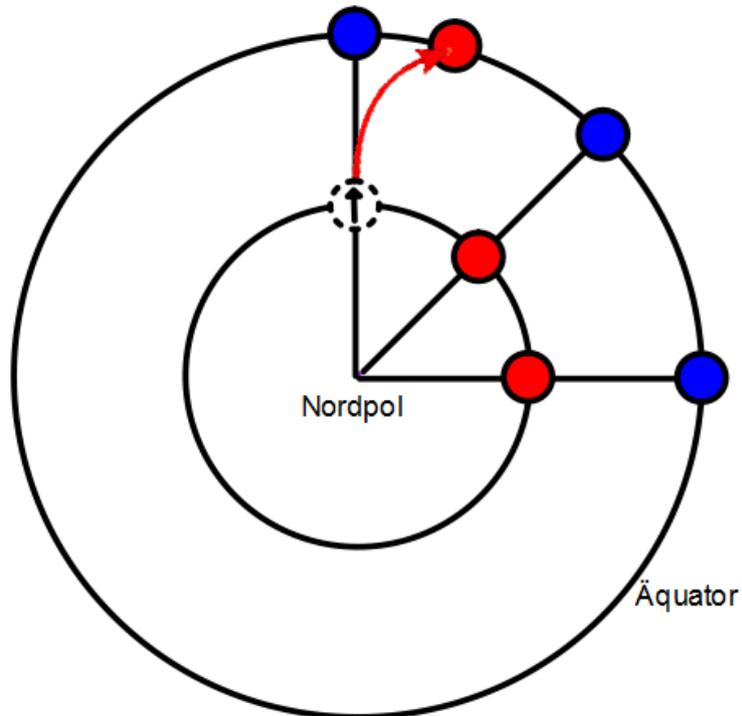


Abb. 40: Joggeransatz, äquatorwärts
(Screenshot der Darstellung auf einem interaktiven Whiteboard)

Bei dieser Unterrichtsmöglichkeit ist es unerlässlich, zusätzlich zur reinen Erklärung, eine Tafelskizze anzufertigen. Um nicht ständig die alten Positionen der Luftteilchen auswischen zu müssen, bietet sich im optimalen Fall der Einsatz eines interaktiven Whiteboards, anderenfalls der Einsatz zweier Magneten, die die Sportler symbolisieren, an.

Trotz der Projektion der dreidimensionalen Erdkugel auf die Tafelebene, kann dieser Erklärungsversuch durchaus als fachlich korrekt bezeichnet werden. Die Überlagerung der Rotationsbewegung unseres Planeten und der meridionalen Bewegung eines Luftpakets wird deutlich. Hier liegt aber auch der große Nachteil dieser Erklärung, da die Ablenkung zonalen Bewegungen nicht einleuchtend dargestellt werden kann. Ein weiterer Nachteil ist die Tatsache, dass die Betrachtung schrittweise erfolgt und sich Zwischenschritte, wie sie in Abb. 39 und 40 mit einem roten Pfeil dargestellt werden, nur sehr schwer darstellen lassen.

Aus eigener Unterrichtserfahrung lässt sich berichten, dass dieser Erklärungsversuch durch Schüler der Mittelstufe nachvollziehbar ist. Sie haben allerdings Schwierigkeiten, sich in die Rolle eines Beobachters zu versetzen, der dem jeweiligen Luftpaket hinterherschaut und damit die Ablenkung auf der Nordhalbkugel nach rechts zu erkennen. Das heißt, die dreidimensionale Komponente ist nicht optimal umsetzbar. Dies ließe sich beispielsweise durch einen weiteren Magneten umgehen, der an der Ausgangsposition des sich meridional bewegenden Luftpakets bleibt und auf dem die Blickrichtung des Beobachters mit einem Pfeil oder einem aufgeklebten Männchen verdeutlicht ist (vgl. gestrichelter Kreis in Abb. 39 und 40).

5.2.2. Erklärung mit Hilfe des Querschnitts einer Kugel

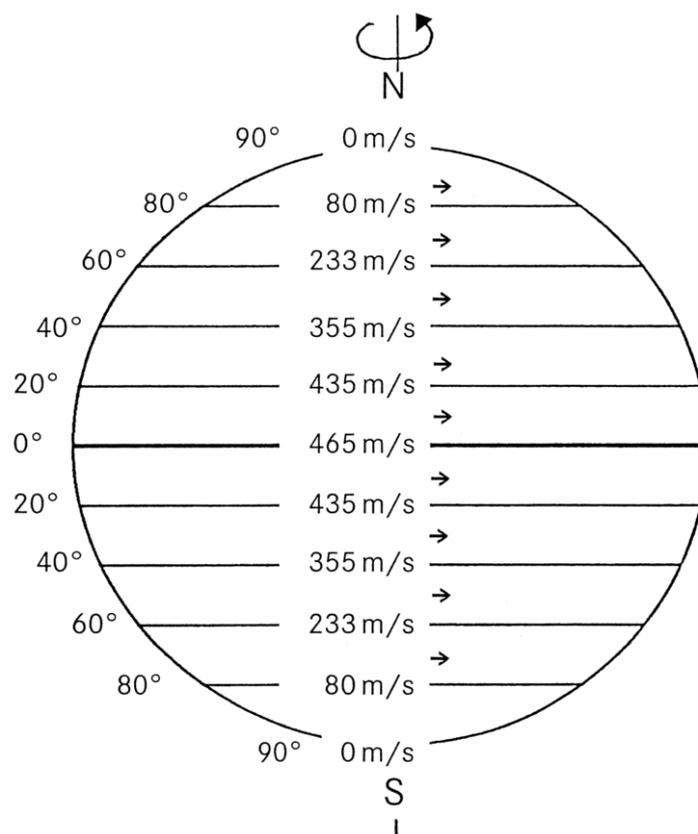


Abb. 41: Bahngeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der geographischen Breite (Obermann, 1999, S. 21)

Betrachtet man die Erklärungen zur Corioliskraft in verschiedenen Schulbüchern, so fällt auf, dass in vielen aktuellen Werken des Klett-Verlags¹¹⁶ auf eine Darstellung

¹¹⁶ vgl. z.B. Obermann (2007), S. 117; Falk, Scholliers (2010), S. 80, Falk u.a. (2002), S. 54.

zurückgegriffen wird, die auch schon Obermann in seinem häufig zitierten Heft der Praxis Geographie zum Thema Wetter¹¹⁷ eingesetzt hat. Hier werden zunächst die unterschiedlichen Bahngeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der geographischen Breite dargestellt (vgl. Abb. 41). In einem zweiten Schritt erklärt Obermann:

„Wenn allerdings ein Luftteilchen durch Druckunterschiede vom Äquator in Richtung Norden in Bewegung gesetzt wird, behält es seine am Äquator erhaltene Beschleunigung¹¹⁸ bei und ist bei 40° nördlicher Breite schon um 110 m/sec schneller als ein Luftteilchen, das bei 40° wegen der geringeren Umlaufstrecke nur 355 m/sec schnell ist. Es eilt den nördlicheren Luftmassen voraus und biegt nach rechts von der ursprünglichen Richtung ab. Ebenfalls nach rechts wird ein Luftteilchen abgelenkt, das von 60° nördlicher Breite nach 20° nördlicher Breite unterwegs ist. Wegen seiner Geschwindigkeit von 233 m/sec hinkt es den 435 m/sec schnell kreisenden Luftteilchen um 202 m/sec hinterher.“

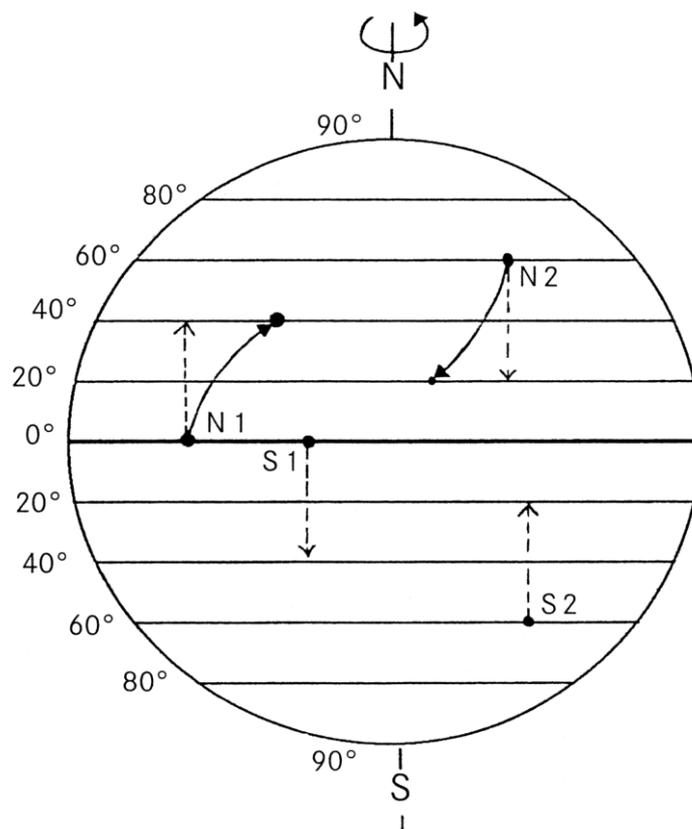


Abb. 42: Ablenkung durch die Corioliskraft (Obermann, 1999, S. 21)

¹¹⁷ Obermann (1999), S. 21.

¹¹⁸ Um physikalisch korrekt zu bleiben, darf hier eigentlich nicht der Begriff „Beschleunigung“ verwendet werden, es muss vielmehr von Bahngeschwindigkeiten gesprochen werden.

Dies verdeutlicht er ebenfalls an einer Skizze (vgl. Abb. 42), auf der dann von den Schülern die Transferleistung einer Übertragung auf die Südhalbkugel erbracht werden soll.

Auch diese deskriptive Erklärung kann insgesamt als fachlich korrekt bezeichnet werden. Probleme ergeben sich aber durch die Beschränkung der Betrachtung auf den Ausgangs- und den Endpunkt einer Bewegung und das damit verbundene schrittweise Vorgehen. Für den Schüler ist somit zwar die Rechtsablenkung auf der Nordhalbkugel problemlos nachvollziehbar, die bogenförmige Bahn wird aber nicht thematisiert.

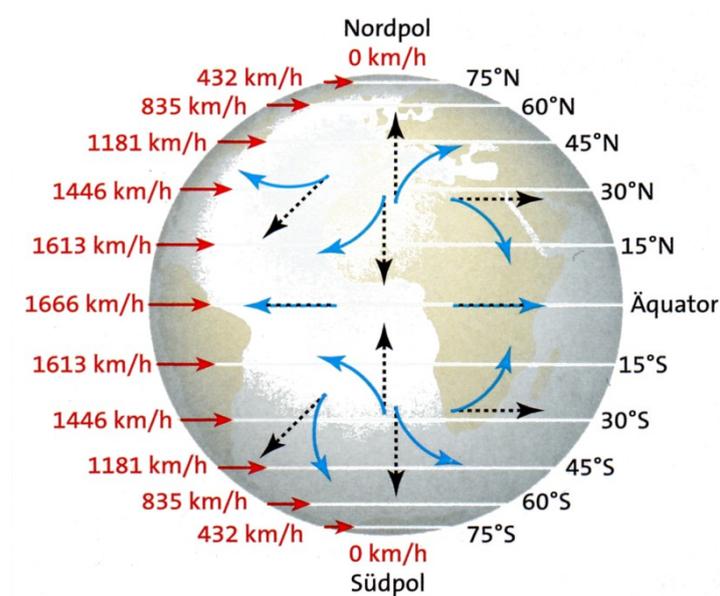


Abb. 43: Darstellung der Ablenkung durch die Corioliskraft (Falk, Scholliers, 2010, S. 80)

Im neu erschienenen Band „TERRA physische Geographie“ findet sich eine leicht veränderte Abbildung¹¹⁹, die einerseits die beiden bisherigen Skizzen zusammenfasst, andererseits auch Bewegungen beinhaltet, die nicht meridional gerichtet sind (vgl. Abb. 43). Eine Erklärung der Ablenkung dieser Luftmassenbewegungen erfolgt im Schulbuch allerdings nicht.

5.2.3. Die Corioliskraft im Vektorraum

Streng genommen handelt es sich bei der Betrachtung der Corioliskraft im Vektorraum und der damit verbundenen Zerlegung in Vektorpfeile nicht um eine eigenstän-

¹¹⁹ Falk, Scholliers, 2010, S. 80.

dige Erklärung, sondern vielmehr um die Erweiterung der im Kapitel 5.2.2. vorgestellten „Erklärung mit Hilfe des Querschnitts einer Kugel“. Dort blieb die Frage offen, wieso es sich bei der Ablenkung nicht um eine geradlinige, sondern eine bogenförmige Bewegung handelt.

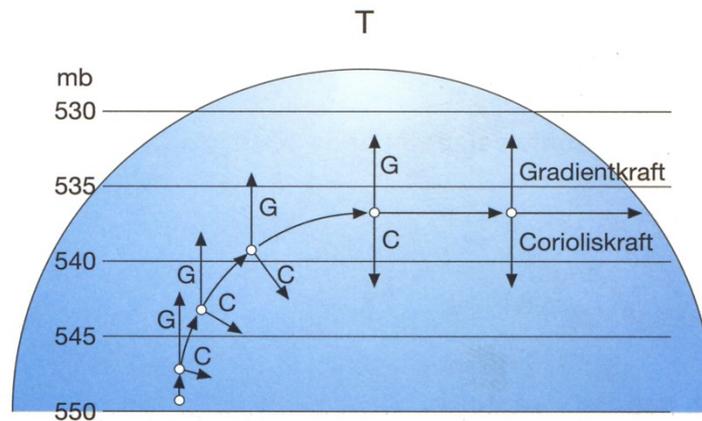


Abb. 44: Darstellung der Wirkung der Corioliskraft mit Hilfe von Vektorpfeilen (Latz, 2011, S. 35)

Um dies zu zeigen, wurde in mehreren Oberstufenbüchern¹²⁰ eine Abbildung (vgl. z.B. Abb. 44) abgedruckt, die die von Weischet folgendermaßen formulierte Erklärung visualisiert:

„Nachdem ein Luftquantum durch die Kraft des Luftdruckgradienten in Bewegung gesetzt worden ist, wird es der ablenkenden Kraft der Erdrotation [...] unterworfen. Diese wirkt senkrecht zur Bewegungsrichtung und lenkt das Luftquantum sukzessive nach rechts aus der ursprünglichen Richtung des Luftdruckgradienten ab. Das geht so weit, bis die Luft senkrecht zum Druckgradienten, also parallel zu den Isobaren strömt. Eine weitere Ablenkung ist nicht möglich [..., da bei einer] Bewegung gegen den Luftdruckgradienten die Geschwindigkeit und damit [...] auch die Corioliskraft geringer wird, sie also die Geschwindigkeit als Vorbedingung ihrer Existenz selbst beseitigen würde.“¹²¹

Bei der genaueren Betrachtung mehrerer Abbildungen dieser Art fällt aber auf, dass sich in jeder Ungenauigkeiten oder auch Fehler finden. So gibt es beispielsweise in Abb. 44 keine klare Trennung zwischen den Vektoren und der Bahnkurve. Gerade für den ungeübten Schüler ist es hier verwirrend, dass die Corioliskraft und die Gradientkraft einzeln dargestellt sind, die resultierende Kraft aber nicht eingezeichnet ist. Eine Verwechslung mit der ebenfalls als Pfeil dargestellten Bahnkurve ist also leicht möglich.

¹²⁰ vgl. z.B. Latz (2011), S. 35 oder Bauer u.a. (2001), S. 98.

¹²¹ Weischet (1977), S. 124.

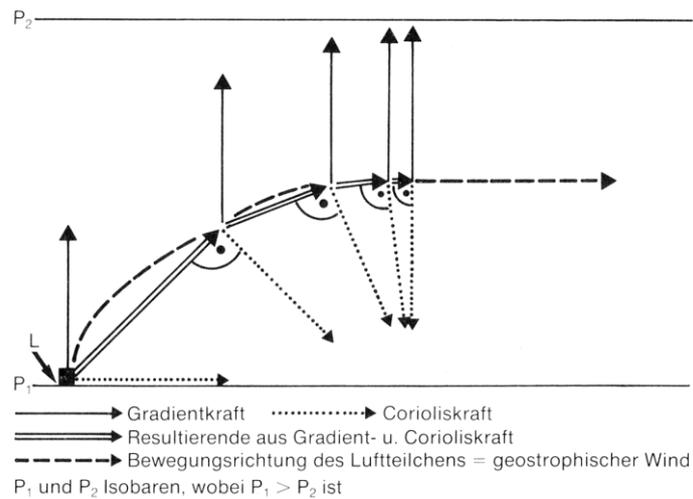


Abb. 45: Darstellung der Wirkung der Corioliskraft mit Hilfe von Vektorpfeilen (Häckel, 1990, S. 203)

In Häckels Darstellung (vgl. Abb. 45) werden dagegen die Vektoren der Kräfte korrekt addiert und das Ergebnis auch deutlich dargestellt. Für die resultierende Bahn setzt er eine sich klar abhebende Signatur ein, so dass der Prozess gut nachvollziehbar scheint. Dennoch enthält die Abbildung einen Fehler: Die eingezeichnete resultierende Kraft müsste zu einer Beschleunigung und somit zu einer Zunahme der Geschwindigkeit des Luftteilchens von Schritt zu Schritt führen. Als Folge davon würde auch die Corioliskraft schrittweise größer werden. Dies ist aber im Gegensatz zu Abb. 44 in der Darstellung Häckels (Abb. 45) nicht erkennbar.

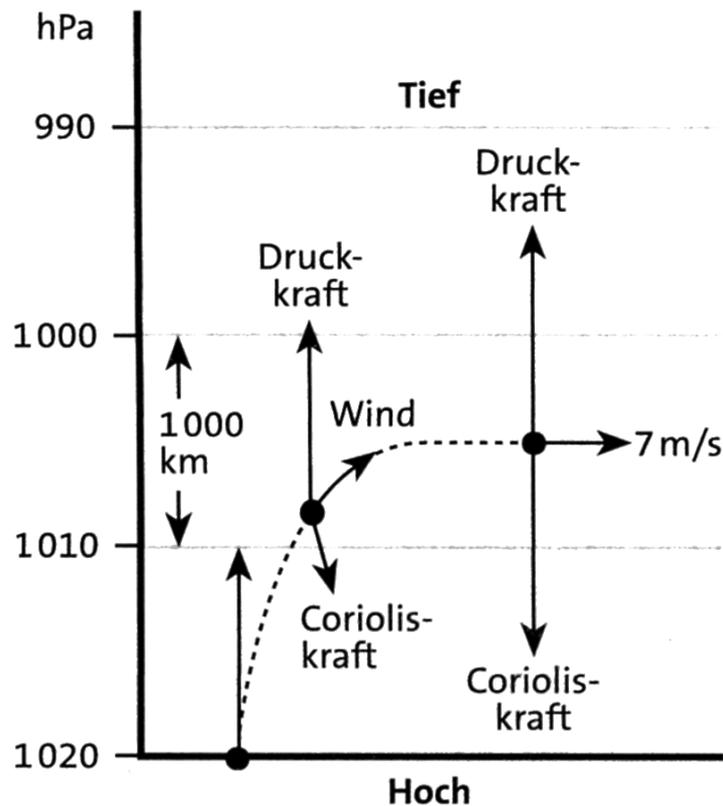


Abb. 46: Darstellung der Wirkung der Corioliskraft mit Hilfe von Vektorpfeilen (Falk, Scholliers, 2010, S. 80)

Ebenso fehlerbehaftet ist die Abbildung im aktuellen „Terra – physische Geographie“¹²² (vgl. Abb. 46). Hier steht der Vektor der Corioliskraft nicht immer senkrecht auf dem der Geschwindigkeit. Als weitere Ungenauigkeit ist auch hier, wie in Abb. 44, der Geschwindigkeitsvektor gebogen eingezeichnet. Zudem nimmt der Betrag des Geschwindigkeitsvektors im Laufe des Prozesses nicht kontinuierlich zu, sondern scheint gleich zu bleiben.

Allen Abbildungen gemeinsam ist, dass immer nur die polwärts gerichtete Bewegung des Luftteilchens dargestellt wird, wenngleich auch die Gegenrichtung mit dieser Darstellung problemlos visualisiert werden könnte.

5.2.4. Argumentation über die vereinfachte Formel

Sowohl bei Fortbildungen als auch bei Fachgesprächen mit Kollegen wurden immer wieder die Defizite der bisher genannten Unterrichtsumsetzungen thematisiert und daraufhin auch die Einführung der Corioliskraft auf rein deduktivem Weg anhand der

¹²² vgl. Falk, Scholliers (2010), S. 80.

vereinfachten Formel $F_C = 2 m \omega v \sin \varphi$ besprochen. Dabei wird die Formel nicht, wie im naturwissenschaftlichen Unterricht üblich, mit den Schülern gemeinsam hergeleitet oder zumindest anhand von Versuchen oder Modellen plausibel gemacht, sondern ihnen lediglich genannt. Im Anschluss lassen sich auf einfache Art und Weise die einfließenden Faktoren besprechen. Betrachtet man beispielsweise die Abhängigkeit der Corioliskraft von der geographischen Breite, so bespricht man nicht die nichtlineare Veränderung der Bahngeschwindigkeiten, sondern analysiert lediglich die Veränderung in der Gleichung, also die Veränderung des Wertes von $\sin \varphi$. Dieser ist bei 0° , also am Äquator, gleich 0, bei 90° , also an den Polen, beträgt er 1. Da die naturwissenschaftlichen Zusammenhänge damit nicht wirklich dargestellt werden und der Prozess in einer Art black-box bleibt, ist diese Erklärung für die Schüler in der Regel sehr unbefriedigend und dient keinesfalls der Wissenschaftspropädeutik.

5.3. Einsatz von audiovisuellen und interaktiven Medien

Nach Köck kommt der Film neben dem Original und dem konkreten Modell „der ‚originalen Begegnung‘ wohl am nächsten. Er zeigt die Objekte mit ihren originalen Bewegungen [...] und kann somit ein weitgehend naturgetreues Abbild der Wirklichkeit geben.“¹²³ Dies trifft natürlich in verstärktem Maße auch für interaktive Programme und Internetseiten zu, da hier die Schüler zusätzlich in das Geschehen eingreifen und einzelne Parameter verändern können. So ist es nicht weiter verwunderlich, dass immerhin 36% der befragten Lehrer diese Medien in ihrem Unterricht einsetzen.

Dabei sind die Erklärungsansätze den bisher in diesem Kapitel vorgestellten Möglichkeiten sehr ähnlich, so dass auch hier die dreidimensionale Erde meist auf eine zweidimensionale Darstellung reduziert wird.

Als Vorteile lassen sich bei audiovisuellen und interaktiven Medien prinzipiell der meist geringe Vorbereitungsaufwand und die in der Regel hohe fachliche Verlässlichkeit nennen. Dem gegenüber stehen der, zumindest bei Filmen, festgeschriebene Ablauf und die Tatsache, dass es sich nicht um Primär-, sondern um Sekundärerfahrungen handelt.

¹²³ Köck, Birkenhauer (1986), S. 257.

5.3.1. Arbeitsblatt Geogebra

Coriolis-Bewegung

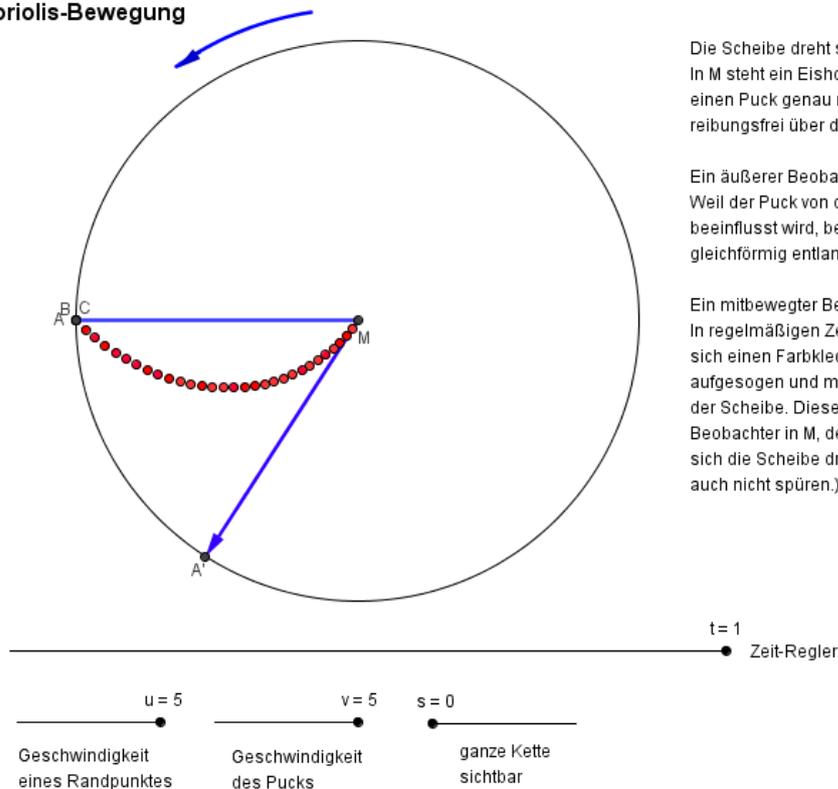


Abb. 47: Darstellung der Beeinflussung einer äquatorwärts gerichteten Bewegung durch die Corioliskraft mit Hilfe der interaktiven Geometriesoftware GeoGebra (Screenshot)¹²⁴

Eine Möglichkeit, die Auswirkungen der Corioliskraft interaktiv darzustellen, bietet die vielseitige Geometriesoftware GeoGebra¹²⁵, die für nicht-kommerzielle Zwecke kostenlos nutzbar ist. Von verschiedenen Autoren wurden dafür „dynamische Arbeitsblätter“ erstellt, bei denen sich die Ablenkung durch die Corioliskraft in Abhängigkeit von verschiedenen Einflussgrößen simulieren lässt. Diese sind aber nicht immer auf die geographische Situation bezogen, sondern haben teilweise ihren Schwerpunkt im Physikunterricht. In Abb. 47 bewegt sich beispielsweise der Puck eines Eishockeyspielers reibungsfrei von der Mitte der Scheibe nach außen. Dabei lassen sich die Rotationsgeschwindigkeit der Scheibe (= Geschwindigkeit eines Randpunktes) und

¹²⁴ Das hier dargestellte dynamische Arbeitsblatt wurde unter dem Pseudonym „GvomStein“ auf der Internetseite www.geogebra.org veröffentlicht. (http://www.geogebra.org/de/upload/files/dynamische_arbeitsblaetter/GvomStein/Physik/Mechanik/Coriolis_zumRand.html)

¹²⁵ www.geogebra.org

die Geschwindigkeit des Pucks variieren und über den Zeit-Regler in Abhängigkeit von t darstellen. Die Bewegung wird nun aus Sicht eines äußeren Beobachters (Inertialsystem, blau) und eines mitbewegten Beobachters dargestellt (rotierendes System, rot). Mit Hilfe eines anderen dynamischen Arbeitsblatts lässt sich auch die polwärts gerichtete Bewegung simulieren (vgl. Abb. 48).

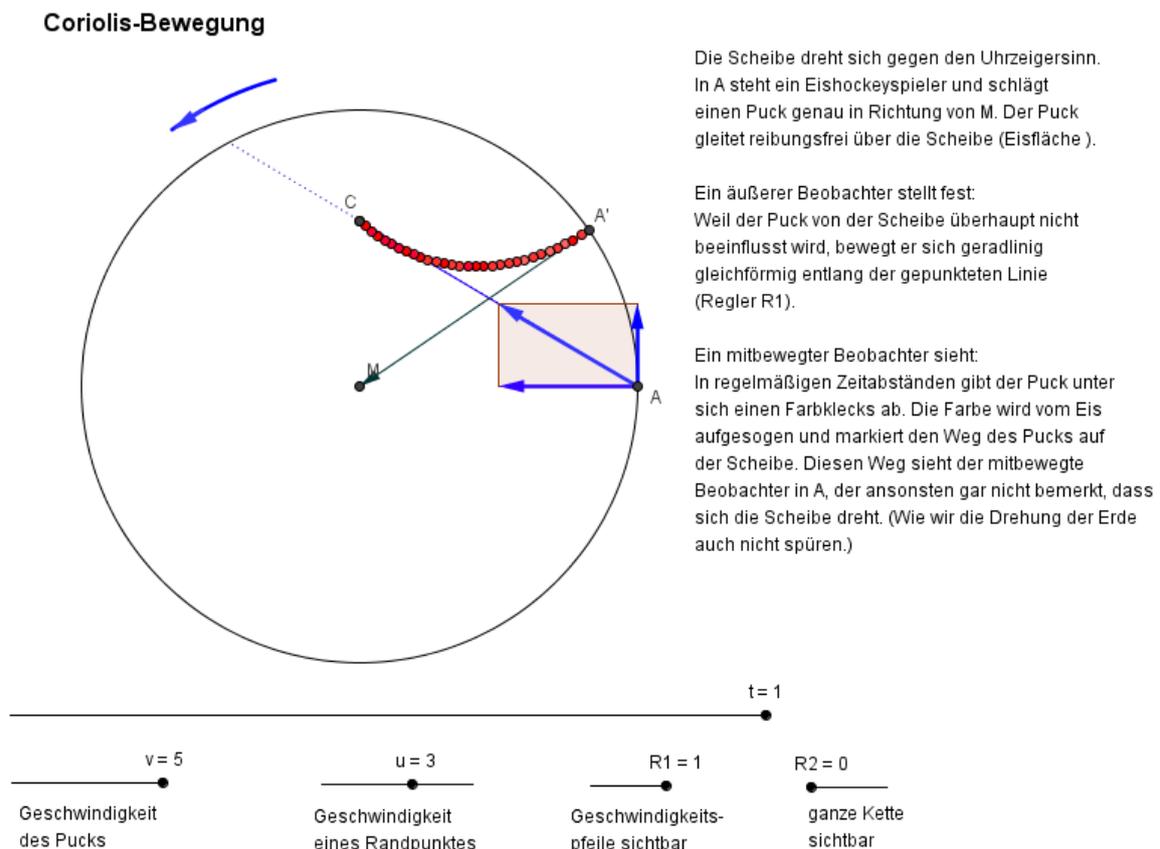


Abb. 48: Darstellung der Beeinflussung einer polwärts gerichteten Bewegung durch die Corioliskraft mit Hilfe der interaktiven Geometriesoftware GeoGebra (Screenshot)¹²⁶

Der Einsatz dieser Software bietet sich in geradezu idealer Weise als Ergänzung zu den im Kapitel 5.1.6. beschriebenen Modellen und Modell-Experimenten auf rotierenden Scheiben an. Hier können mit relativ geringem Aufwand die beobachteten Prozesse noch einmal langsam Schritt für Schritt nachvollzogen werden. Dies kann einerseits in kleinen Teams, andererseits im Frontalunterricht mit einer Präsentation über den Beamer erfolgen. Als beschränkendes Element muss genannt werden,

¹²⁶ http://www.geogebra.org/de/upload/files/dynamische_arbeitsblaetter/GvomStein/Physik/Mechanik/Coriolis_zumZentrum.html

dass mit den hier vorgestellten Arbeitsblättern lediglich meridionale Bewegungen analysiert werden können.

5.3.2. Interaktive Software „Corioliskraft“

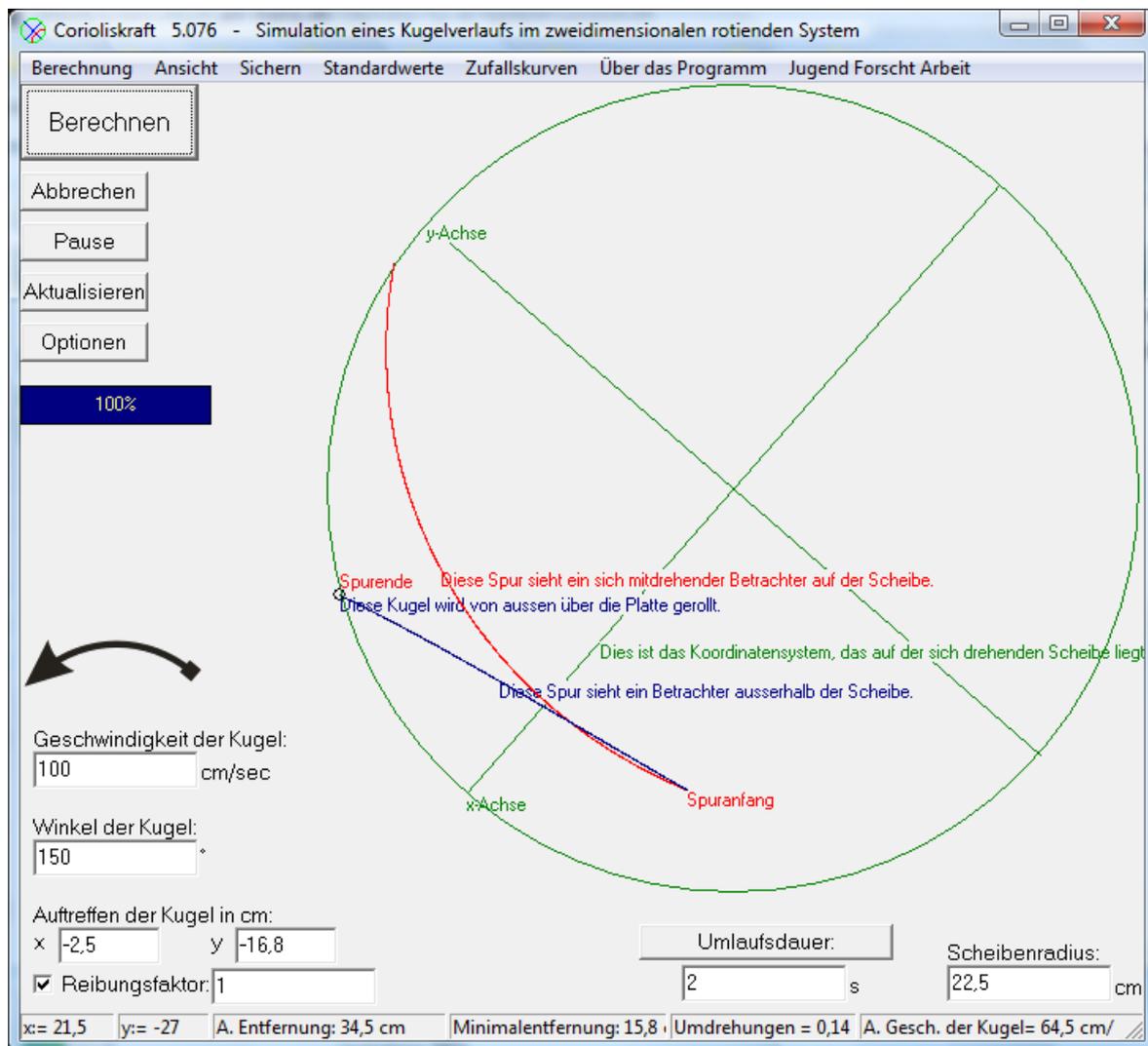


Abb. 49: Interaktive Software "Corioliskraft" (Roth, 2005, Screenshot)

Ein sehr flexibles Simulationsprogramm stellt die Freeware „Corioliskraft“ von A. Roth¹²⁷ dar. Dabei lassen sich außer der Masse alle in die Corioliskraft eingehenden Faktoren variieren. Wie auch bei den dynamischen Arbeitsblättern (vgl. Kap. 5.3.1.) wird die Bewegung sowohl im Inertialsystem (blau) als auch im rotierenden System (rot) dargestellt. Zusätzlich lassen sich hier auch nicht meridionale Bewegungen si-

¹²⁷ Roth, Alexander (2005).

mulieren (vgl. Abb. 49), so dass vom Schüler alle denkbaren Windrichtungen ausprobiert und durchgespielt werden können.

Auch dieses Programm bietet sich als Ergänzung und zum schrittweisen Nachvollziehen der Bewegungen in den oben genannten Modellen und Modell-Experimenten auf rotierenden Scheiben (vgl. Kap. 5.1.6.) an. Durch die große Flexibilität und die Möglichkeit eine Vielzahl von Bewegungen durchzuspielen ist es aber auch denkbar, die Corioliskraft ausschließlich anhand dieser Software darzustellen.

Dabei ist zu beachten, dass das Programm, wie jede interaktive Software, ausschließlich eine Sekundärbeobachtung erlaubt. Zusätzlich ist die Bedienung durch die vielen Einstellungsmöglichkeiten (z. B. Berücksichtigung der Reibung) sehr komplex, in einigen Bereichen etwas unübersichtlich und nicht immer ganz intuitiv.

5.3.3. Webgeo-Module

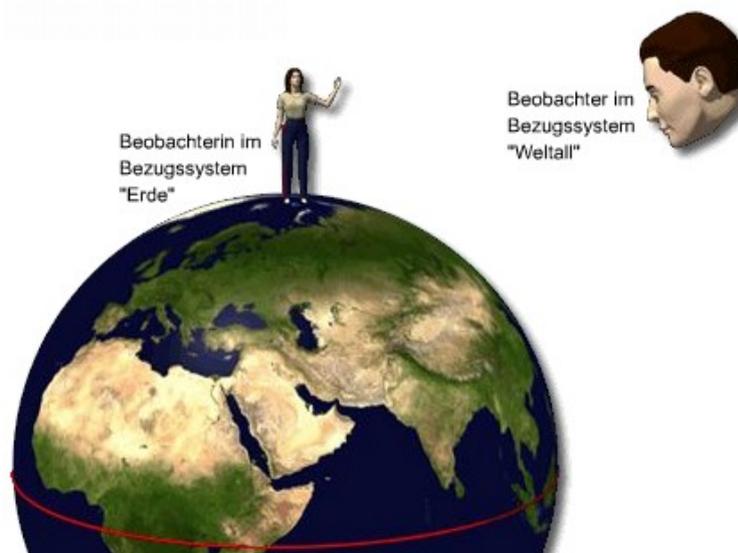


Abb. 50: Webgeo-Modul „Bezugssysteme“ (Schnirch, o. J., Screenshot)

Auch wenn sich die interaktiven Lernmodule des WebGeo-Projekts primär an Studierende richten, so lassen sie sich doch teilweise auch im Oberstufenunterricht in der Schule einsetzen. Dabei sind zwei aufeinander aufbauende Module für das Thema Corioliskraft relevant. Das erste behandelt dabei lediglich die unterschiedlichen Bezugssysteme (vgl. Abb. 50), die in animierten Grafiken dargestellt werden und deren Verständnis mit Kontrollfragen geprüft wird.

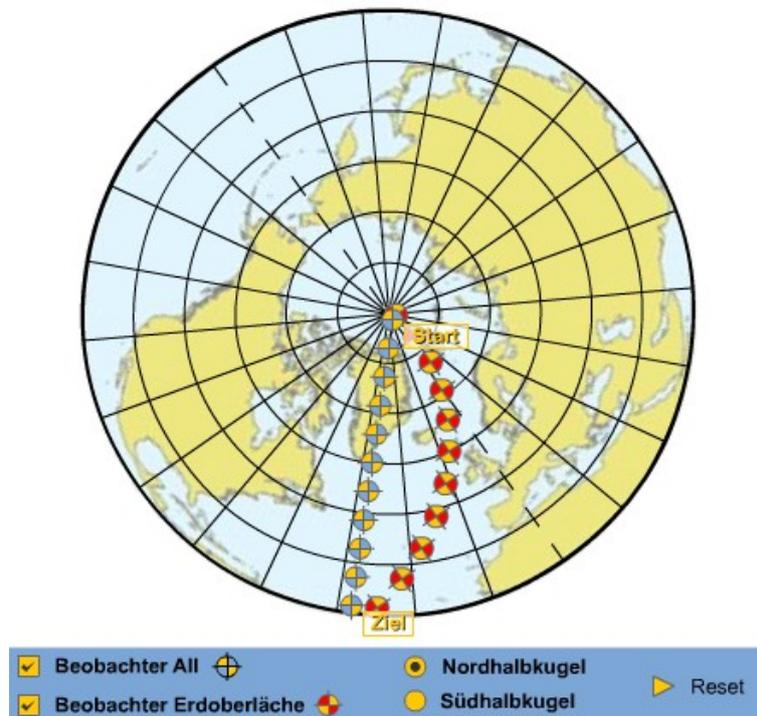


Abb. 51: Raketenflug-Experiment (Schnirch, 2004, Screenshot)

Im zentralen Abschnitt des zweiten Moduls werden der Flug einer Rakete und die Auswirkung der Corioliskraft auf diese Bewegung interaktiv simuliert. Dabei kann der Lernende Start und Ziel frei auf einer Halbkugel auswählen (vgl. Abb. 51). Auch hier folgt dann eine vergleichende Darstellung der durch die Corioliskraft beeinflussten Bewegungen im Inertialsystem (blau) und im rotierenden System (rot). Im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Umsetzungen verfolgt der Autor des Webgeo-Moduls bei der Darstellung aber einen etwas anderen Weg: Hier werden nicht Startpunkt und Richtung, sondern Start- und Zielpunkt angegeben, so dass sich ein ungewohntes Bild der Bahnkurven ergibt. Dieses ist zwar korrekt, die Rechtsablenkung auf der Nordhalbkugel ist aber nicht so offensichtlich zu erkennen wie bei den anderen interaktiven Medien. Zudem wird mit dem Setzen des Endpunktes und der damit verbundenen Berechnung der Flugbahn die Darstellung der Erde weiterrotiert. Dies erschließt sich jedoch nur auf den zweiten Blick, da es einerseits ruckartig erfolgt, andererseits aber als Orientierungshilfen nur die Umrise der Kontinente verfügbar sind, die aus der gewählten Perspektive von den Schülern nur schwer erkannt werden können.

Aus diesem Grund bietet sich, trotz der sehr einfachen Bedienbarkeit und der flexiblen Wahl der Flugstrecke, der Einsatz dieses Webgeo-Moduls im Schulunterricht nur bedingt an.

5.3.4. Lernvideos

Im Rahmen der Umfrage gaben insgesamt 23% der beteiligten Lehrer an, einen Film oder eine Filmsequenz zur Erklärung der Corioliskraft einzusetzen. Dabei wurden sowohl spezielle Filme, wie beispielsweise „Die Kraft, die keine ist – Gaspard de Coriolis und die Ablenkung der Massen“¹²⁸ als auch allgemeine Klimafilme genannt, die sich z. B. mit dem Monsun oder der allgemeinen Zirkulation beschäftigen.

5.3.4.1. „Die Kraft, die keine ist“

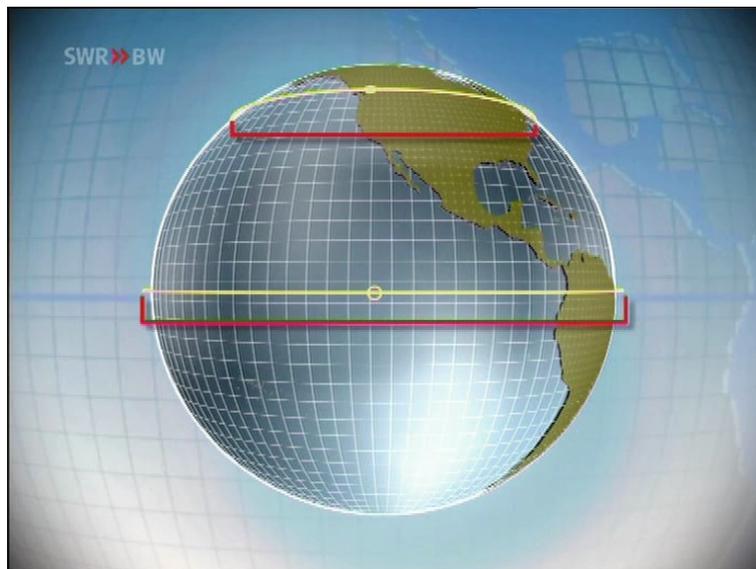


Abb. 52: Video "Die Kraft, die keine ist" – Bahngeschwindigkeiten (Knoll, Schumann, 2003, Screenshot)

Der Film „Die Kraft, die keine ist – Gaspard de Coriolis und die Ablenkung der Massen“ aus der Reihe „Meilensteine der Naturwissenschaft und Technik“ des Schulfernsehens des Südwestfunks¹²⁹, stellt ausgehend vom Orkan Lothar, der im Dezember 1999 vor allem in Nordfrankreich, der Schweiz, Süddeutschland und Österreich große Schäden angerichtet hat, die Lebensgeschichte von Gaspard de Coriolis dar. Daneben kommt auch eine Vielzahl von Nebeninformationen, wie beispielsweise die

¹²⁸ Knoll, Schumann (2003).

¹²⁹ ebd.

historische Entwicklung der Meteorologie zur Sprache. In zwei relativ kurzen Sequenzen wird aber auch versucht, die Corioliskraft zu erklären. Dazu greift der Film auf die unterschiedlichen Bahngeschwindigkeiten auf der Erde zurück, die in einer Animation dargestellt werden (vgl. Abb. 52). Zur eigentlichen Erklärung wird dann die Erde von oben betrachtet, so dass sich eine Darstellung wie bei den „Modellen und Modell-Experimenten auf rotierenden Scheiben“ ergibt (vgl. Kap. 5.1.6. und Abb. 53). Dabei wird aber lediglich die meridionale Bewegung vom Pol zum Äquator aufgegriffen. Die Gegenrichtung sowie die zonalen Bewegungen fehlen in dieser Betrachtung vollständig.

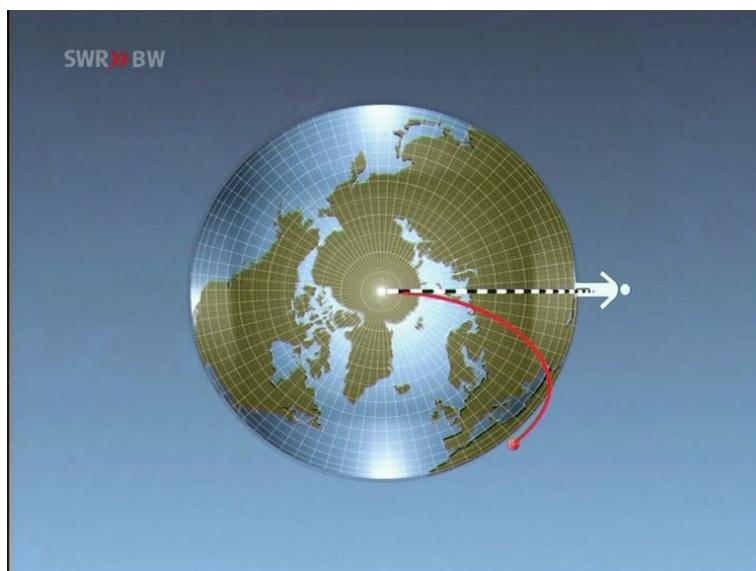


Abb. 53: Video "Die Kraft, die keine ist" – Ablenkung (Knoll, Schumann, 2003, Screenshot)

Ergänzend wird mehrmals ein Video eingeblendet, das ein Kind zeigt, das mit einem Ball auf einem Karussell spielt. Dabei wechselt die Kameraposition zwischen dem Inertialsystem und dem rotierenden System. Dieses Video dient aber nur zur Veranschaulichung und wird nicht zur Erklärung der Corioliskraft herangezogen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass im Rahmen dieses Videos, das durch seine reißerische Musikuntermalung vom Kontext ablenkt, die Corioliskraft nur lückenhaft dargestellt wird. Die Erklärung erfolgt so schnell und nur mit wenigen verbalen didaktischen Hilfen, dass die Mehrzahl der Schüler beim einmaligen Betrachten des Films ihr nicht folgen kann.

5.3.4.2. University of Illinois: Corioliskraft und Kinderkarussell



Abb. 54: Video zur Corioliskraft (Department of Atmospheric Sciences at the University of Illinois at Urbana-Champaign, Screenshots)

Im Internet findet sich im Zusammenhang mit der Corioliskraft eine Vielzahl von Filmen, die z. B. ballspielende Kinder auf einem Karussell (vgl. Kap. 5.3.4.1.) zeigen. Im Video des „weather world 2010 projects“¹³⁰ der Universität von Illinois versuchen sich beispielsweise Kinder gegenseitig einen Ball zuzurollen (vgl. Abb. 54.1). Dabei wird der Ball aber abgelenkt und erreicht nicht das anvisierte Ziel. In einer zweiten Sequenz ist dieser Effekt sogar so stark, dass ein Kind sich den Ball selbst wieder zu spielen kann (vgl. Abb. 54.2). Bei vielen dieser Videos wird die Kameraposition vom Inertialsystem (vgl. Abb. 54.3) ins rotierende System (vgl. Abb. 54.4) gewechselt. Dabei liefert die Mehrzahl dieser Filme aber keine Erklärung, sondern veranschaulicht lediglich die Corioliskraft, dies aber in motivierender Weise. Im eigenen Unterricht konnte ich in diesem Zusammenhang feststellen, dass selbst Oberstufenschüler von den Videos derart beeindruckt waren, dass sie den dargestellten Versuch selbst durchführen wollten. Leider scheiterte dies bisher immer daran, dass kein passendes Karussell ohne störende Haltestangen im Umkreis der Schule zur Verfügung stand.

¹³⁰ Department of Atmospheric Sciences (DAS) at the University of Illinois at Urbana-Champaign.



Abb. 55: Coriolis-Karussell (Swiss Science Center Technorama, www.technorama.ch)

Hautnah erleben und ausprobieren lässt sich dieser Versuch beispielsweise im Coriolis-Karussell des Technorama in Winterthur. Hier rotiert das gesamte System mit bis zu 15 Umdrehungen pro Minute und die Teilnehmer können sich Bälle zurollen oder zuwerfen und dabei die Corioliskraft im rotierenden System erleben. Um das Karussell herum befindet sich eine Art Tribüne, von der aus die Zuschauer den Versuch aus dem Inertialsystem beobachten können.

5.3.4.3. *alpha-Centauri: Was ist die Corioliskraft?*

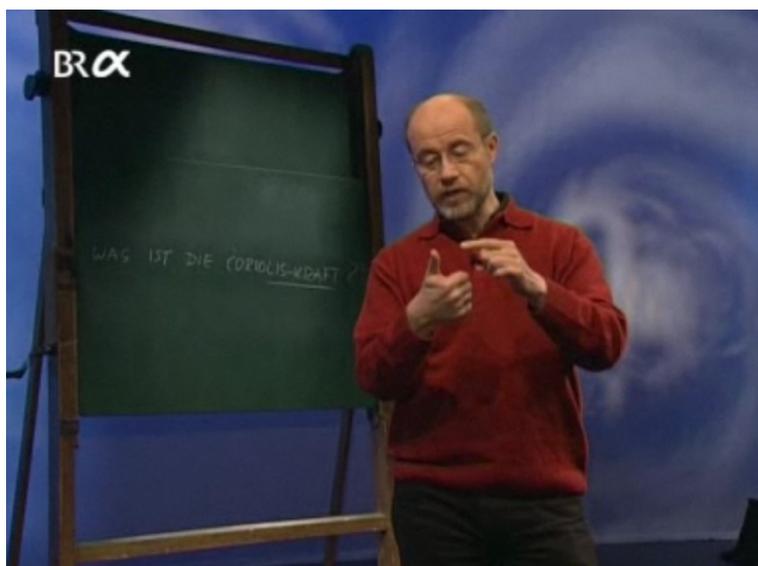


Abb. 56: alpha-Centauri „Was ist die Corioliskraft?“ (Lesch, 2005, entnommen aus Video)

Im Rahmen der Sendereihe alpha-Centauri des Bildungskanals des Bayerischen Rundfunks beschäftigt sich auch Prof. Harald Lesch (vgl. Abb. 56) mit der Frage: Was ist die Corioliskraft?¹³¹ Dabei geht er in seinem Lehrervortrag zunächst ausführlich auf Trägheits- und Scheinkräfte ein, spannt dann den Bogen über Aristoteles und Galilei zur Corioliskraft und behandelt anschließend die Rotation verschiedener Druckgebiete auf der Erde. Gegen Ende seines Vortrags macht Lesch noch einen Exkurs zum Erdmagnetfeld und beschreibt die Auswirkungen der Corioliskraft auf die Konvektionsströme im Erdinneren.

Die Entstehung der Corioliskraft wird im Verlauf des 15-minütigen Films aber nicht ausführlich erklärt, sondern es werden lediglich die Einflussfaktoren rein verbal aufgeführt. Eine Visualisierung findet nicht statt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Lesch viele interessante Themen im Umfeld der Corioliskraft anspricht, ihre Entstehung aber nicht ausreichend erklärt, so dass ein Einsatz dieses Films im Unterricht nur als Ergänzung dienen kann.

5.4. Zusammenfassung und Bewertung

Vergleicht man nun die vorgestellten Umsetzungsmöglichkeiten, so fällt auf, dass sich viele davon durchaus ähnlich sind. Unterscheiden lassen sie sich, neben den in der Einführung zu Kapitel 5 beschriebenen Kategorien, vor allen Dingen durch Kriterien, wie z. B. zeitlicher und materieller Aufwand, fachliche Richtigkeit etc., die am Ende des Kapitels in Tabelle 2 und 3 bewertet gegenübergestellt sind.

So wird auf den ersten Blick deutlich, dass lediglich drei Ansätze auf der Betrachtung eines dreidimensionalen Körpers beruhen, wobei dies auf den rotierenden Kegelstumpf nur eingeschränkt zutrifft. Bei allen anderen Modellen ist bislang der Übergang von der Dreidimensionalität in die Zweidimensionalität ein mehr oder weniger ungelöstes Problem, das beim Verständnis des Phänomens bisher immer unterschätzt wurde.

Auch der für die Durchführung notwendige zeitliche und materielle Aufwand korreliert in hohem Maße mit dem Umfang der Vereinfachung durch die didaktische Reduktion: So gehen beispielsweise beide Modelle, bei denen der zeitliche Aufwand mit „sehr gering“ einzustufen ist, von der falschen Annahme aus, dass die Rotationsgeschwin-

¹³¹ Lesch (2005).

digkeit eines Luftteilchens am Startpunkt immer den Wert Null hat. Somit können diese Darstellungen nur für äquatorwärts gerichtete Bewegungen als korrekt angesehen werden. Möchte man hingegen sowohl meridionale als auch zonale Bewegungen betrachten, so ist dies nur mit dem Modell von Muckenfuß (vgl. Kap. 5.1.6.) machbar. Alternativ kann man nur noch auf den Einsatz von interaktiver Software oder von Filmen zurückgreifen, die aber lediglich eine Sekundärbeobachtung ermöglichen.

Die Gesamtbewertung ergibt sich dann letztendlich aus der Erfüllung der genannten Kriterien und der fachlichen Korrektheit. Ist eine fehlerfreie Erklärung mit der betrachteten Methode nicht möglich, so kann auch die Gesamtbewertung nicht positiv ausfallen.

In qualitativer Bewertung konnten letztendlich nur wenige verschiedene Ansätze positiv bewertet werden:

1. Der stumme Globus mit dem Wassertropfen vereinigt bei noch vertretbarem Aufwand die Vorteile der dreidimensionalen Darstellung mit der einzigartigen Möglichkeit, auch den Äquatorübertritt darzustellen.
2. Die Modelle und Modell-Experimente auf rotierenden Scheiben bieten jeweils mehrere Vorteile: Die Umsetzung von Muckenfuß ermöglicht es, bei noch vertretbarem Aufwand, alle Bewegungsrichtungen eines Luftteilchens darzustellen. Diehl dagegen benötigt einen extrem hohen Aufwand, um eine gute Reproduzierbarkeit zu erreichen und den Experimentcharakter zu erhalten. Dabei beschränkt er sich auf die Betrachtung äquatorwärts gerichteter Bewegungen. Optimal wäre demnach eine Verbindung beider Umsetzungen.
3. Die Software „Corioliskraft“ schneidet in vielen Bereichen positiv ab. Sie beschränkt sich allerdings auf die Betrachtung im zweidimensionalen Raum und ermöglicht dem Schüler lediglich eine Sekundärerfahrung.

| Umsetzung | Darstellung | Reduktion | Darstellbare Bewegungen | Schüleraktivität | Zeitlicher Aufwand | Materieller Aufwand | Weitere Vorteile | Nachteile und Durchführungsprobleme | Fachliche Richtigkeit | Gesamtwertung |
|--|-------------|--|-------------------------|------------------|--------------------|---------------------|--|--|-----------------------|---------------|
| 5.1.1. Gezogenes Blatt | Ä / 2D | <ul style="list-style-type: none"> • Kugelgestalt der Erde • Rotationsbewegung • Startgeschwindigkeit des Luftteilchens | ä | ++ | sehr gering | sehr gering | | <ul style="list-style-type: none"> • Schüler können bei Äquatorübertritt falsche Ablenkung beobachten | -- | -- |
| 5.1.2. Pappscheibenmodell | P / 2D | <ul style="list-style-type: none"> • Kugelgestalt der Erde • Startgeschwindigkeit des Luftteilchens | ä | ++ | sehr gering | gering | | <ul style="list-style-type: none"> • Schüler können bei polwärts gerichteter Bewegung falsche Ablenkung beobachten | - | - |
| 5.1.3. Schreibglobus | 3D | <ul style="list-style-type: none"> • Startgeschwindigkeit des Luftteilchens | ä | + | gering | groß | | <ul style="list-style-type: none"> • Schüler können bei polwärts gerichteter Bewegung und Äquatorübertritt falsche Ablenkung beobachten | - | - |
| 5.1.4. Stummer Globus mit Wassertropfen | 3D | | m | + | gering - mittel | groß | <ul style="list-style-type: none"> • Äquatorübertritt darstellbar | <ul style="list-style-type: none"> • Tropfen darf nur am Nordpol aufgebracht werden, sonst fachlich falsch • Tropfen wird beschleunigt • Tropfen nur schwer zu beobachten • Tropfen fällt am Ende ab | + | + |
| 5.1.5. Rotierender Kegelstumpf | 3D | <ul style="list-style-type: none"> • Kugelgestalt der Erde | m (a) | - | sehr groß | sehr groß | | <ul style="list-style-type: none"> • Modell auf Kegel • Rotationsgeschwindigkeit nicht konstant | + | - |
| 5.1.6. Rotierende Scheiben (Muckenfuß) | P / 2D | <ul style="list-style-type: none"> • Kugelgestalt der Erde | a | + | mittel | groß | | <ul style="list-style-type: none"> • Anstoßen nur schlecht dosierbar • Rotationsgeschwindigkeit nicht konstant | + | + |
| 5.1.6. Rotierende Scheiben (Diehl) | P / R / 2D | <ul style="list-style-type: none"> • Kugelgestalt der Erde | ä | -- | sehr groß | sehr groß | <ul style="list-style-type: none"> • entspricht Anforderungen an ein Experiment • Reproduzierbarkeit | | + | + |
| 5.1.7. Flachschüsselmodell | P / 2D(3D) | <ul style="list-style-type: none"> • Kugelgestalt der Erde | uzt. | -- | sehr groß | sehr groß | <ul style="list-style-type: none"> • stellt die gesamte Zirkulation dar | <ul style="list-style-type: none"> • Corioliskraft nur schlecht isoliert beobachtbar | + | - |
| 5.1.8. Nachspiel-Modell | P / 2D | <ul style="list-style-type: none"> • Kugelgestalt der Erde | m | ++ | gering | sehr gering | | <ul style="list-style-type: none"> • keine konstanten Geschwindigkeiten • Bahn der Ablenkung nicht direkt beobachtbar | + | 0 |

Tabelle 2: Übersicht über die Modelle und Modell-Experimente (Abkürzungen und Symbole siehe Legende bei Tabelle 3)

| Umsetzung | Darstellung | Reduktion | Darstellbare Bewegungen | Schüleraktivität | Zeitlicher Aufwand | Materieller Aufwand | Weitere Vorteile | Nachteile und Durchführungsprobleme | Fachliche Richtigkeit | Gesamtbewertung |
|-------------------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|------------------|--------------------|---------------------|---|--|-----------------------|-----------------|
| 5.2.1. Joggeransatz | P / 2D | • Kugelgestalt der Erde | m | uzt. | gering | sehr gering | | | + | 0 |
| 5.2.2. Querschnitt einer Kugel | Ä / 2D | • Kugelgestalt der Erde | m | uzt. | gering | sehr gering | | | + | 0 |
| 5.2.3. Coriolisk. im Vektorraum | Ä / 2D | • Kugelgestalt der Erde | m | uzt. | gering | sehr gering | • Verdeutlichung der Bahnkurve | • keine eigenständige Erklärung | ++ | k.B. |
| 5.2.4. Formel-Argumentation | - | | a | uzt. | gering | sehr gering | | | ++ | - |
| 5.3.1. Arbeitsblatt Geogebra | P / 2D | • Kugelgestalt der Erde | m | ++ | gering | gering | • Bewegung schrittweise nachvollziehbar | | + | 0 |
| 5.3.2. Software „Corioliskraft“ | P / 2D | • Kugelgestalt der Erde | a | ++ | gering | gering | • Bewegung schrittweise nachvollziehbar • Parameter flexibel veränderbar | • zu viele Einstellmöglichkeiten • wenig intuitive Bedienung | + | + |
| 5.3.3. Webgeo-Modul | P / 2D | • Kugelgestalt der Erde | a | ++ | gering | gering | • Kontrollfragen | • ungewohnte Darstellung | + | 0 |
| 5.3.4.1. „Die Kraft, die keine ist“ | unterschiedlich | | m | -- | gering - mittel | gering | | • viel zu schnelle Erklärung • zu viele Nebeninformationen | + | 0 |
| 5.3.4.2. Kinderkarussell | P / R / 2D | • Kugelgestalt der Erde | a | -- | gering | gering | | • Film in schlechter Qualität • Darstellung sehr schnell • keine Erklärung | k.E. | 0 |
| 5.3.4.3. alpha-centauri | - | | uzt. | -- | gering | gering | | • unzureichende Erklärung • zu viele Nebeninformationen | + | -- |

Tabelle 3: Übersicht über die deskriptiven Erklärungen und die audiovisuellen und interaktiven Medien

Darstellung: Ä = Blick auf den Äquator, P = Blick auf den Pol, R = Blick aus dem rotierenden System; 2D = zweidim. Darstellung, 3D = dreidim. Darstellung
 Darstellbare Bewegungsrichtungen: ä = nur äquatorwärts gerichtete Bew., p = nur polwärts gerichtete Bew., m = nur meridionale Bew., a = alle Bew., uzt. = unzutreffend
 Schüleraktivität: ++ = sehr gut schüleraktiv umsetzbar (Praktikum), + = umsetzbar, - = nur schwer umsetzbar, -- = nicht umsetzbar, uzt. = unzutreffend
 Fachliche Richtigkeit: ++ = sehr gut, + = gut, 0 = akzeptabel, - = schlecht, -- = sehr schlecht, k.E. = es wird keine Erklärung der Corioliskraft gegeben
 Gesamtbewertung: ++ = sehr gut, + = gut, 0 = akzeptabel, - = schlecht, -- = sehr schlecht, k.B. = keine Bewertung möglich, da keine eigenständige Erklärung

6. Die Corioliskraft im Unterricht – Ergebnisse einer bundesweiten Umfrage

Nachdem nun die Bildungsvorgaben der Bundesländer und verschiedene Umsetzungsmöglichkeiten zum Thema Corioliskraft bekannt sind, soll der Blick auf den konkreten Unterricht gelenkt werden. Dabei sei noch einmal darauf verwiesen, dass die Corioliskraft, auch wenn sie nur in wenigen Bildungsvorgaben in Deutschland explizit genannt wird (vgl. Kap. 4), doch von zentraler Bedeutung für die Erklärung einer Vielzahl atmosphärischer Prozesse ist. Es ist also unerlässlich, dass sie im Unterricht behandelt wird. Dabei steht die unterrichtende Lehrkraft aber in allen Klassenstufen vor dem Problem, dass eine korrekte mathematische Herleitung (vgl. Kap. 2.2.) mit den Vorkenntnissen der Schüler unter anderem aus entwicklungspsychologischen Gründen (vgl. Kap. 3) nahezu unmöglich ist und man deshalb auf andere Erklärungsansätze ausweichen muss. Dabei wird der Stellenwert der Corioliskraft im Unterrichtskanon von der einzelnen Lehrkraft subjektiv bewertet und die Behandlungstiefe individuell festgesetzt. Die daraus resultierenden Unterrichtsgänge unterscheiden sich dementsprechend sehr stark hinsichtlich der angewandten didaktischen Methoden und der eingesetzten Medien. Doch wie sieht nun der reale Unterricht aus und wie wird er von äußeren Rahmenbedingungen beeinflusst?

Konkret werden die folgenden **Hypothesen** untersucht:

1. Die Corioliskraft wird verstärkt in den Bundesländern unterrichtet, in denen sie durch die Bildungsvorgaben verpflichtend vorgeschrieben ist. In den anderen Bundesländern spielt das Thema eine untergeordnete Rolle.
2. Zur unterrichtlichen Umsetzung werden häufig stark vereinfachte Modelle eingesetzt, die fachliche und systematische Mängel aufweisen.
3. Wissenschaftlich korrekte und aufwendige Experimente werden nur selten durchgeführt.
4. Die fachliche Sicherheit der Lehrkraft wirkt sich signifikant auf die Behandlungstiefe aus. Diese ist bei Lehrern mit Mathematik oder einer Naturwissenschaft als Zweifach deutlich erhöht.
5. Die Hauptprobleme bei der unterrichtlichen Umsetzung liegen in der Dreidimensionalität, der Rotationsbewegung und der Überlagerung verschiedener Geschwindigkeiten.

Diese Hypothesen sollen anhand einer deutschlandweiten Befragung von Geographielehrern überprüft werden.

6.1. Wahl der Stichprobe

Um eine wirklich zufällige und bis zu einem gewissen Grad repräsentative Stichprobe zu erhalten, muss zunächst eine Auflistung der Grundgesamtheit erstellt werden, aus der dann mit zufälligen Verfahren einzelne Personen auszuwählen sind¹³², die dann auch zur Teilnahme an der Umfrage verpflichtet werden. Dies ist in diesem Fall aber aus datenschutzrechtlichen und organisatorischen Gründen nicht möglich. Ebenso wäre bei einer solchen Auswahl der Stichprobe die Anonymität nicht vollständig gewährleistet, was zu eklatanten Verfälschungen der Ergebnisse („Wunschergebnisse“) führen könnte. Aus diesem Grund wurde bei dieser Studie eine Kombination von zufälliger und nicht-zufälliger Auswahl in einer geschichteten Stichprobe realisiert:

Zunächst wurden Listen der Gymnasien der Bundesländer (mit Ausnahme der Stadtstaaten) erstellt und durch ein zufälliges Verfahren jeweils zehn Schulen¹³³ ausgewählt (vgl. Anhang). In jeder Schule kamen dabei zunächst drei Fragebögen zum Einsatz, wobei aber zusätzlich die Option der Online-Rückmeldung und die des Fotokopierens gegeben waren. Das bedeutet, dass die Stichprobe einen Querschnitt über die Bundesländer darstellt, wobei die Zahl der Einwohner bzw. der einzelnen Gymnasien keine Berücksichtigung fand. Die einzige Ausnahme bildet das Land Baden-Württemberg, auf dem ein Schwerpunkt dieser Untersuchung liegt. Hier wurden, zusätzlich zu den zehn angeschriebenen Schulen, noch an weitere zehn Gymnasien Fragebögen verteilt. Somit waren insgesamt 140 Schulen mit mindestens 420 Fragebögen beteiligt.

Die angeschriebenen Schulleitungen wurden gebeten, die Fragebögen an die entsprechenden Fachlehrer weiterzuleiten. Hier kann es nun bereits zum ersten nicht vollständig zufälligen statistischen Einfluss kommen: Es ist davon auszugehen, dass der Großteil der Fragebögen an die Fachbetreuer weitergeleitet wurde, die dann vermutlich wiederum subjektiv Kollegen ausgewählt haben, die in letzter Zeit mit dem Thema Corioliskraft in Verbindung gekommen sind oder verstärkt im Fach Geographie eingesetzt waren. Dies zeigt sich beispielsweise daran, dass lediglich 1,5 Pro-

¹³² vgl. Kauermann, Küchenhoff (2011), S. 6ff.

¹³³ Im bevölkerungsreichen Nordrhein-Westfalen entspricht dies einer Stichprobengröße von ca. 1% (vgl. Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen, 2011).

zent der Teilnehmerangaben, die Corioliskraft in den letzten Jahren nicht unterrichtet zu haben.

Insgesamt haben Lehrer aus mehr als 60 Prozent¹³⁴ der angeschriebenen Schulen an der Umfrage teilgenommen. Obwohl dieser Wert als sehr hoch angesehen werden kann, streut die Zahl der Rückmeldungen in den einzelnen Bundesländern sehr stark. Besonders gering war der Rücklauf aus Brandenburg und Thüringen, wo sich nur ein bzw. zwei Schulen mit jeweils einem zurückgesandten Fragebogen beteiligt haben, so dass die untersuchte Stichprobe hier keine Rückschlüsse auf die dortigen Verhältnisse zulässt.

Erwähnenswert ist, dass es drei Schulen gab, bei denen aus unterschiedlichen Gründen die Teilnahme an dieser Umfrage vollständig abgesagt wurde. Zwei dieser Schulen stammen aus Rheinland-Pfalz, eine aus Sachsen-Anhalt.

6.2. Gestaltung des Fragebogens

Bei der Gestaltung des Fragebogens galten zunächst einmal drei Prämissen, um einen möglichst hohen Rücklauf zu erzielen:

Erstens sollte das Ausfüllen des Fragebogens möglichst wenig Zeit der jeweiligen Lehrkraft beanspruchen. Dies wurde bei einem Großteil der gestellten Fragen durch eine geschlossene und direkte Fragestellung erreicht.

Zweitens sollte die gesamte Umfrage absolut anonym sein, so dass auch kritische Fragen, wie beispielsweise nach der fachlichen Sicherheit, ehrlich beantwortet werden konnten. Um dies zu gewährleisten, wurde auf die Abfrage einiger weiterer statistischer Angaben wie beispielsweise Alter oder Geschlecht verzichtet. Lediglich das Bundesland und die neben Geographie noch unterrichteten Fächer wurden erfragt, um die Daten einerseits nach länderspezifischen Besonderheiten im föderalistischen Bildungssystem, andererseits nach möglichen fächerspezifischen Abweichungen aufschlüsseln zu können.

¹³⁴ Insgesamt wurden achtzig Rückumschläge zurückgesandt. Die Online-Meldungen können aus Gründen der Anonymität nur den auf den Fragebögen angegebenen Bundesländern zugeordnet und nicht zu Schulen gruppiert werden. Insgesamt haben 22 Lehrer aus acht verschiedenen Bundesländern online geantwortet.

Drittens wurde, um einen möglichst hohen Rücklauf zu ermöglichen, dem Anschreiben ein adressierter und frankierter Rückumschlag beigelegt.

Zusätzlich gab es die Möglichkeit, den Fragebogen online auszufüllen und vollständig anonym zurückzusenden, was von über zwanzig Befragten wahrgenommen wurde.

Fragebogen zum Thema Coriolisablenkung im Geographieunterricht

Liebe Kolleginnen und Kollegen,

im Rahmen einer Untersuchung beschäftige ich mich mit dem Thema Coriolisablenkung¹ im Geographieunterricht. In diesem Zusammenhang ist es für mich wichtig zu erfahren, wie an den verschiedenen Schulen und von den verschiedenen Lehrkräften das Thema unterrichtet wird. Ich wäre Ihnen sehr dankbar, wenn Sie mich dabei unterstützen und mir den ausgefüllten Fragebogen bis spätestens zum 1. Juli 2011 zurücksenden. Selbstverständlich findet diese Umfrage vollständig anonym statt. Sollten erfreulicherweise weitere Lehrkräfte Ihrer Schule an dieser Umfrage teilnehmen, bitte ich Sie den Fragebogen zu fotokopieren. Sie können den Fragebogen auch online unter coriolis.unterricht-gymnasium.de ausfüllen.

Ich bedanke mich bereits jetzt für Ihre Unterstützung.

Matthias Stober, Staatliches Seminar für Didaktik und Lehrerbildung (Gymnasien) Karlsruhe

| | |
|---|---|
| <p>1. Haben Sie in den letzten Jahren das Thema „Coriolisablenkung“ in Ihrem Unterricht behandelt?</p> | <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein (weiter mit Frage 2) |
| <p>a In welchen Klassenstufen haben Sie die Coriolisablenkung behandelt?</p> | <input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/> |
| <p>b Würde dabei die Coriolisablenkung direkt angesprochen und benannt oder wurde sie nur als Phänomen beispielsweise im Zusammenhang mit dem Passat, dem Monsun oder der allgemeinen planetarischen Zirkulation angesprochen (ohne direkte Benennung)?</p> | <input type="checkbox"/> mit direkter Benennung <input type="checkbox"/> ohne direkte Benennung |
| <p>c Welche Möglichkeiten der Erklärung haben Sie verwendet? (Mehrfachnennungen sind möglich)</p> | |
| <input type="checkbox"/> Einfache Nennung der Ablenkung ohne ausführliche Erklärung | <input type="checkbox"/> Durchführung eines Experiments (bitte erläutern Sie kurz das Experiment im Feld 6 „Sonstiges“) |
| <input type="checkbox"/> Argumentation über die vom Breitenkreis abhängigen Bahngeschwindigkeiten | <input type="checkbox"/> Induktive Erklärung über die vorgegebene Formel |
| <input type="checkbox"/> Erklärung mit Hilfe eines (stummen) Globus | <input type="checkbox"/> Mit Hilfe eines Films, einer Animation oder eines interaktiven Lernmoduls |
| <p>d Didaktische Reduktion: Haben Sie in Ihrem Unterricht...</p> | |
| <p>...besprochen, dass der Betrag der Coriolisablenkung von der geographischen Breite abhängt?</p> | <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein |
| <p>...besprochen, dass der Betrag der Coriolisablenkung von der Geschwindigkeit der Massen abhängt?</p> | <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein |
| <p>...die vereinfachte Formel der Coriolisablenkung genannt?</p> | <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein |
| <p style="text-align: center;">$C = 2 \cdot m \cdot \omega \cdot \sin \varphi \cdot v$</p> | |
| <p>weiter mit Frage 3</p> | |

¹ In den Schulbüchern und der Fachliteratur werden die Begriffe Coriolisablenkung und Corioliskraft häufig synonym verwendet.

Abb. 57: Fragebogen, Seite 1

2. Wenn Sie Frage 1 mit „nein“ beantwortet haben:
Beschreiben Sie kurz, wie Sie Ihren Schülerinnen und Schülern die Entstehung der Westwindzone (alternativ des SW-Monsuns) vermitteln.

weiter mit Frage 4

3. Wenn Sie Frage 1 mit „ja“ beantwortet haben:

a Beim Unterrichten der Coriolisablenkung benutze ich folgende Materialien: (Mehrfachnennungen sind möglich)

Schulbuch
 Arbeitsblatt
 Material aus Fachzeitschrift
 Experiment
 Sonstiges (bitte links eintragen)

b Sind Sie mit den oben genannten Materialien zufrieden? ja nein

c Wünschen Sie sich zusätzliche Materialien zur Vermittlung des Themas Coriolisablenkung (z.B. Arbeitsblätter, einfache Versuchsbeschreibungen, ...)? ja nein

4. Beim Thema Coriolisablenkung fühle ich mich fachlich...

sicher
 weniger sicher
 unsicher

Begründung:

5. Wo sehen Sie die größten Probleme beim Vermitteln der Coriolisablenkung (z.B. Dreidimensionalität, Rotationsbewegung, Bewegungsüberlagerung,...)?

6. Sonstiges:

7. Statistische Angaben:

a Ich unterrichte in folgendem Bundesland:

b Neben Geographie unterrichte ich noch die folgenden Fächer:

Bitte senden Sie das Formular per Post an:
 Staatliches Seminar für Didaktik und Lehrerbildung (Gymnasien) Karlsruhe
 Matthias Stober
 Jahnstraße 4
 76133 Karlsruhe
 coriolis@unterricht-gymnasium.de

Abb. 58: Fragebogen, Seite 2

6.3. Interpretation der Umfrageergebnisse

Bei der Auswertung der Umfrageergebnisse zeigte sich einerseits, dass bei der Erstellung des Fragebogens nicht alle Eventualitäten berücksichtigt wurden, andererseits aber auch die Trennschärfe der Antworten durch eine teilweise unterschiedlich gehandhabte Fachterminologie nicht in allen Fällen groß genug war, so dass letztendlich einige Fragen offen blieben. Aus diesen Gründen wurden insgesamt 24 zusätzliche, standardisierte Interviews mit Lehrern an größtenteils badenwürttembergischen Gymnasien geführt (vgl. Anhang), deren Ergebnisse an den entsprechenden Stellen in die Interpretation der Umfrage eingeflossen sind.

6.3.1. Rückmeldungen

Wie bereits in Kapitel 6.1. erwähnt, lag der Gesamtrücklauf aus den Schulen bei über 60 Prozent, wobei aus 80 Schulen Rückmeldungen in Papierform eingingen und aus mindestens acht unterschiedlichen Schulen Onlineantworten kamen.

Vergleicht man nun die viel aussagekräftigere absolute Anzahl der verschickten Fragebögen (drei pro Schule) mit dem Rücklauf¹³⁵, so zeigt sich ein anderes Bild: Von 420 versendeten Fragebögen kamen 185 Exemplare zurück. Dies ergibt einen Gesamtrücklauf von 44 Prozent, bzw. eine „non-response-rate“ von 56 Prozent, was nach Voß¹³⁶ als sehr guter Wert einzustufen ist. Wenn man nun davon ausgeht, dass der Rücklauf ein Spiegelbild von vorhandenen Kenntnissen und unterrichtlicher Relevanz des Themas darstellt, lässt sich daraus schließen, dass das Interesse der damit befassten Lehrer an diesem Thema relativ groß ist.

¹³⁵ Im Folgenden wird die absolute Zahl der zurückgeschickten Fragebögen als Rücklauf bezeichnet.

¹³⁶ vgl. Voß (2003), S. 20.

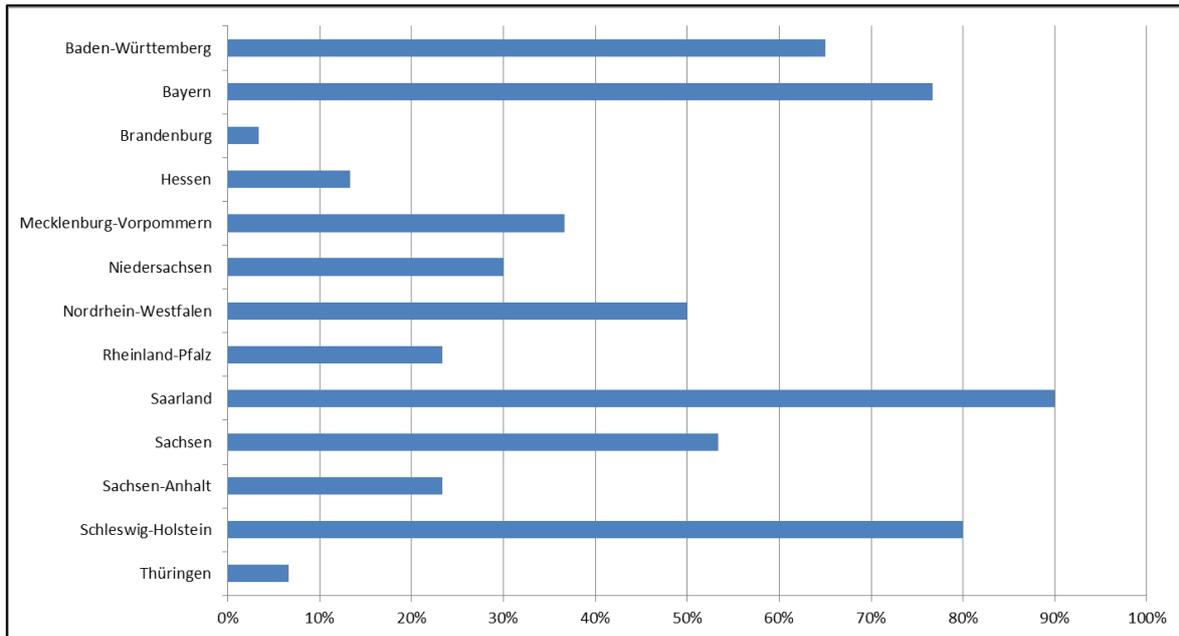


Abb. 59: Rücklauf nach Bundesländern

Vergleicht man die einzelnen Bundesländer, so wird deutlich, dass die Rücklaufquote der Fragebögen sehr stark streut (vgl. Abb. 59). Sie reicht von drei Prozent in Brandenburg bis zu 90 Prozent im Saarland. Versucht man nun die Rücklaufzahlen geographisch zu fassen, so lässt sich als Trend formulieren, dass aus den alten Bundesländern mit durchschnittlich 54,8 Prozent mehr Rückmeldungen kamen, als aus den neuen Bundesländern (24,7 Prozent).

Eine deutlichere Korrelation ergibt sich, wenn man die Rücklaufquoten mit den Bildungsplänen in Verbindung bringt. Dabei lässt sich vereinfachend sagen, dass ein – hier nicht signifikant quantifizierbarer – Zusammenhang zwischen der Repräsentanz der Themen Klimatologie bzw. Windsysteme in den Bildungsvorgaben und dem Interesse der Lehrkräfte am Thema Corioliskraft besteht. Bei fehlenden Bildungsvorgaben resultiert daraus dann auch eine geringere Bereitschaft, an einer Umfrage zu diesem Thema teilzunehmen.

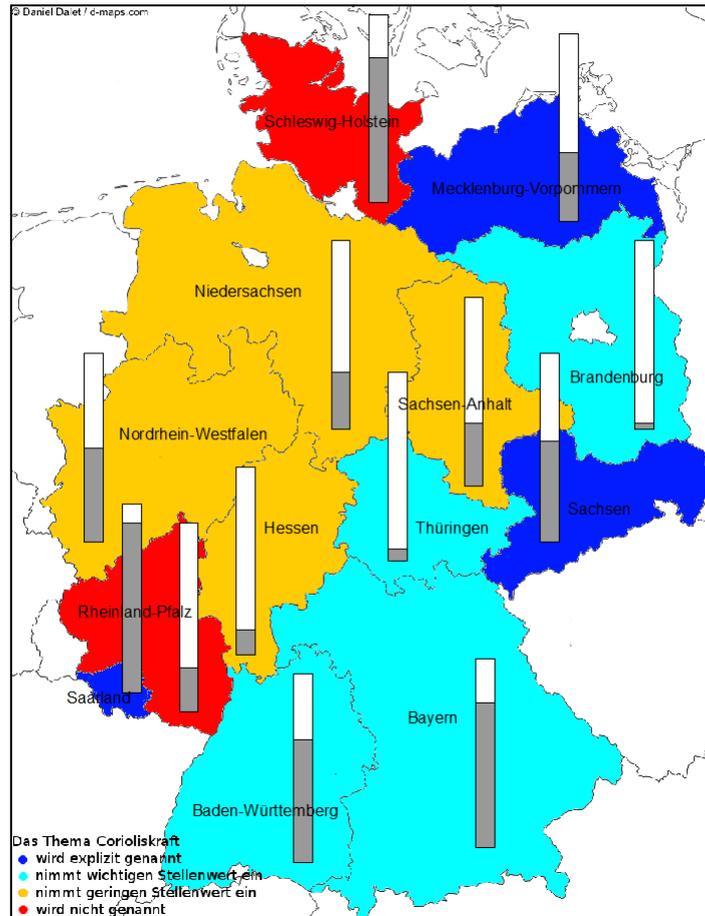


Abb. 60: Rückmeldequote in Verbindung mit dem Bildungsplanbezug nach Bundesländern

In Abb. 60 sind die Bundesländer, in deren Bildungsplänen die Corioliskraft explizit genannt wird, dunkelblau eingefärbt (vgl. Kap. 4). Dabei wird deutlich, dass die Rückmeldequote im Saarland (90 Prozent), dem einzigen alten Bundesland, bei dem die Corioliskraft im Lehrplan explizit genannt wird, außergewöhnlich hoch ist. Betrachtet man nun ausschließlich den Osten Deutschlands, so nehmen, wenn auch auf niedrigerem Niveau, auch hier die beiden Bundesländer Sachsen und Mecklenburg-Vorpommern, in deren Bildungsvorgaben ebenfalls die Corioliskraft explizit genannt wird, eine Spitzenstellung ein.

Dem gegenüber stehen die rot und orange markierten Länder, in denen die Corioliskraft überhaupt nicht oder nur indirekt in den Bildungsvorgaben verankert ist. Die Rücklaufquoten betragen dort jeweils maximal 50 Prozent, wobei Schleswig-Holstein mit 80 Prozent eine Ausnahme bildet, die vermutlich auf der Arbeit des IPN in Kiel (= Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften) beruht. Im Zeitraum zwischen 2000 und 2005 wurden hier Unterrichtsmaterialien zum Projekt „System

Erde“ entwickelt und landesweit getestet, wodurch ein breiteres Verständnis für physich-geographische Fragestellungen geschaffen wurde.¹³⁷

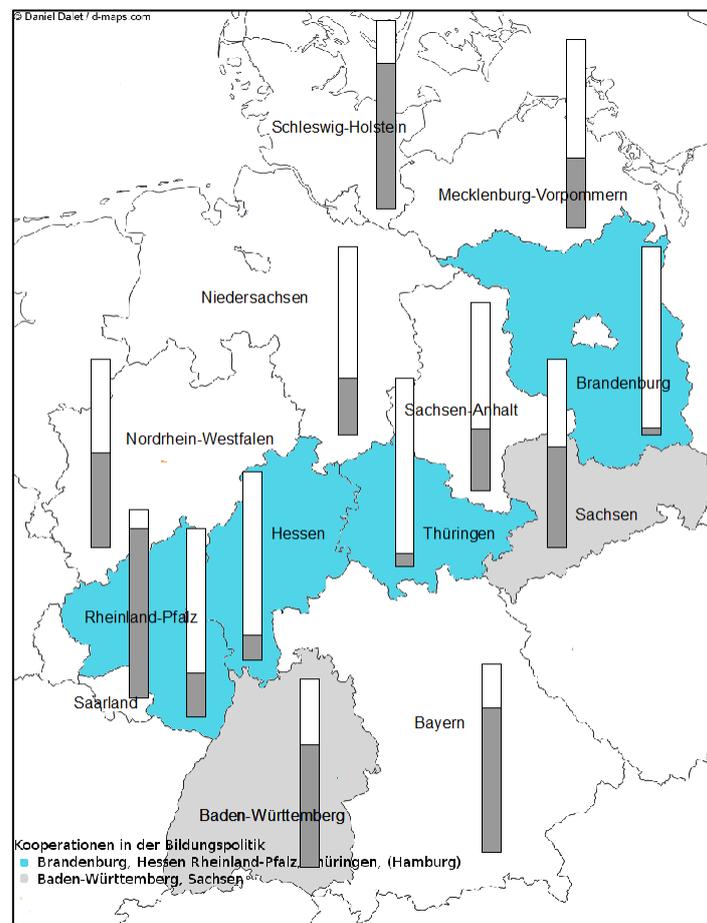


Abb. 61: Rückmeldequote nach Bildungsk Kooperationen

Eine positive Korrelation der Zahl der Rückmeldungen mit der unterrichtlichen Relevanz des Themas besitzt aus den folgenden Überlegungen eine sehr hohe Wahrscheinlichkeit:

- a) Die Ergebnisse der sogenannten „Kooperierenden Länder“ (Brandenburg, Hessen, Rheinland-Pfalz und Thüringen¹³⁸), die innerhalb des Thüringer Schulportals bzw. des Thüringer Informationssystems TIS zusammenarbeiten, weisen trotz unterschiedlicher Bildungsvorgaben beim Thema Corioliskraft alle

¹³⁷ vgl. Hlawatsch u.a. (2005) oder Bayrhuber u.a. (o. J.)

¹³⁸ vgl. Merten (2011). Anmerkung: Hamburg ist ebenfalls Mitglied dieser Kooperation, wird aber im Rahmen dieser Studie als Stadtstaat nicht berücksichtigt.

eine sehr geringe Rücklaufquote auf (vgl. Abb. 61), so dass sich dort ein gemeinsamer Gesamtrücklauf von lediglich 11,7 Prozent ergibt.

- b) Die bei der Erstellung der Bildungspläne kooperierenden Länder Baden-Württemberg und Sachsen, bei denen das Thema Corioliskraft in den Bildungsvorgaben verankert ist, weisen dagegen einen gemeinsamen Gesamtrücklauf von über 61 Prozent auf.

Geht man nun von der bereits oben formulierten Annahme aus, dass die Zahl der Rückmeldungen mit der unterrichtlichen Relevanz des Themas korreliert, so lässt sich die ursprünglich formulierte Hypothese, dass die Corioliskraft verstärkt in den Bundesländern unterrichtet wird, in denen sie durch die Bildungsvorgaben verpflichtend vorgeschrieben ist, zwar nicht in jedem Fall quantitativ belegen, aber dennoch als Trend formulieren (vgl. Kap. 6, Hypothese 1).

6.3.2. Klassenstufen

Auf die Frage „In welchen Klassenstufen haben Sie die Corioliskraft behandelt?“ waren Mehrfachantworten möglich.

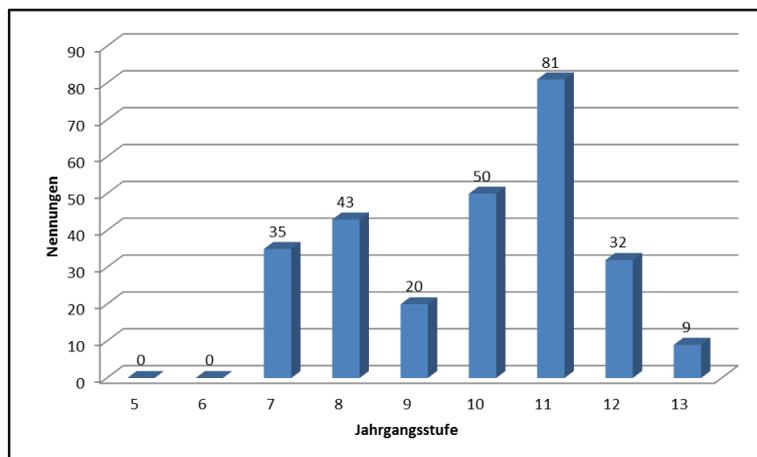


Abb. 62: Thematisierung der Corioliskraft nach Jahrgangsstufen (Nennungen)

Erwartungsgemäß spielt dieses Thema in den Klassenstufen 5 und 6 auf Grund seiner Komplexität noch keine Rolle (vgl. Abb. 62). Der Schwerpunkt der Behandlung liegt in den Klassen 7 und 8 und insbesondere in der Oberstufe. Diese erstreckt sich hier noch auf die Klassen 11 bis 13, da die Fragestellung die Erfahrungen der letzten Jahre einschloss und sich damit viele Umfrageteilnehmer noch auf das neunjährige Gymnasium bezogen.

Die relativ große Anzahl der Lehrer, die die Corioliskraft bereits in der Mittelstufe unterrichten, ist auf die Behandlung dieses Themas im Zusammenhang mit der Passatzirkulation bzw. des Monsuns zurückzuführen.

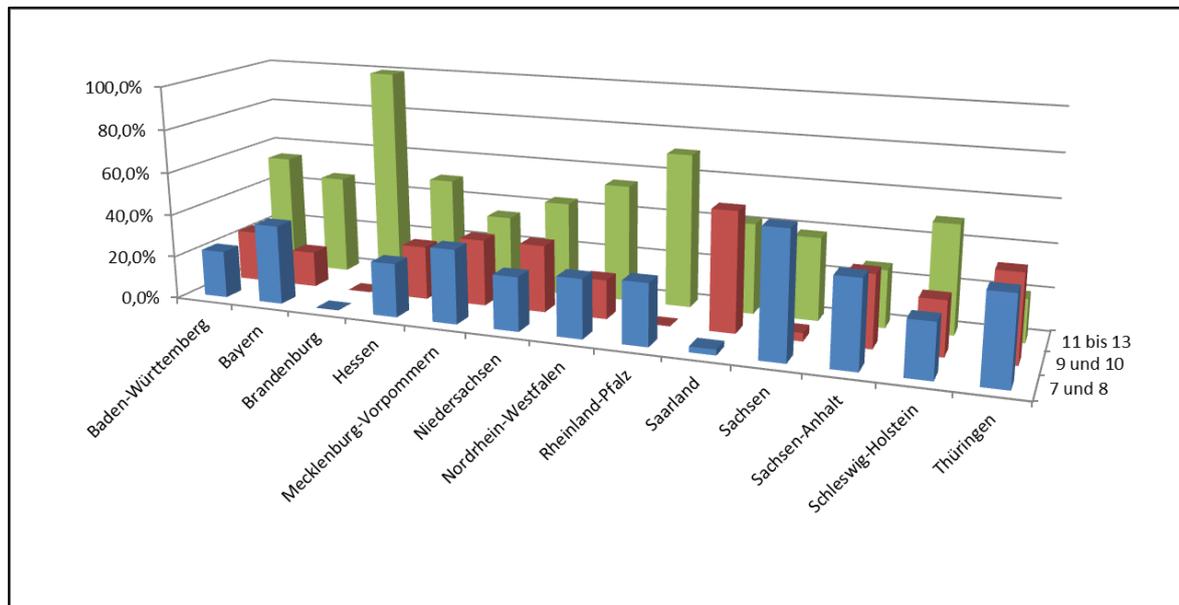


Abb. 63: Thematisierung der Corioliskraft nach Klassenstufen. Aufgeschlüsselt nach Bundesländern

Schlüsselt man nun die positiven Rückmeldungen nach den verschiedenen Bundesländern auf (vgl. Abb. 63), so liegt in den meisten Ländern nach wie vor ein Unterrichtsschwerpunkt in der Oberstufe. Auffällig ist aber, dass es auch einige Bundesländer wie z.B. Sachsen gibt, in denen die Corioliskraft schon verstärkt in den Klassen 7 und 8 unterrichtet wird. Gerade in diesem Bundesland ist dies erstaunlich, da in den Bildungsvorgaben für Klasse 8 lediglich das „Kennen des Tropischen Monsuns und seine Auswirkungen auf das Leben der Menschen“¹³⁹ und damit eine eher anthropogene Betrachtung gefordert wird, während für Klasse 11 explizit die Behandlung der Corioliskraft aufgeführt ist.

Betrachtet man die anderen Bundesländer, so lässt sich bei der Verteilung der Unterrichtsschwerpunkte je Klassenstufe keine generelle Korrelation zwischen den Umfrageergebnissen und den Bildungsplanvorgaben feststellen. Als Beispiel sei hier zunächst das Saarland genannt, in dem zwar der Lehrplan, ähnlich wie in Sachsen, die Behandlung der Corioliskraft in der gymnasialen Oberstufe vorschreibt, der unter-

¹³⁹ Sächsisches Staatsministerium für Kultus (2004/2009/2011), S. 22.

richtliche Schwerpunkt aber in den Klassen 9 und 10 liegt. Der umgekehrte Fall lässt sich beispielsweise in Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen erkennen, wo in der Oberstufe kein Bildungsplanbezug hergestellt werden kann, die Corioliskraft aber offensichtlich dennoch unterrichtet wird. Dies legt die Vermutung nahe, dass das Thema Corioliskraft für diese Lehrer von so großer Bedeutung für die innere Logik klimatischer Zusammenhänge ist, dass sie sie in ihren Unterricht ergänzend aufnehmen. Weiterhin bauen vermutlich die Lehrer, die zur Erklärung klimatologischer Phänomene generell mit der Corioliskraft arbeiten, schon in unteren Klassenstufen vorab entsprechende Erklärungselemente in ihren Unterricht ein.

6.3.3. Benennung

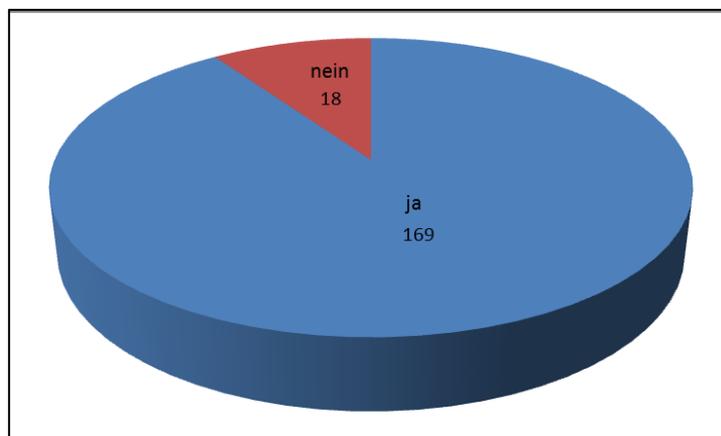


Abb. 64: Benennung des Phänomens mit der Bezeichnung „Corioliskraft“ (Nennungen)

Bei der Frage, ob die Corioliskraft im Unterricht direkt angesprochen und benannt wurde, antworteten die meisten Befragten zustimmend (vgl. Abb. 64). Dabei ist davon auszugehen, dass diejenigen, die an der freiwilligen Umfrage teilgenommen haben, dadurch auch implizit ihr fachliches Interesse an diesem Thema zeigen. Dies weist sie als engagierte, an der Weiterentwicklung interessierte Lehrer aus und setzt in der Regel auch einen fundierten Unterricht voraus. Von ihnen ist demnach auch anzunehmen, dass sie definitorisch korrekt vorgehen und damit die Corioliskraft auch als solche direkt benennen.

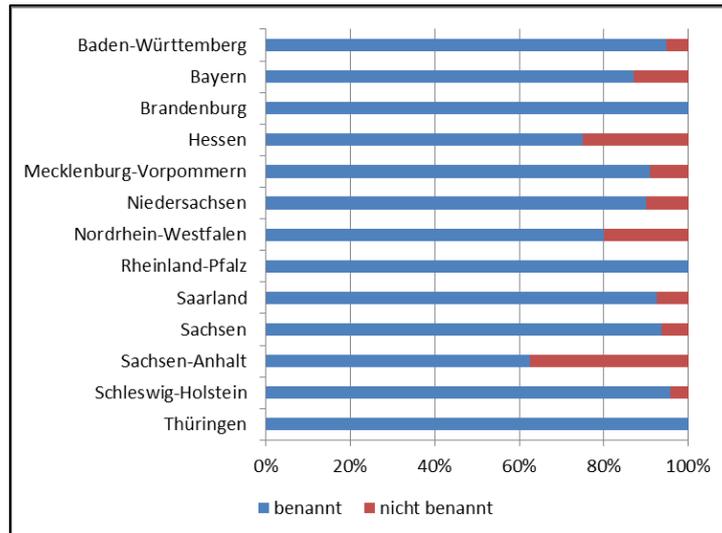


Abb. 65: Benennung des Phänomens mit der Bezeichnung „Corioliskraft“. Aufgeschlüsselt nach Bundesländern

Schlüsselt man nun die Rückmeldungen zur „Benennung der Corioliskraft“ zusätzlich nach Bundesländern auf (vgl. Abb. 65), so fallen zunächst die geringeren Werte der Länder Sachsen-Anhalt, Hessen und Nordrhein-Westfalen auf. Dies korreliert mit den Bildungsvorgaben, die in diesen Ländern nur wenige Anknüpfungspunkte für das Thema bieten. Dagegen weisen die Länder Schleswig-Holstein und Rheinland-Pfalz trotz fehlender Anknüpfungspunkte eine hohe Benennungsquote auf. Gerade beim letztgenannten Bundesland wurde allerdings im Rahmen der Umfrage unter Bemerkungen mehrmals darauf verwiesen, dass die betroffene Lehrkraft ihre Ausbildung in Baden-Württemberg absolviert hat. In diesem Zusammenhang kann, verschärft ausgedrückt, von einer Art „Bildungsimport“ gesprochen werden, durch den die Unterrichtsqualität der Nehmerländer punktuell deutlich gesteigert wurde.

6.3.4. Erklärungsmöglichkeiten

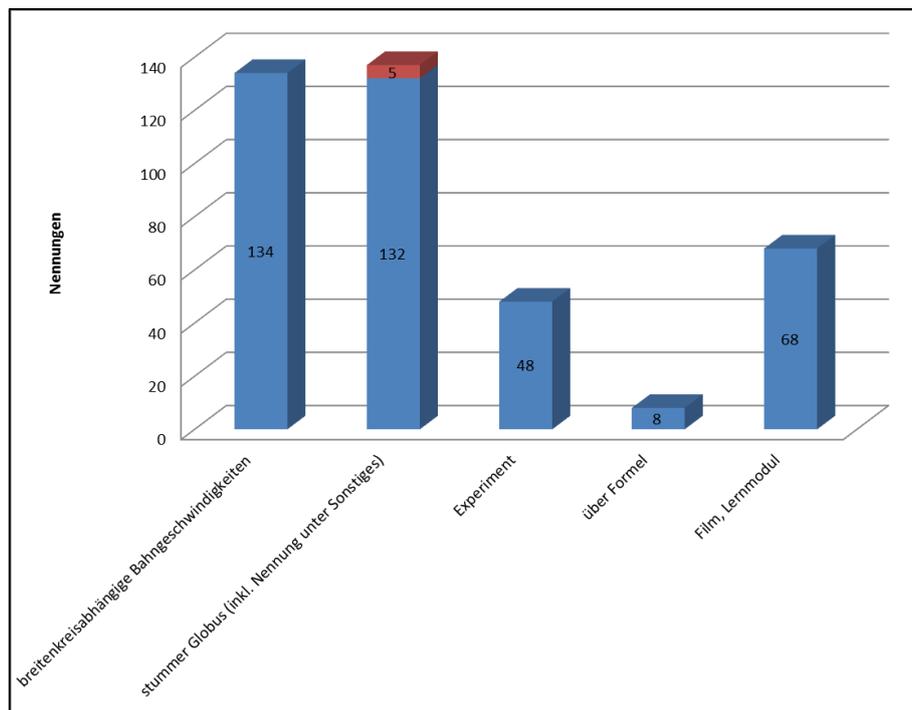


Abb. 66: Erklärungsmöglichkeiten (Nennungen)

Betrachtet man nun die Erklärungsmöglichkeiten, die im Rahmen der Umfrage genannt wurden (vgl. Abb. 66), fällt sofort auf, dass die Visualisierung mit Hilfe des stummen Globus und die Argumentation über die breitenkreisabhängigen Bahngeschwindigkeiten mit Abstand am häufigsten genannt wurden. Konkret wurde auf 185 Fragebögen der Einsatz des stummen Globus 137 mal angeführt¹⁴⁰, die Erklärung über die breitenkreisabhängigen Bahngeschwindigkeiten 134 mal. Durch die Möglichkeit von Mehrfachnennungen haben insgesamt 101 Befragte beide Felder angekreuzt. Dies legt die Vermutung nahe, dass, dem didaktischen Prinzip des Methodenwechsels folgend, zunächst eine Einführung über das Modell des stummen Globus stattgefunden hat, eine weitere Erklärung aber über die breitenkreisabhängigen Bahngeschwindigkeiten erfolgt ist. Auch der Einsatz von Filmen oder Lernmodulen wurde mit einem Anteil von 36 Prozent (68 Nennungen) noch relativ häufig genannt,

¹⁴⁰ Die Zahl 137 ergibt sich aus 132 Umfragebögen, auf denen der Einsatz des stummen Globus angekreuzt war und fünf weiteren Nennungen (in Abb. 66 rot eingezeichnet) unter der Rubrik „Sonstiges“.

wobei ein Großteil der Lehrer, die auf multimediale Materialien zurückgreifen, zusätzlich noch den stummen Globus einsetzen (76 Prozent).

Laut Umfrage gab rund ein Viertel der Teilnehmer an, ein Experiment zur Erklärung der Corioliskraft einzusetzen. Allein drei Viertel dieser Lehrer kreuzten aber gleichzeitig den Einsatz des Schreibglobus (vgl. Kap. 5.1.3.) an, andere führten beispielsweise das Pappscheibenmodell (vgl. Kap. 5.1.2.) oder das Modell des gezogenen Blatts (vgl. Kap. 5.1.1.) als durchgeführtes Experiment auf. Bei der Analyse dieser Angaben wird deutlich, dass viele Lehrer kein Experiment im Sinne Lethmates (vgl. Kap. 5.1.) durchgeführt haben können, sondern lediglich ein Funktionsmodell unter falscher definitorischer Einordnung zum Einsatz kam. Dies betrifft sowohl Hypothese 2 als auch Hypothese 3.

Erwartungsgemäß spielt die „Erklärung über die vorgegebene Formel“ nur eine untergeordnete Rolle.

6.3.5. Didaktische Reduktion

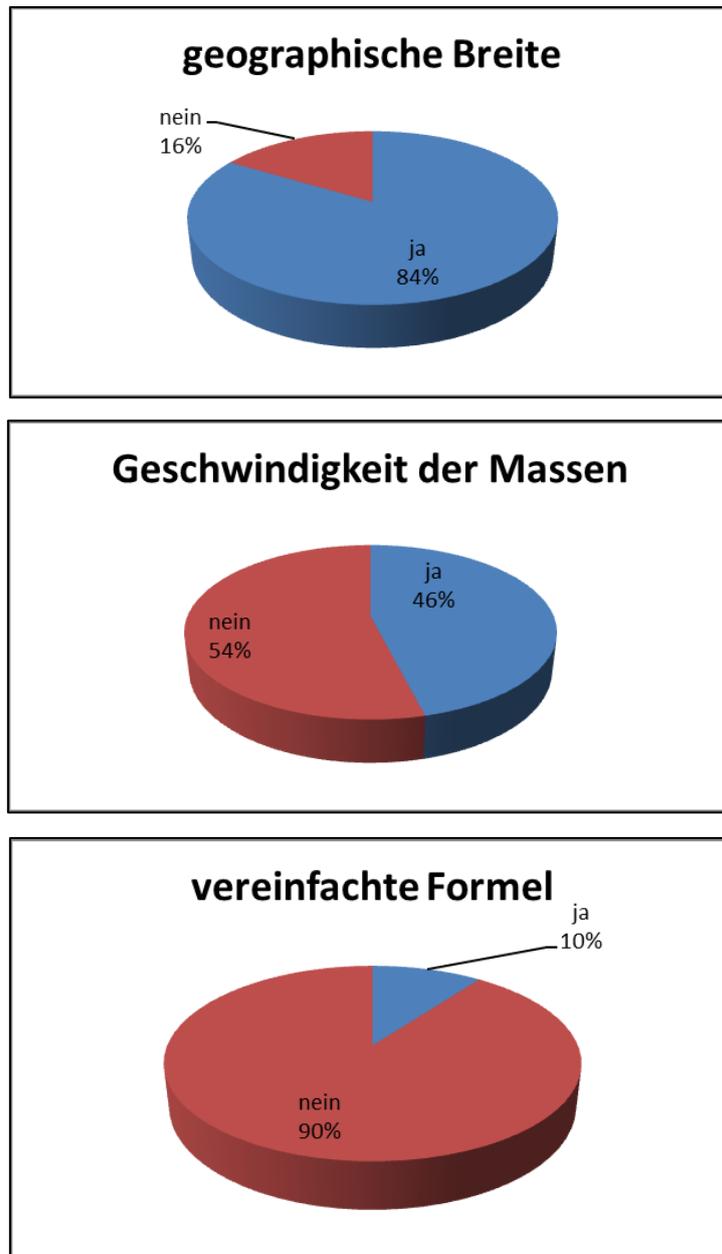


Abb. 67: Didaktische Reduktion wichtiger Erklärungsaspekte

Wie bereits im Kapitel 2 über die theoretische Herleitung der Corioliskraft deutlich gemacht wurde, lässt sich im Rahmen des Geographieunterrichts einerseits wegen der hohen Komplexität und der zum Teil fehlenden mathematischen Grundlagen, andererseits aus Zeitgründen das Thema nur stark vereinfacht vermitteln. Aber auch hier besteht die Möglichkeit, den Abstraktionsgrad und das Niveau dem Leistungsstand der Schüler anzupassen. Im Rahmen der Umfrage hat sich gezeigt, dass 84 Prozent der unterrichtenden Lehrer nicht nur von einer Rechtsablenkung auf der

Nordhalbkugel sprechen, sondern auch die Abhängigkeit des Betrags der Corioliskraft von der geographischen Breite thematisieren (vgl. Abb. 67, geographische Breite). Dieser hohe Wert ist insofern besonders erstaunlich, da diese Abhängigkeit noch nicht einmal in allen Schulbüchern für die Oberstufe aufgegriffen wird.¹⁴¹

Die Abhängigkeit des Betrags der Corioliskraft von der Geschwindigkeit der Massen wird immerhin noch von knapp der Hälfte der befragten Lehrer thematisiert (vgl. Abb. 67, Geschwindigkeit der Massen).

Die vereinfachte Formel, die durchaus in einigen Schulbüchern genannt wird¹⁴², wird dagegen lediglich von zehn Prozent der Befragten angesprochen (vgl. Abb. 67, vereinfachte Formel).

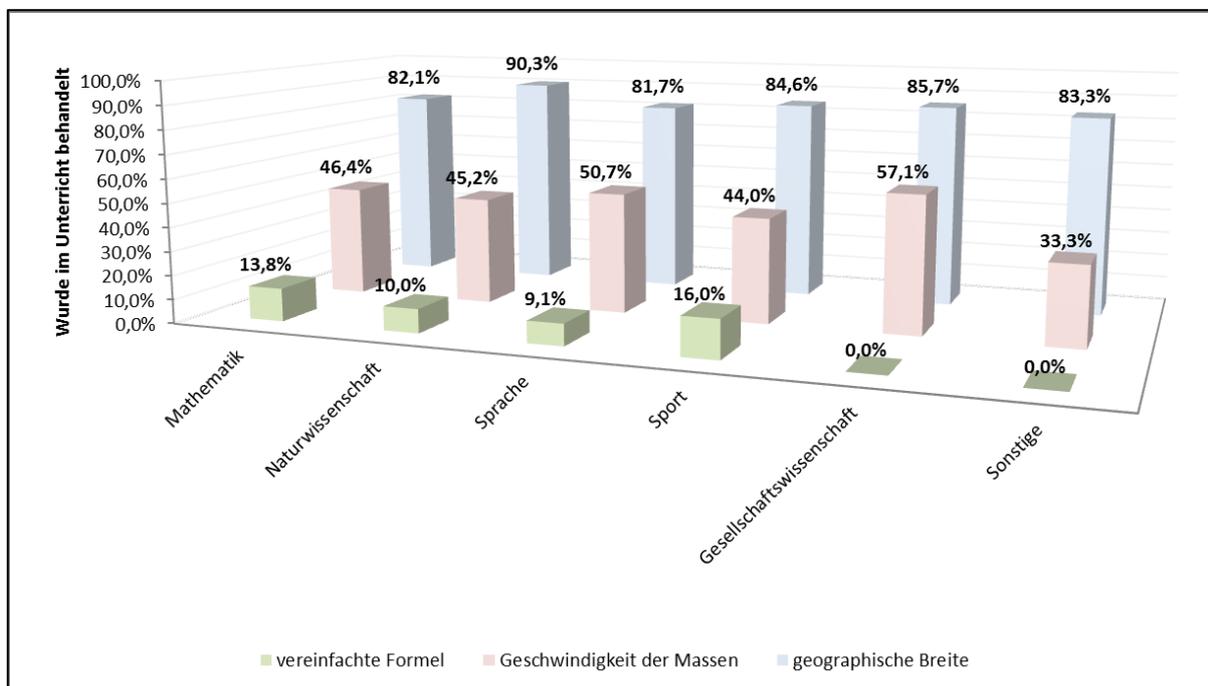


Abb. 68: Didaktische Reduktion. Aufgeschlüsselt nach Zweifächern

Um die unterschiedliche Herangehensweise der Lehrer der einzelnen Fachbereiche untersuchen zu können, wurden auf den Fragebögen auch die weiteren Unterrichtsfächer der Umfrageteilnehmer erfasst. Dies bietet nun die Möglichkeit, eine Klassifizierung nach Naturwissenschaftlern, Mathematikern, Sprachenlehrern (inkl.

¹⁴¹ vgl. z.B. Falk, Scholliers (2010), S. 80f.

¹⁴² vgl. z.B. Bauer u.a. (2001), S. 98.

Deutsch), Sportlern sowie gesellschaftswissenschaftlichen Lehrern vorzunehmen.¹⁴³ Die sehr selten genannten Fächer wie z.B. Musik oder Erziehungswissenschaften wurden in der Kategorie „Sonstige“ zusammengefasst (vgl. Abb. 68).

Entgegen der Erwartung spiegeln sich in allen Klassen weitgehend die oben genannten Trends zur didaktischen Reduktion wider. Auffällig ist die Tatsache, dass die Lehrer der gesellschaftswissenschaftlichen Fächer anscheinend einen größeren Wert auf die Thematisierung der „Geschwindigkeit der Massen“ legen. Diesbezügliche Aussagen sind allerdings auf Grund der geringen Stichprobenmenge (n=6) in dieser Gruppe nicht signifikant.

Nimmt man nun die Einführung der vereinfachten Formel in den Fokus, so zeigt sich, dass diese etwas häufiger von den Sportlern und den Mathematikern thematisiert wird.

Obwohl einzelne Rückmeldungen von Sprachlehrern (z.B. im Feld Sonstiges: „so genau mache ich das nicht“, „Thema könnte besser von einem Physiker vermittelt werden“ oder „physikalisches Hintergrundwissen spärlich entwickelt“) große Unterschiede bei der Vermittlung der Corioliskraft vermuten lassen, zeigen die Umfrageergebnisse letztendlich statistisch keine signifikanten Abweichungen zwischen den einzelnen Fachbereichen. Dies lässt sich vermutlich über den sogenannten „non-response-Fehler“, in den die unterschiedliche Umfragebereitschaft einzelner Gruppen eingeht, oder aber durch die Tatsache erklären, dass die Fragebögen von den Schulleitungen wahrscheinlich nicht nach dem Zufallsprinzip an das Kollegium weitergegeben wurden, sondern diejenigen Lehrer ausgewählt wurden, die verstärkt physisch-geographische Themen unterrichten (vgl. Kap. 6.1.). Es ist davon auszugehen, dass zum Beispiel die an dieser Umfrage teilnehmenden Sprachlehrer durch die intensive Auseinandersetzung mit dem Thema ihre Scheu vor einer gründlichen Behandlung der Corioliskraft verloren haben (vgl. dazu Hypothese 4).

¹⁴³ Zur Klassifizierung wurde immer das zuerst genannte Fach herangezogen.

6.3.6. Material

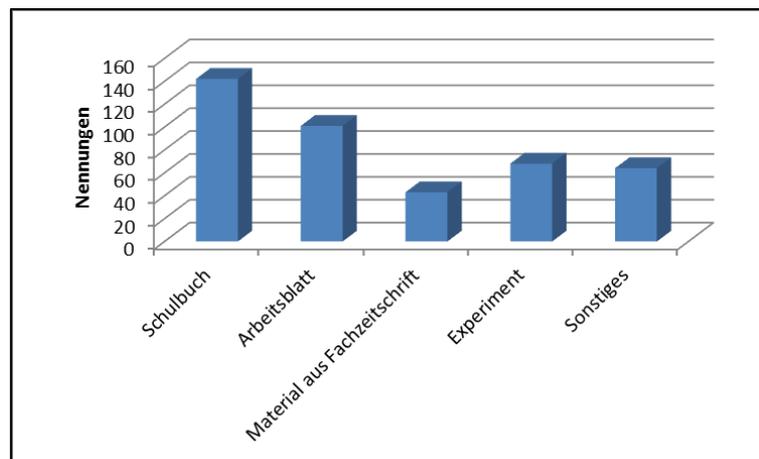


Abb. 69: Eingesetzte Materialien (Nennungen)

Die Verteilung der eingesetzten Materialien ist in Abb. 69 dargestellt. Auch bei dieser Frage konnten die Umfrageteilnehmer mehrere Antworten ankreuzen, wobei ein Großteil der Befragten zumindest ergänzend das Schulbuch nutzt. Die Zahl der Lehrer mit Nennung eines „Experimenteinsatzes“ ist erstaunlich groß. Dies lässt sich teilweise mit der Tatsache erklären, dass bei dieser Fragestellung der Einsatz des Modells des stummen Globus nicht explizit aufgeführt wurde und somit einige Lehrer dessen Einsatz als Experiment gewertet haben. Vermutlich bestehen aber auch Unterschiede in der Fachterminologie, so dass verschiedenartige Definitionen für den Begriff „Experiment“ gebräuchlich sind (vgl. Ausführungen oben und Kapitel 5.1.).

Als weiteres Unterrichtsmaterial wurde im Feld „Sonstiges“ besonders häufig die Tafel bzw. die Erstellung von Tafelskizzen angegeben. Ebenso wurde dort der Einsatz von Filmen und interaktiven Internetseiten genannt.

6.3.7. Zufriedenheit mit dem Unterrichtsmaterial

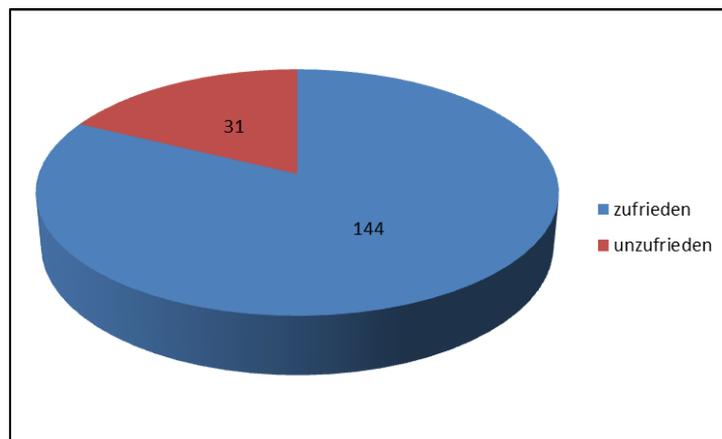


Abb. 70: Zufriedenheit mit dem Unterrichtsmaterial (Nennungen)

Die Zufriedenheit der an der Umfrage beteiligten Lehrer mit den von ihnen eingesetzten Unterrichtsmaterialien kann mit insgesamt 82,3 Prozent als sehr hoch bezeichnet werden (vgl. Abb. 70).

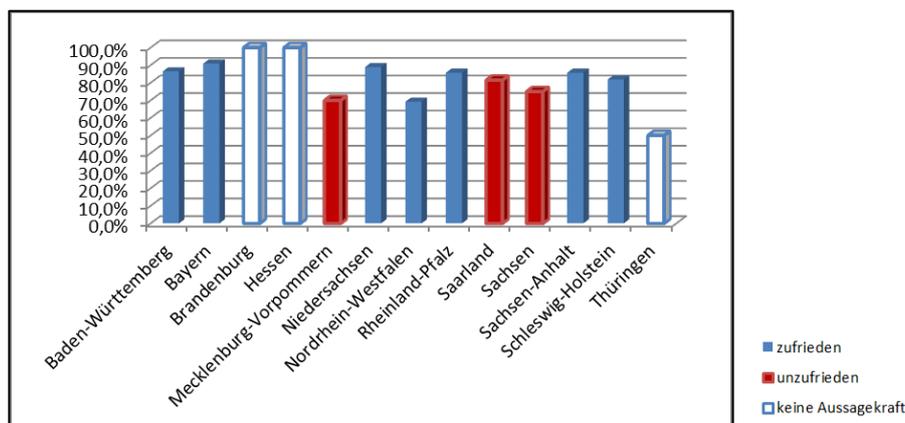


Abb. 71: Zufriedenheit mit dem Unterrichtsmaterial nach Bundesländern

Dabei gibt es aber deutliche Unterschiede zwischen den Umfrageteilnehmern der einzelnen Bundesländer (vgl. Abb. 71), wobei die Extremwerte (100 Prozent in Brandenburg und Hessen sowie 50 Prozent in Thüringen) durch die geringe Zahl an Rückmeldungen aus diesen Ländern keine Aussagekraft haben. Auffällig ist allerdings die Tatsache, dass in den Ländern Mecklenburg-Vorpommern, Saarland und Sachsen, in denen die Corioliskraft explizit in den Bildungsvorgaben genannt wird, die Zufriedenheit nur unterdurchschnittlich ist. Ein möglicher Erklärungsansatz wäre, dass bei der anzunehmenden genaueren Kenntnis des Stoffs das vorhandene Unterrichtsmaterial intensiver hinterfragt und auf seine fachliche Korrektheit geprüft wird.

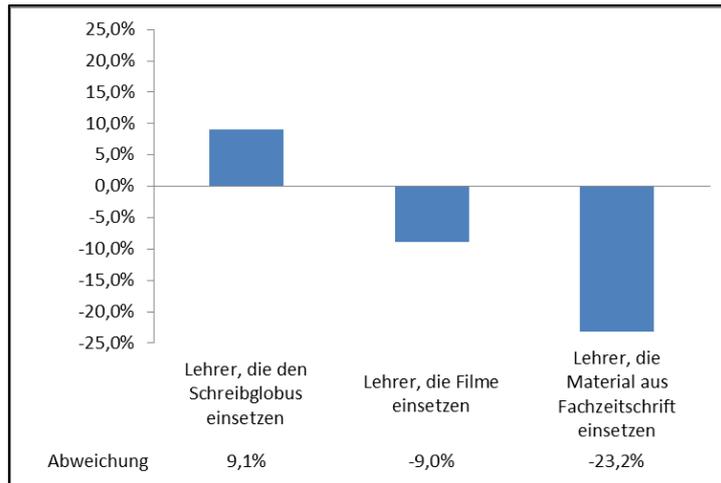


Abb. 72: Zufriedenheit: Abweichung einzelner Lehrergruppen vom Mittelwert der Gesamtstichprobe (82,3 Prozent)

Schlüsselt man nun die Zufriedenheit nach den eingesetzten Materialien auf und setzt diese in Verbindung zum Mittelwert (vgl. Abb. 72), so wird deutlich, dass vor allem die Lehrer eine höhere Zufriedenheit aufweisen, die den Schreibglobus¹⁴⁴ in ihrem Unterricht einsetzen. Da aber die Erklärung über dieses Modell durchaus als fachlich problematisch angesehen werden muss (vgl. Kap. 5.1.3.), kann hier festgestellt werden, dass die individuell empfundene Zufriedenheit der Lehrer einerseits vom Anspruchsniveau an den Unterricht, andererseits aber auch von der fachlichen Sicherheit abhängt. Diese Vermutung wird auch durch die geführten Lehrerinterviews (vgl. Kap. 6.3.) bestätigt, bei denen die Unzulänglichkeiten des Modells des Schreibglobus diskutiert wurden. Als Ergebnis dieser Diskussion stufte ein Großteil der Gesprächspartner im Anschluss die Qualität dieses Unterrichtsmaterials deutlich geringer ein. Diese Lehrkräfte hätten bei einem wiederholten Ausfüllen des Fragebogens ihre Zufriedenheit mit den eingesetzten Materialien wahrscheinlich niedriger bewertet.

Die geringere Zufriedenheit der Lehrer, die Filme zur Visualisierung der Corioliskraft einsetzen, lässt sich leicht durch eine nur sehr geringe Auswahl und die nicht zufriedenstellende Qualität dieser Filme erklären (vgl. Kap. 5.3.4.). So ist es nicht weiter

¹⁴⁴ Da sich aus den Rückmeldungen der Umfrage nur teilweise herauslesen lässt, ob die Befragten das Modell des „Schreibglobus“ oder des „stummen Globus mit Wassertropfen“ eingesetzt haben, wurde in den zusätzlichen Lehrerinterviews nachgefragt. Dabei zeigte sich, dass die überwiegende Mehrheit der Interviewpartner den Schreibglobus einsetzt.

verwunderlich, dass unter „Sonstiges“ mehrfach der Wunsch nach aussagekräftigen Videosequenzen bzw. Animationen genannt wurde.

Dass auch die Lehrkräfte, die Material aus Fachzeitschriften einsetzen (wie z.B. das „Pappscheibenmodell“ oder das „Modell des rotierenden Kegelstumpfs“), eine geringe Zufriedenheit zurückgemeldet haben, erscheint auf den ersten Blick so erstaunlich, dass auch hier in den Lehrerinterviews nachgefragt wurde. Dabei zeigte sich, dass mehrere Faktoren zu dieser Unzufriedenheit beitragen: Dies ist einerseits die Tatsache, dass vor allen Dingen diejenigen Lehrer in Fachzeitschriften nach zusätzlichem Material suchen, denen beispielsweise die Darstellungen im Schulbuch nicht ausreichen. Da aber nach einer Gesamtbewertung des Materials gefragt wurde, geht diese geringere Zufriedenheit statistisch auch in die Bewertung der Materialien aus den Fachzeitschriften ein. Andererseits sind die Darstellungen in Fachaufsätzen oft mit einem sehr hohen Anspruchsniveau und elaborierter Sprache verbunden. Abgesehen davon ist auf Grund der Technik-Methodik-Orientierung der heutigen Wissenschaft der Materialaufwand bei den in den Fachzeitschriften vorgestellten Darstellungen von Coriolis-Versuchen oft enorm hoch und damit eine Durchführung aus zeitlichen und finanziellen Gründen in der Schule kaum möglich (vgl. dazu sowohl Hypothese 2 als auch Hypothese 3 sowie Kap. 5.1.5. und 5.1.6.).

6.3.8. Fachliche Sicherheit

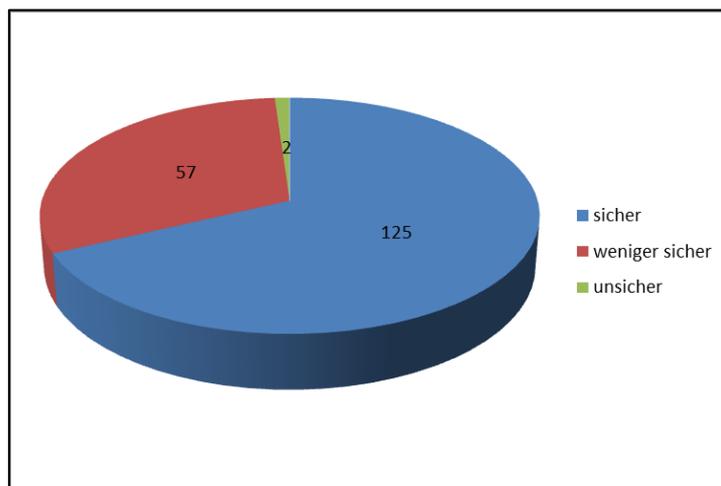


Abb. 73: Fachliche Sicherheit (Nennungen)

Erwartungsgemäß gab ein Großteil der Umfrageteilnehmer an, sich fachlich sicher zu fühlen (vgl. Abb. 73). Diese Aussage wird jedoch durch die ebenfalls geforderte An-

gabe einer Begründung deutlich relativiert. Hier ist beispielsweise zu lesen, dass sich die Bewertung der fachlichen Sicherheit lediglich auf das „Anspruchsniveau der Schüler“ bezieht, dass „weitergehende Kenntnisse für den Unterricht nicht nötig“ und „die ursächlichen Zusammenhänge [...] nur wenig bedeutsam“ für den Geographieunterricht sind. Dies zeigt, dass eine nicht zu unterschätzende Zahl an Lehrkräften die Ursachen der Corioliskraft als eine Art Black-Box wahrnimmt und damit die Einflussfaktoren, aber auch die möglichen Folgewirkungen nur unzureichend thematisieren kann (vgl. Hypothese 4).

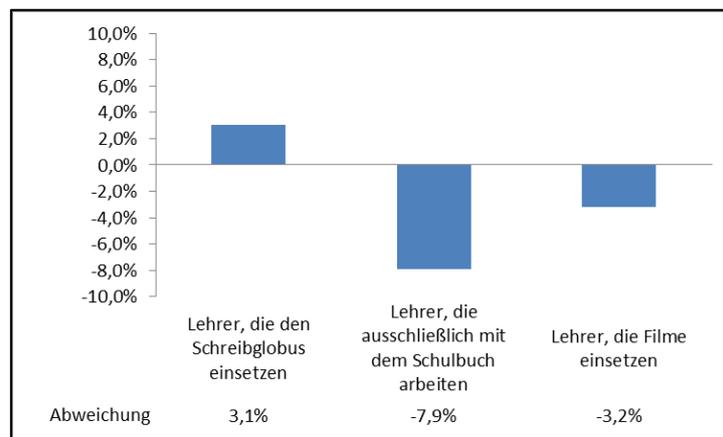


Abb. 74: Fachliche Sicherheit: Abweichungen einzelner Lehrergruppen vom Mittelwert der Gesamtstichprobe (67,9 Prozent)

Zur Klärung, ob diese Sichtweise fachspezifische Unterschiede aufweist, wurden wieder einzelne Lehrergruppen betrachtet. Es ergeben sich einige interessante Abweichungen vom Mittelwert (vgl. Abb. 74). Zunächst schätzen diejenigen Lehrer, die den Schreibglobus einsetzen, ihre fachliche Sicherheit höher ein als der Durchschnitt. Wie bereits in Kapitel 6.3.7. erwähnt, ist vielen Lehrkräften aber die fachliche Problematik dieses Modells nicht bewusst. Vor diesem Hintergrund ist also davon auszugehen, dass ein Großteil der Befragten bei der Selbsteinschätzung nicht kritisch genug ist. Nur ein einziger Lehrer wies in der Begründung explizit darauf hin, dass ihm die fachlichen Mängel der Erklärung über den Schreibglobus durchaus bewusst sind, er ihn aber dennoch im Unterricht einsetzt.

Auch wenn es sich bei den Lehrern, die ausschließlich mit dem Schulbuch arbeiten, um eine relativ kleine Gruppe handelt (n=15), so enthält sie den größten Anteil an fachlich weniger sicheren (33 Prozent) und unsicheren (7 Prozent) Umfrageteilnehmern. Eine mögliche Erklärung dafür könnte in einer Vermeidungsstrategie zu finden

sein: Da in den meisten Schülerbüchern das Thema Corioliskraft sehr oberflächlich behandelt wird, halten diese Lehrkräfte durch den Verzicht auf den Einsatz weiterer Materialien die Behandlungstiefe dieses komplexen Themas möglichst gering. Ein ähnlicher Erklärungsansatz dürfte auf die Lehrer zutreffen, die Filme zur Visualisierung der Corioliskraft einsetzen. Auch in dieser deutlich größeren Gruppe fühlen sich die Befragten fachlich weniger sicher als der Durchschnitt (vgl. Hypothese 4).

6.3.9. Probleme bei der Vermittlung der Corioliskraft

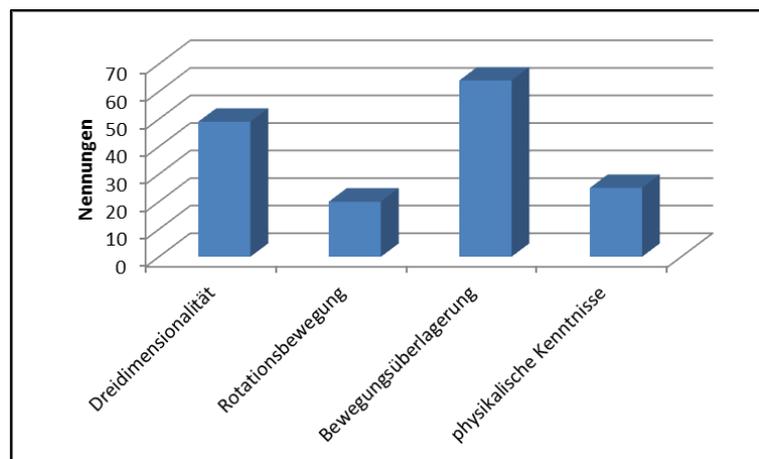


Abb. 75: Probleme bei der Vermittlung (Nennungen)

Obwohl in der Fragestellung nach den Problemen bei der Vermittlung der Corioliskraft bereits mögliche Aspekte genannt wurden, streuen die diesbezüglichen Antworten der Befragten doch sehr. Sie reichen von seltenen Hinweisen auf die „Unwichtigkeit der Vermittlung der Corioliskraft“ oder die „mangelnde Leistungsfähigkeit der Schüler“ über Anmerkungen zum „hohen Zeit- und Materialaufwand“ bis hin zu den häufig genannten Problemfeldern, die in Abb. 75 dargestellt sind. Von den drei bereits in der Fragestellung aufgeführten Aspekten („Dreidimensionalität“, „Rotationsbewegung“, „Bewegungsüberlagerung“) erreicht die Bewegungsüberlagerung mit 64 Nennungen den größten Wert. Erstaunlich sind aber bei der Angabe von Problemen vor allen Dingen die 25 Nennungen einer „mangelnden physikalischen Grundkenntnis“, da dieser Aspekt in der Fragestellung nicht vorgegeben war (vgl. Hypothese 5).

6.4. Zusammenfassung und Forderungen

Im Rahmen dieser Untersuchung hat sich gezeigt, dass von vielen Lehrern die Corioliskraft als eine Art Black-Box wahrgenommen und im Unterricht dementsprechend

oberflächlich behandelt wird. Eine unterrichtliche Befassung mit diesem Thema ist allerdings zur Erklärung von Windsystemen, der planetarischen Zirkulation und sämtlichen klimabasierten Folgeerscheinungen zwingend erforderlich. Obwohl die Corioliskraft – wenn auch in unterschiedlicher Ausprägung – von einer deutlichen Anzahl von Lehren bundesweit aufgegriffen wird, sollte, im Sinne eines tieferen Verständnisses, ausgehend von der zum großen Teil verifizierten **Hypothese 1**¹⁴⁵ das Thema Corioliskraft in den Bildungsvorgaben der einzelnen Länder explizit aufgeführt werden.

Dabei zeigen die Umfrageergebnisse, dass die Lehrkräfte bei der Umsetzung eine Vielzahl unterschiedlicher Materialien und Methoden nutzen. Häufig kommen zu diesem Zweck aber, wie in **Hypothese 2**¹⁴⁶ vermutet und durch die Umfrage bestätigt, vor allen Dingen stark vereinfachte Modelle, wie beispielsweise der Schreibglobus zum Einsatz. Hierbei sind sich die unterrichtenden Lehrkräfte aber nicht immer der Grenzen der Modelle bewusst, so dass häufig bei der didaktischen Reduktion die Schwelle der fachlichen Korrektheit unterschritten wird. Wissenschaftlich korrekte und aufwendige Experimente finden, wie in **Hypothese 3**¹⁴⁷ formuliert, nur selten Einfluss in den Unterricht.

In diesem Zusammenhang drängt sich die Frage nach der fachlichen Kompetenz der unterrichtenden Lehrkräfte auf, die im Rahmen dieser Umfrage über eine Selbsteinschätzung erfasst wurde. Entgegen der ursprünglich aufgestellten **Hypothese 4**¹⁴⁸ ließen sich aber keine signifikanten Unterschiede einzelner Lehrergruppen feststellen.

Zusammenfassend sahen die befragten Geographielehrer die Hauptprobleme der unterrichtlichen Umsetzung der Corioliskraft in den physikalischen Vorkenntnissen der Schüler und den in **Hypothese 5**¹⁴⁹ vermuteten Gründen.

¹⁴⁵ Hypothese 1: Die Corioliskraft wird verstärkt in den Bundesländern unterrichtet, in denen sie durch die Bildungsvorgaben verpflichtend vorgeschrieben ist. In den anderen Bundesländern spielt das Thema eine untergeordnete Rolle.

¹⁴⁶ Hypothese 2: Zur unterrichtlichen Umsetzung werden häufig stark vereinfachte Modelle eingesetzt, die fachliche und systematische Mängel aufweisen.

¹⁴⁷ Hypothese 3: Wissenschaftlich korrekte und aufwendige Experimente werden nur selten durchgeführt.

¹⁴⁸ Hypothese 4: Die fachliche Sicherheit der Lehrkraft wirkt sich signifikant auf die Behandlungstiefe aus. Diese ist bei Lehrern mit Mathematik oder einer Naturwissenschaft als Zweitfach deutlich erhöht.

¹⁴⁹ Hypothese 5: Die Hauptprobleme bei der unterrichtlichen Umsetzung sind die Dreidimensionalität, die Rotationsbewegung und die Überlagerung verschiedener Geschwindigkeiten.

Berücksichtigt man nun noch die Ansprüche, die an didaktisch reduzierten Unterricht gestellt werden, ergeben sich für eine sinnvolle unterrichtliche Umsetzung der Corioliskraft die folgenden **Kernforderungen**:

1. Fachliche Korrektheit
2. Nachvollziehbare Darstellung der Bewegungsüberlagerung
3. Berücksichtigung der teilweise noch fehlenden physikalischen Vorkenntnisse der Schüler
4. Beachtung der Dreidimensionalität des Systems
5. Verständliche Darstellung der Rotationsbewegung
6. Vertretbarer materieller und zeitlicher Aufwand.

7. Visualisierung der Kernforderungen am Beispiel geeigneter Modelle



Abb. 76: Visualisierung der Kernforderungen

Die Bewertung und Erfüllung der in Kapitel 6.4. dargestellten Kernforderungen lassen sich sehr anschaulich mit Hilfe eines Netzdiagramms darstellen. Dabei steht jede Achse für eine einzelne Forderung der unterrichtlichen Umsetzbarkeit. Im Gegensatz zur üblichen Darstellung liegen zur besseren Lesbarkeit und zur Vermeidung von Überdeckungen die schlechtesten Werte auf dem innersten Kreis und nicht im Schnittpunkt der Achsen. Die optimalen Werte finden sich auf dem äußersten Kreis (vgl. Abb. 76). Je besser nun ein Modell bewertet wird, desto größer ist die aufgespannte Fläche. Dabei ist zu beachten, dass die Erfüllung der Forderungen nicht direkt quantifizierbar ist. Es handelt sich bei der Klassifizierung vielmehr um eine kriteriengestützte, subjektive Einstufung, bei der für jede Forderung die verschiedenen Umsetzungsmöglichkeiten vergleichend bewertet wurden und bei der die gleichen objektiven Fehler zu einer identischen Abwertung geführt haben. Ein ähnliches Ver-

fahren wird beispielsweise in der Medizin eingesetzt, um das subjektive Schmerzempfinden zu messen und in eine Magnituden-Skalierung zu überführen.¹⁵⁰

Im Folgenden wird die Umsetzung der Kriterien am jeweiligen Beispiel erläutert und daraus die Klassifizierung abgeleitet.

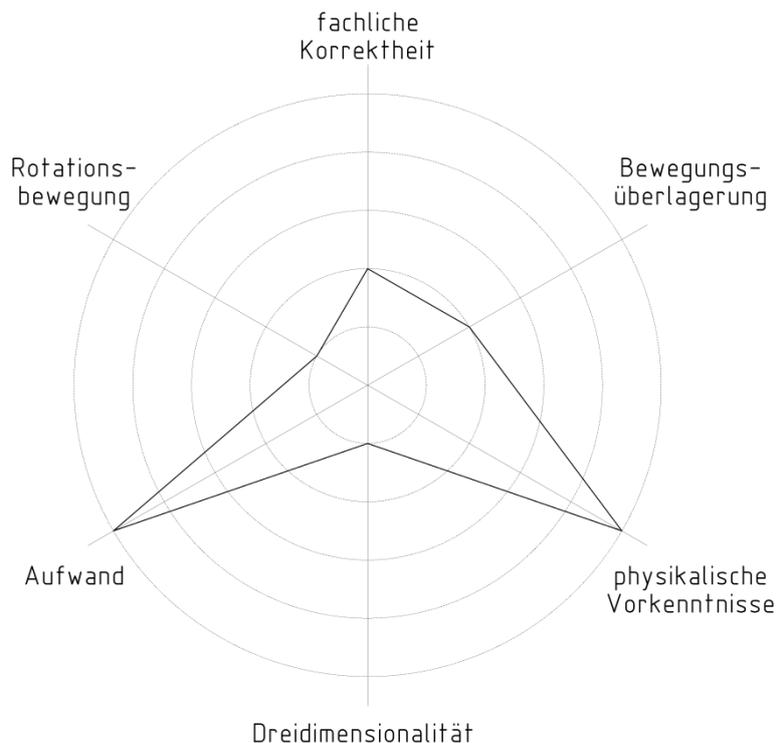


Abb. 77: Visualisierung der Kernforderungen am Beispiel des gezogenen Blatts

Wie man am Netzdiagramm des „Modells des gezogenen Blatts“ sehen kann (vgl. Abb. 77 sowie Kap. 5.1.1.), werden die Kernforderungen nach geringen physikalischen Vorkenntnissen und einem niedrigen Aufwand vollständig erfüllt. Dennoch ist die aufgespannte Fläche sehr klein, da bei der Umsetzung des Modells die Rotationsbewegung und die Dreidimensionalität überhaupt nicht berücksichtigt werden. Auch bei der fachlichen Korrektheit und der Bewegungsüberlagerung schneidet diese Umsetzung nur schlecht ab, da lediglich geradlinige und äquatorwärts gerichtete Winde betrachtet werden können.

¹⁵⁰ Schnell, R. u.a. (2005), S. 207.

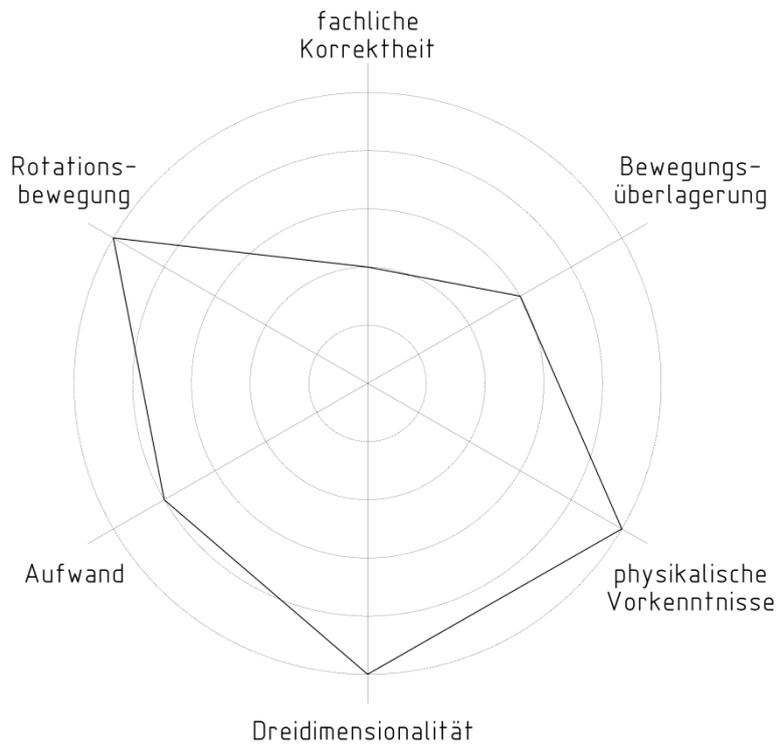


Abb. 78: Visualisierung der Kernforderungen am Beispiel des Schreibglobus

Dagegen sind beim häufig eingesetzten Modell des „Schreibglobus“ die Stärken und Schwächen fast ausgeglichen (vgl. Abb. 78 sowie 5.1.3.). Vor allen Dingen die Forderungen nach der vollständigen Berücksichtigung der Rotationsbewegung und der Dreidimensionalität sowie die nicht erforderlichen physikalischen Vorkenntnisse können als nahezu ideal eingestuft werden. Diese guten Werte werden aber durch einen Mangel an fachlicher Korrektheit und große Defizite bei der Darstellung von polwärts gerichteten Bewegungen erkaufte. Breitenkreisparallele Winde lassen sich mit diesem Modell ebenfalls nicht korrekt visualisieren, so dass es zu einer Abwertung beim Kriterium Bewegungsüberlagerung kommt.

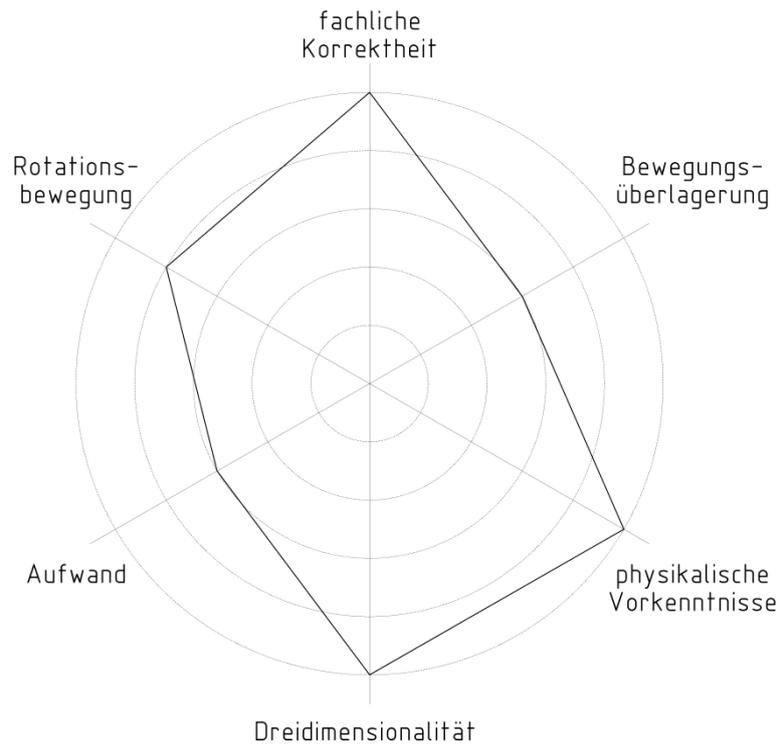


Abb. 79: Visualisierung der Kernforderungen am Beispiel des stummen Globus mit Wassertropfen

Im Vergleich zum Schreibglobus zeigen sich bei der Betrachtung des Netzdiagramms des Modells „Stummer Globus mit Wassertropfen“ (vgl. Abb. 79 sowie Kap. 5.1.4.) deutliche Abweichungen: Diese Umsetzung gewinnt vor allen Dingen im Bereich der fachlichen Korrektheit, da hier sowohl äquatorwärts als auch polwärts gerichtete Bewegungen (jeweils nur in Richtung des Südpols) dargestellt werden können. Als Konsequenz muss aber ein höherer Aufwand getrieben werden. Als weiteres Defizit ist zu nennen, dass die Drehgeschwindigkeit relativ hoch sein muss, was sich letztendlich negativ auf die Beobachtbarkeit der Rotationsbewegung auswirkt.

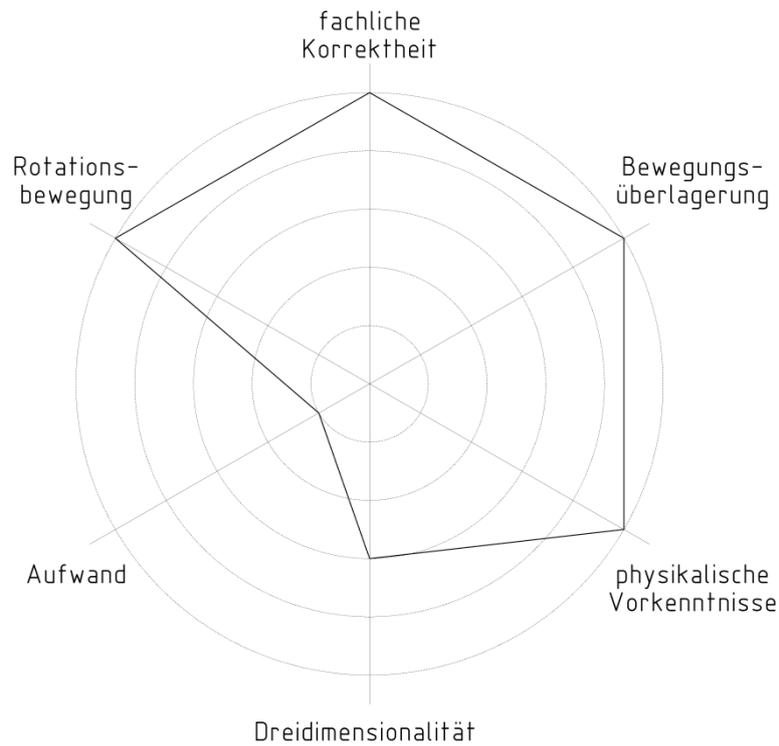


Abb. 80: Visualisierung der Kernforderungen am Beispiel des rotierenden Kegelstumpfs

Wie sich dem Netzdiagramm zum „rotierenden Kegelstumpf“ (Abb. 80 sowie Kap. 5.1.5.) entnehmen lässt, werden hier immerhin vier Forderungen optimal erfüllt. Dem gegenüber steht aber ein extrem hoher Aufwand beim Bau der Konstruktion und der Durchführung des Modell-Experiments. Außerdem ist durch die Tatsache, dass der Versuch nicht auf einer Halbkugel, sondern auf einem Kegelstumpf-Mantel durchgeführt wird, die Räumlichkeit des Phänomens nicht vollständig berücksichtigt.

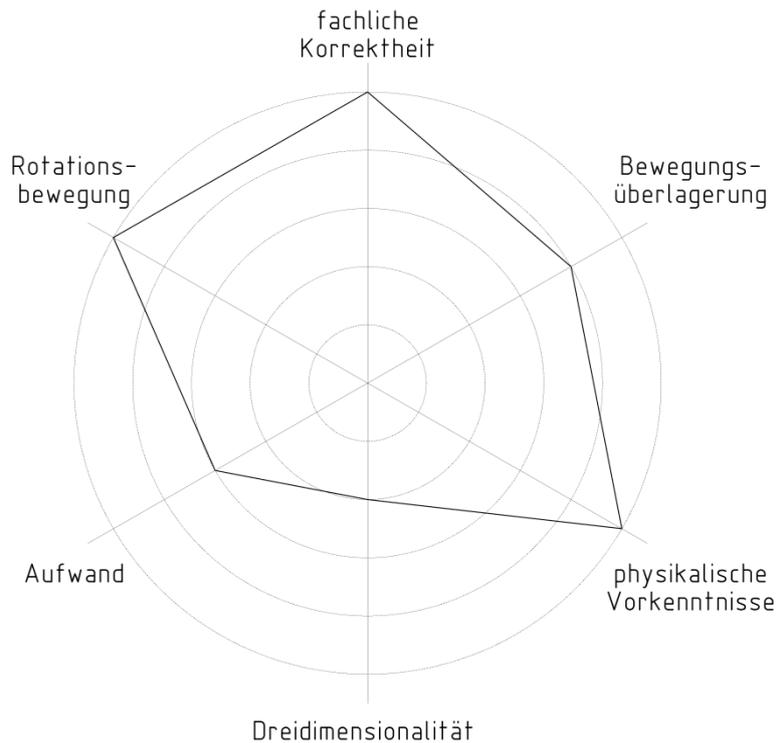


Abb. 81: Visualisierung der Kernforderungen am Beispiel von Modell-Experimenten auf rotierenden Scheiben (nach Muckenfuß)

Das Netzdiagramm für „Modelle und Modell-Experimente auf rotierenden Scheiben“ (vgl. Abb. 81 sowie Kap. 5.1.6.) zeigt, dass auch für diese Umsetzung keine physikalischen Vorkenntnisse notwendig sind. Ebenso gut bewertet sind die fachliche Korrektheit und die Berücksichtigung der Rotationsbewegung. Da Muckenfuß¹⁵¹ bei seiner Umsetzung unter anderem auf eine Auslösevorrichtung der Kugel verzichtet, hält sich der Aufwand noch in Grenzen. Dadurch ist es aber nicht möglich, die Kugel mit einer definierten Geschwindigkeit und Richtung zu starten, so dass die Bewegungsüberlagerung nicht optimal beobachtet werden kann. Letztendlich erreicht das Modell bei der Forderung nach der vollständigen Berücksichtigung der Dreidimensionalität seinen schlechtesten Wert, da der Transfer von der dreidimensionalen Erde auf die zweidimensionale Scheibe nicht nachvollzogen wird.

¹⁵¹ vgl. Muckenfuß (1997), S. 20.

8. Ein möglicher Lösungsansatz

Wie in Kapitel 7 anhand der Netzdiagramme gezeigt wurde, weisen alle vorgestellten Modelle in einzelnen Bereichen deutliche Mängel auf. Für eine didaktisch sinnvolle Aufbereitung bietet es sich also an, die Vorteile verschiedener Umsetzungen zu kombinieren, ohne dabei ihre Nachteile zu übernehmen. Im optimalen Fall würden dabei neben den bereits bekannten **Kernforderungen**

- fachliche Korrektheit,
- nachvollziehbare Darstellung der Bewegungsüberlagerung,
- Berücksichtigung der teilweise noch fehlenden physikalischen Vorkenntnisse der Schüler,
- Beachtung der Dreidimensionalität des Systems,
- verständliche Darstellung der Rotationsbewegung und
- vertretbarer materieller und zeitlicher Aufwand

die folgenden **Zusatzforderungen** in das Modell einfließen:

- Reproduzierbarkeit und damit Stärkung des Experimentcharakters
- größtmögliche Schüleraktivität
- Lernvorgang auf mehreren Wahrnehmungsebenen und damit das von Pestalozzi geforderte Lernen mit allen Sinnen.

Wie in Kapitel 5.4. erwähnt, ergibt sich eine bereits sehr gute Umsetzung aus der Kombination der beiden in Kapitel 5.1.6. vorgestellten „Modelle und Modell-Experimente auf rotierenden Scheiben“, bei denen die Bewegung eines Luftpakets durch eine Kugel simuliert wird, die über eine rotierende Scheibe rollt (Diehl u.a., 2008 und Muckenfuß, 1997). In ihrer Kombination erfüllen die vorgestellten Modelle bereits eine Vielzahl der Kern- und Zusatzforderungen. Dennoch weisen sie aber noch einige Schwächen auf. Die größten Probleme stellen dabei

- die Transformation von der Dreidimensionalität in die Zweidimensionalität und wieder zurück¹⁵²,
- der große materielle und zeitliche Aufwand,
- die unflexible bzw. ungenaue Richtungsvorgabe der Ausgangsbewegung der Kugel bzw. der Luftmassen und

¹⁵² Dies trifft bei allen Modellen zur Corioliskraft, die in der Ebene umgesetzt sind zu.

- die teilweise nur eingeschränkte Reproduzierbarkeit und der damit nur bedingt vorhandene Experimentcharakter

dar. Im Folgenden werden nun diese Schwachstellen aufgegriffen und potentielle Lösungswege aufgezeigt, so dass letztendlich ein optimiertes, modular aufgebautes Unterrichtskonzept entsteht.

8.1. Übergang der Dreidimensionalität in die Zweidimensionalität

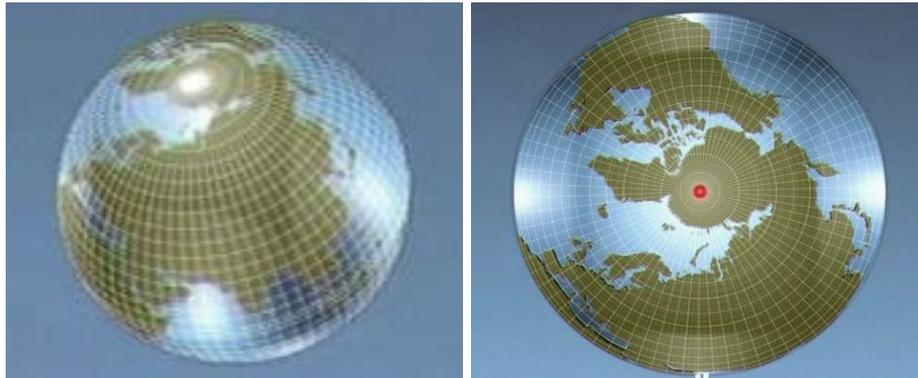


Abb. 82: Transformation einer dreidimensionalen Darstellung der Erde in die Zweidimensionalität (Knoll, Schumann, 2003, entnommen aus Video)

Das Problem des Übergangs von der dreidimensionalen Erdkugel in die Zweidimensionalität wurde, wie beispielsweise bei der Darstellung von „Modellen und Modell-Experimenten auf drehbaren Scheiben“ (vgl. Kap. 5.1.6.) schon erwähnt, bislang vollständig vernachlässigt. Eine denkbare Lösung bietet zum Beispiel der Film „Die Kraft, die keine ist - Gaspard de Coriolis und die Ablenkung der Massen“¹⁵³ (vgl. Kap. 5.3.4.1.). Hier wird in einer kurzen Videoanimation zunächst die Erde aus einer Kameraposition oberhalb des nördlichen Polarkreises gezeigt (vgl. Abb. 82, links) und dann mit einem Schwenk auf eine Position direkt über dem Nordpol gewechselt (vgl. Abb. 82, rechts). Dabei kommt es scheinbar zur Auflösung der Dreidimensionalität, so dass die Erde nun als Scheibe wahrgenommen werden kann. Dieser Sachverhalt lässt sich jedoch nicht didaktisch verifizieren. Letztendlich muss diese Transformation als Illusion bezeichnet werden, da es sich de facto bereits bei der ersten Darstellung nur um ein scheinbar dreidimensionales Bild auf einem zweidimensionalen Monitor oder einer Leinwand handelt.

¹⁵³ Knoll, Schumann (2003).

Anhand dieses Beispiels und dem Fehlen dieser Transformation in den Ausführungen verschiedener Autoren, wie z.B. Muckenfuß (1997) und Diehl u.a. (2008), lässt sich eindrucksvoll erkennen, dass das Problem der Dreidimensionalität bisher entweder nicht ernst genommen oder noch keine zufriedenstellende Lösung dafür gefunden wurde.



Abb. 83: Transformation von der dreidimensionalen Erde auf eine zweidimensionale Darstellung mit Hilfe einer Kugellampe aus Papier (Erde als Kugel)

Mit Hilfe einer handelsüblichen Kugellampe aus Papier¹⁵⁴ lässt sich aber diese Transformation mit nur geringem Aufwand leicht, schnell und eindrucksvoll im Unterricht nachvollziehen. Dazu wird den Schülern zunächst die **aufgespannte Kugellampe** gezeigt (vgl. Abb. 83), so dass Parallelen zum „Globus der Erde“ gezogen werden können.

¹⁵⁴ Diese Kugellampen sind in diversen Möbelhäusern und Baumärkten erhältlich, die Verkaufsbezeichnungen unterscheiden sich dabei. Teilweise werden sie als „Japan-Kugel“ bezeichnet.

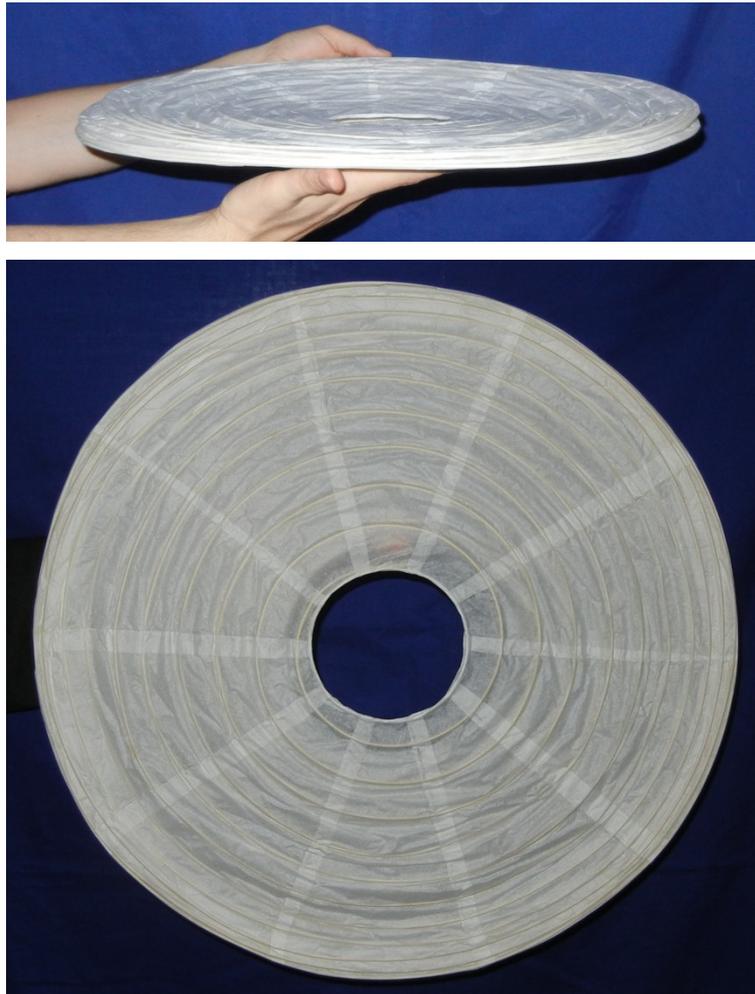


Abb. 84: Transformation von der dreidimensionalen Erde auf eine zweidimensionale Darstellung mit Hilfe einer Kugellampe aus Papier (Erde als Scheibe)

In einem **zweiten Schritt** wird die Kugel nun flachgedrückt (vgl. Abb. 84, oben) und abschließend die entstandene **Scheibe** so ausgerichtet, dass der Blick der Schüler auf den „Nordpol“ gerichtet ist (vgl. Abb. 84, unten). Kartografisch ausgedrückt handelt es sich bei dieser Darstellung um eine polständige orthographische Azimutalprojektion¹⁵⁵ der Nordhalbkugel. Diese Art der Darstellung ist zwar weder flächen- noch winkeltreu, dafür wird die Erde aber so dargestellt, wie sie aus einem weit entfernten Raumschiff zu beobachten wäre.

¹⁵⁵ vgl. Wilhelmy, Hüttermann, Schröder (1990), S. 51.



Abb. 85: Beschriftung der einzelnen Breitenkreise

Obwohl diese Transformation bereits sehr anschaulich ist, zeigt sich in der Unterrichtspraxis, dass einzelne Schüler dennoch Probleme mit der Verortung haben. Aus diesem Grund können auf der aufgespannten Kugellampe markante **Breitenkreise**, wie beispielsweise der Äquator oder der Polarkreis, **beschriftet** oder mit kleinen Fähnchen markiert werden. Dadurch ist es möglich, die so sichtbar gemachten Linien auch im zusammengeklappten Zustand zur **Visualisierung** einzelner Breitenkreise heranzuziehen (vgl. Abb. 85).

Gerade für höhere Klassen bietet es sich in diesem Zusammenhang an, auf die Verzerrungen der Projektion, eines der großen Themen der Kartographie, einzugehen. Während auf der Kugeloberfläche die Abstände der sichtbaren Linien (Breitenkreise) gleich groß sind, werden beim Zusammenklappen der Kugellampe die Abstände äquatorwärts immer geringer. Der Fehler, der sich durch die Spiralform der stabilisierenden Leiste ergibt, ist vernachlässigbar.

8.2. Optimierung der Modelle und Modell-Experimente auf der Drehscheibe

Um Experimentierkompetenz¹⁵⁶ bei gleichzeitig verstärkter Schüleraktivität während des Unterrichts zu erreichen, sollten die Versuche zur Corioliskraft in Form eines Schülerpraktikums durchgeführt werden. Betrachtet man nun wieder die beiden bereits beschriebenen Modelle auf rotierenden Scheiben (vgl. Kap. 5.1.6.), so wird deutlich, dass auf Grund des materiellen Aufwands, des großen Platzbedarfs und des aufwendigen Versuchsaufbaus mit diesen Umsetzungsvorschlägen ein typisches Schülerpraktikum nur schwer möglich ist. Es gilt nun also die Versuche von Muckenfuß und Diehl unter Berücksichtigung der genannten Punkte so weit zu optimieren,

¹⁵⁶ vgl. Leitgedanken zum Kompetenzerwerb für Naturwissenschaften. In: Ministerium für Kultus, Jugend und Sport Baden-Württemberg (2004), S. 173.

dass sie problemlos in Schülerhand gelegt werden können. Dazu sind drei Schritte nötig:

In einem **ersten Schritt** ist für den unterrichtlichen Einsatz zunächst das zentrale Element dieser Versuchsanordnung, die drehbare Scheibe, sowohl technisch als auch didaktisch zu optimieren. Nahezu ideal geeignet sind dafür vorkonfektionierte **Drehplatten**¹⁵⁷, wie sie in verschiedenen Kauf- und Möbelhäusern erhältlich sind. Diese müssen allerdings eine ausreichend gute Drehfähigkeit aufweisen, so dass sie - einmal angestoßen - den Schülern genügend Zeit für die Durchführung des Versuchs lassen. Gleichzeitig kann bei leichter Drehbarkeit ihre **Rotationsgeschwindigkeit** über einige Sekunden als annähernd **konstant** betrachtet werden. Als weiterer Vorteil dieser Platten für das Praktikum ist – neben dem günstigen Preis – festzuhalten, dass keinerlei Montage oder Justierung nötig ist, die Platten somit direkt auf die Schülertische gestellt werden können und damit sofort einsatzbereit sind.



Abb. 86: Rampe mit Auslösevorrichtung

Im **zweiten Schritt** gilt es nun, die **Auslösevorrichtung der Kugel** zu optimieren. Diese ist bei Diehl (vgl. Kap. 5.1.6., Abb. 34) sehr aufwendig aber dennoch unflexibel

¹⁵⁷ z.B. Drehplatte SNUDDA von IKEA (Preis: ca. 5 Euro).

umgesetzt, während bei Muckenfuß (vgl. Kap. 5.1.6., Abb. 31), durch die extrem einfache Konstruktion, sowohl die Bewegungsrichtung als auch die Geschwindigkeit der Kugel nur sehr ungenau vorgegeben werden kann. Eine einfache aber durchaus flexible Lösung stellt die Verwendung der in Abb. 86 dargestellten Rampe dar, die aus einem Holzkeil und einer aufgeklebten Hohlkehlleiste besteht. Zur anfänglichen Fixierung der Kugel befindet sich in dieser Leiste eine kleine Bohrung, in die ein kurzer Draht (z.B. eine aufgebogene Büroklammer) gesteckt ist. Um die Kugel nun auszulösen, muss lediglich der Draht herausgezogen werden, der zur besseren Handhabung an einer kurzen Schnur befestigt wurde. Mit dieser einfachen Konstruktion wird gewährleistet, dass die Kugel mit einer standardisierten Anfangsgeschwindigkeit und einer definierten Richtung auf der Platte startet. Im Gegensatz zur Umsetzung von Diehl kann die Startrampe an jeden beliebigen Punkt der Platte gesetzt und somit nahezu jede denkbare Bewegungsrichtung (z.B. äquatorwärts, polwärts, breitenkreisparallel) dargestellt werden.

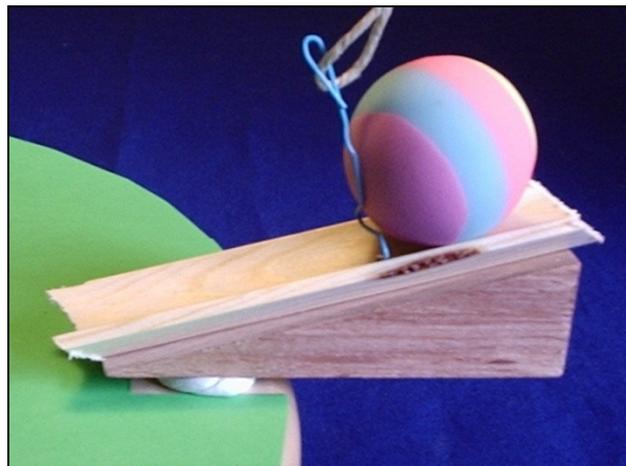


Abb. 87: Befestigung der Auslösevorrichtung am „Äquator“

Bei den polwärts gerichteten Bewegungen empfiehlt es sich, wie in Abb. 87 dargestellt, die Vorderkante der Rampe mit Klebeknete auf dem Rand der Platte zu befestigen, so dass der beobachtbare Weg vom Äquator zum Pol möglichst lang ist (vgl. auch Abb. 88).

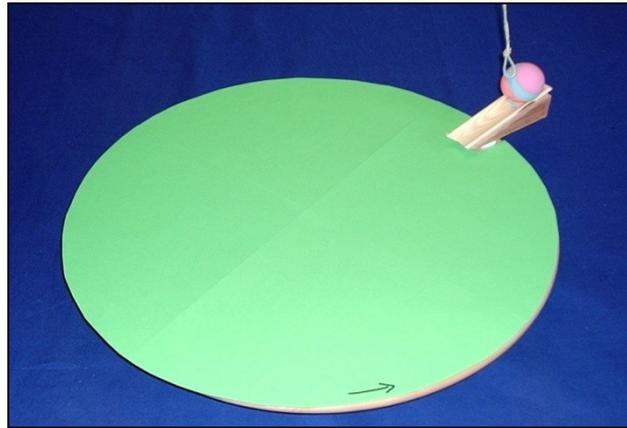


Abb. 88: Modell mit Papier zur Dokumentation der Bewegung

In einem **dritten Schritt** wird durch die **Dokumentation der Kugelbewegung** der Experimentcharakter des Modells weiter verdeutlicht. Um dies zu erreichen legt man auf die Drehplatte einen zugeschnittenen Bogen Papier (vgl. Abb. 88). Wird nun die Kugel vorher in Wasser oder Farbe eingetaucht, so lässt sich ihr Weg anhand der Spur exakt nachvollziehen. Dabei hat das Wasser gegenüber der Farbe den Vorteil, dass das Blatt sehr schnell wieder trocknet und von den Schülern nur wirklich gelungene Versuchsergebnisse durch Abzeichnen der Kugelbahn als Ergebnis dokumentiert werden.

Durch die hier beschriebenen Optimierungsmöglichkeiten der Modelle und Modell-Experimente auf rotierenden Scheiben ist es nun möglich, die durch die Corioliskraft beeinflussten Vorgänge auch im Schülerpraktikum in anschaulicher Visualisierung umzusetzen. Auf Grund der geringen Materialkosten von lediglich ca. 6,50 Euro pro Modell kann dieser Versuch auch innerhalb einer Gesamtklasse durchschnittlicher Größe arbeitsgleich in kleinen Gruppen (2-3 Personen) durchgeführt werden. Ein möglicher Ablauf der Versuchsdurchführung ist auf dem Arbeitsblatt (vgl. Abb. 89) dargestellt. Somit sind neben den Kernforderungen (fachliche Korrektheit, nachvollziehbare Darstellung der Bewegungsüberlagerung, Berücksichtigung der teilweise noch fehlenden physikalischen Vorkenntnisse der Schüler, Beachtung der Dreidimensionalität des Systems, verständliche Darstellung der Rotationsbewegung, vertretbarer materieller und zeitlicher Aufwand) auch die in Kapitel 8 formulierten Zusatzforderungen nach hoher Schüleraktivität, einem Lernvorgang auf mehreren Wahrnehmungsebenen und der qualitativen Reproduzierbarkeit in hohem Maße erfüllt.

Zu diesem Schluss kommt auch Moschny (2009) die sich in ihrer Examensarbeit mit der unterrichtlichen Umsetzung der Corioliskraft auseinandergesetzt und in diesem Rahmen auch das hier vorgestellte optimierte Modell getestet hat. Sie merkt an, dass die Schüler bei dieser Umsetzung ohne nennenswerte „Demonstration oder Steuerung durch die Lehrkraft [...] eigene Erfahrungen mit dem Modell“¹⁵⁸ sammeln und somit die Ablenkung durch die Corioliskraft beobachten können. Diese Erkenntnisse wurden auch von etlichen Kollegen bestätigt, die das hier vorgestellte optimierte Modell in ihrem Unterricht erprobt haben.

¹⁵⁸ Moschny (2009), S. 63.

Modell-Experiment zur Corioliskraft (ca. 10 Minuten)

Für diesen Versuch benötigt ihr:

- 1 drehbare Platte
- 1 Rampe
- 1 Ball

- 1 Auslösevorrichtung
- 1 zugeschnittenes Blatt Papier
- Klebknete, Wasser, Bleistift

Anleitung:

Vorbereitung:

1. Baut das Modell so auf, wie es auf Abb. 1 zu sehen ist. Das Ende der Rampe sollte sich dabei in der Mitte der Scheibe (am Pol) befinden.

Durchführung:

2. Zieht bei **nicht drehender Platte** mit Hilfe der Schnur die Auslösevorrichtung aus der Verankerung (siehe Abb. 2). Was ist zu beobachten?
3. Versetzt die **Scheibe in Drehung**. Die Drehrichtung sollte der Erdrotation (bei Blick auf den Nordpol) entsprechen. Löst die Kugel wieder aus. Wie verändert sich die Bahn der Kugel? Wiederholt diesen Versuch mehrfach.
4. Verändert die Versuchsanordnung, wie auf Abb. 3 zu sehen ist (Rampe nahe des Äquators). Klebt dabei die Rampe mit der Klebknete in die Aussparung (fest andrücken! Vgl. Abb. 2). Versetzt nun die Scheibe wieder in Drehung und löst die Kugel mehrfach aus. Wie verändert sich nun die Bahn der Kugel?

Sicherung:

5. Taucht die Kugel ins Wasser und führt die Versuche (Aufgabe 3 und 4) jeweils noch einmal durch. Zeichnet dabei die Spur der Kugel mit einem Bleistift nach.
6. Kennzeichnet in eurem Beobachtungsbogen die Lage von Pol und Äquator.
7. Übertragt nun eure Erkenntnisse in euer Heft und fasst zum Schluss eure Beobachtungen in Worte.

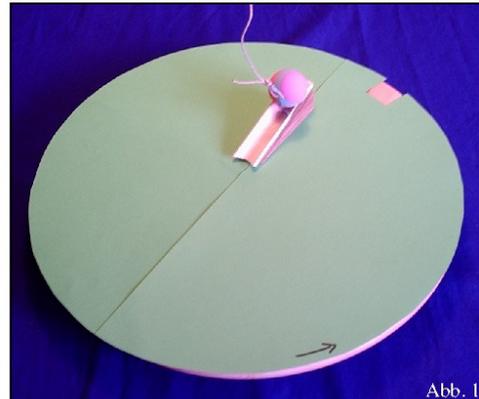


Abb. 1

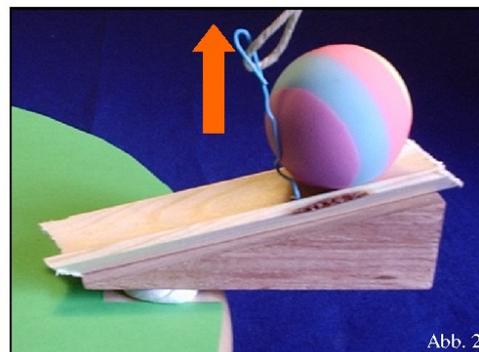


Abb. 2

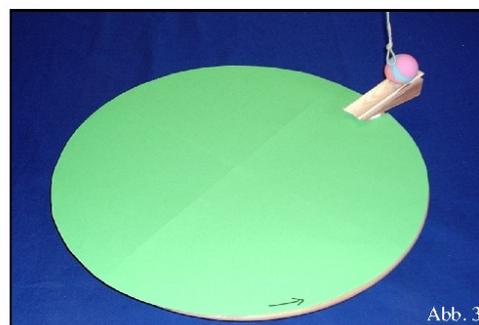


Abb. 3

8.3. Retransformation in den dreidimensionalen Raum



Abb. 90: Kugellampe mit meridional, polwärts gerichteter Luftströmung

Die von den Schülern mit Hilfe des optimierten Modell-Experiments auf der Drehplatte gewonnenen Erkenntnisse beziehen sich zunächst einmal lediglich auf den zweidimensionalen Raum. Um diese **Ergebnisse** wieder auf **räumliche Verhältnisse** zu **übertragen** und damit die häufig in der Umfrage genannte Problematik der **Dreidimensionalität** aufzugreifen, bietet es sich an, noch einmal die in Kapitel 8.1. vorgestellte Kugellampe einzusetzen. Dafür wird – auf der noch eingeebneten Lampe – zunächst eine mögliche Windrichtung ohne Berücksichtigung der Corioliskraft eingezeichnet, wie es Abb. 90 exemplarisch für eine meridionale, polwärts gerichtete Luftströmung zeigt.



Abb. 91: Kugellampe mit abgelenkter Luftströmung

Nach der Durchführung des Schülerpraktikums (vgl. Abb. 89) kann die im Versuch ermittelte Ablenkung qualitativ auf der nach wie vor eingeebneten Kugellampe aufgetragen werden (vgl. Abb. 91).

Möchte man exakter arbeiten, so lässt sich die auf dem Papier nachgezeichnete Bahnkurve auch direkt auf die Kugellampe durchpausen. Bei diesem Transfer ist allerdings zu beachten, dass auf der rotierenden Scheibe nur die durch die Corioliskraft verursachte Ablenkung dargestellt wird und die in der Atmosphäre wirkende Gradientkraft nicht berücksichtigt werden kann. In der Realität setzen sich die Luftteilchen auf Grund von Druckunterschieden und der daraus resultierenden Gradientkraft vom Hoch zum Tief in Bewegung. Nun kommt es dabei durch die Corioliskraft zu einer Ablenkung, die aber maximal zu einer isobarenparallelen Bewegung führt (vgl. Kap. 5.2.3., Abb. 44), da sich sonst die Luftteilchen entgegen der Gradientkraft (wieder zurück zum Hoch) bewegen würden. Im Gegensatz dazu wirkt, wie bereits erwähnt, auf der rotierenden Platte keine Gradientkraft, so dass die Schüler im Extremfall auch vollständige Kreise beobachten und aufzeichnen, was in der realen Atmosphäre teilweise eine Bewegung entgegen der Gradientkraft bedeuten würde.

Diese Grenze des Modells lässt sich bei der zeichnerischen Übertragung der experimentell ermittelten Bahnkurve auf die eingeebnete Kugellampe relativ leicht kompensieren: Der Lehrer muss lediglich darauf hinweisen, dass die Kurve nur so weit nach-

gezeichnet werden darf, bis die Gesamtablenkung von der ursprünglichen Richtung einen Wert von maximal 90° erreicht. Auf diese Weise kann nun auch – zumindest im Endergebnis – neben der Corioliskraft die Gradientkraft berücksichtigt werden.

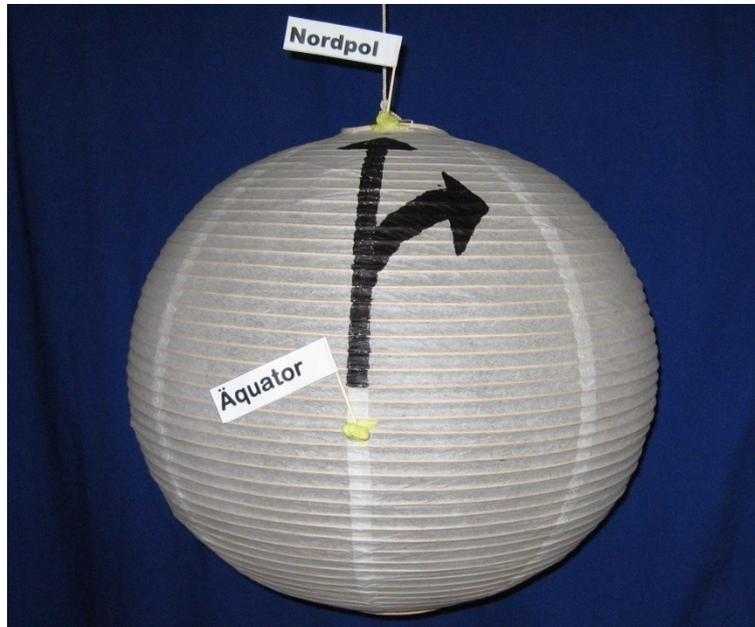


Abb. 92: Übertragung der Rechtsablenkung in die Dreidimensionalität

Im nächsten Schritt wird die Kugellampe wieder aufgespannt. Die Schüler können nun deutlich erkennen, dass es auch in der **Dreidimensionalität** auf der Nordhalbkugel zu einer Rechtsablenkung kommt¹⁵⁹ (vgl. Abb. 92). Damit kann das bislang ungelöste Problem des Transfers von der Dreidimensionalität in die Zweidimensionalität und wieder zurück als gelöst angesehen werden.

In dem neu entwickelten und hier ausführlich dargestellten Modell-Experiment ist es also gelungen, die Vorteile der beiden bereits guten Modelle von Diehl u.a. (2008) und Muckenfuß (1997) zu kombinieren, die vorhandenen Schwächen durch gezielte Verbesserungen zu kompensieren und die Anschaulichkeit weiter zu verbessern. Dies bestätigt wiederum Moschny, die im Rahmen ihrer Untersuchung diese Umsetzung als den „inhaltlich und didaktisch gelungenste[n] Ansatz“¹⁶⁰ zur Vermittlung der Corioliskraft im Geographieunterricht bezeichnet.

¹⁵⁹ Analog zu Kapitel 8.1. kann hier nochmals auf die durch die Projektion entstandenen Verzerrungen hingewiesen werden.

¹⁶⁰ Moschny (2009), S. 71.

8.4. Erweiterungsmöglichkeiten

Im Unterrichtsalltag ergibt sich häufig durch die meist geringe Wochenstundenzahl und das umfangreiche Curriculum ein nicht zu vernachlässigender Zeitdruck. Aus diesem Grund war ein Ziel dieser Arbeit, die Vermittlung der Corioliskraft in zeitlich vertretbarem Aufwand mit einem Umfang von nicht mehr als einer Unterrichtsstunde (45 Minuten) durchzuführen. Vor diesem Hintergrund stellt die oben beschriebene Umsetzung einen optimalen Kompromiss aus Behandlungstiefe, Schüleraktivität und Vermittlung von Überblickswissen dar.

Steht aber mehr Unterrichtszeit zur Verfügung oder soll ein unterrichtlicher Schwerpunkt auf dem Thema Windsysteme liegen, wie es beispielsweise ein Schulcurriculum vorgeben könnte, so lässt sich das vorhandene Modell-Experiment noch deutlich erweitern. Diese Möglichkeiten bestehen beispielsweise im 4-5stündigen Leistungskurs bzw. Neigungsfach, in Baden-Württemberg zusätzlich auch im Fach NWT (= Naturwissenschaft und Technik), das dort im Schuljahr 2007/2008 landesweit eingeführt wurde. In diesem Fach werden „die in den Basisfächern Biologie, Chemie, Physik und den Geowissenschaften erworbenen Kenntnisse vertieft und naturwissenschaftliche Denk- und Arbeitsweisen vermittelt.“¹⁶¹ Dabei fordern die Bildungsstandards unter anderem, dass die Schüler „mit zunehmender Selbstständigkeit Experimente planen, durchführen, auswerten [und] protokollieren“¹⁶² können. In Bayern könnte eine solche Vertiefung innerhalb der so genannten P-Seminare (= Projektseminar zur Studien- und Berufsorientierung) stattfinden.

¹⁶¹ Konrad (o. J.).

¹⁶² Ministerium für Kultus, Jugend und Sport des Landes Baden-Württemberg (2004), S. 402.

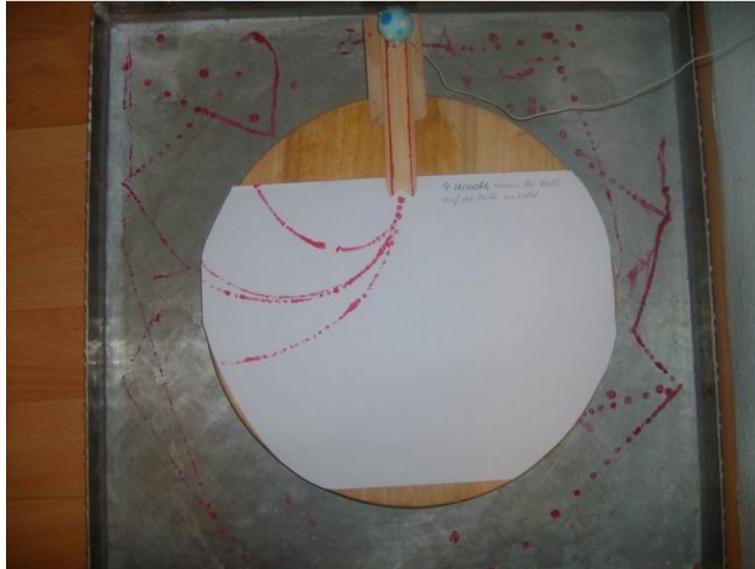


Abb. 93: Versuchsergebnisse Moschny (Moschny, 2009, S. 73)

Betrachtet man nun wieder das hier vorgestellte Modell-Experiment, so wird deutlich, dass es sich dabei formal nicht vollständig um ein Experiment im naturwissenschaftlichen Sinne handelt. Dies zeigen auch die Versuchsergebnisse Moschnys (vgl. Abb. 93), bei denen die Stärke der Ablenkung der Kugel in den einzelnen Versuchsdurchführungen erheblich variiert. In diesem Zusammenhang kritisiert sie die nicht vorhandene Reproduzierbarkeit, da „die Winkelgeschwindigkeit [...] und damit auch die Stärke der Coriolis-Ablenkung [...] bei jedem Durchgang unterschiedlich“¹⁶³ ist. Dieser Kritik ist unter der Voraussetzung zuzustimmen, dass man von einer quantitativen Reproduzierbarkeit spricht. Beschränkt man sich dagegen auf eine qualitative Betrachtung, die für den Unterricht in den meisten Fällen ausreichend ist, so lassen sich die Ergebnisse, z.B. die Rechtsablenkung auf der Nordhalbkugel, durchaus problemlos reproduzieren.

Um aber beim beschriebenen Modell-Experiment auch wirklich von einem Experiment im Sinne Lethmates (vgl. Kap. 5.1.) sprechen zu können, müssen neben der Reproduzierbarkeit und damit der Möglichkeit der Durchführung von Kontrollversuchen noch weitere Kriterien erfüllt sein. Diese sind:

1. „Beobachtung unter künstlich hergestellten Bedingungen;
2. Isolation der zu untersuchenden Variablen;

¹⁶³ Moschny (2009), S. 62.

3. Variation der zu untersuchenden Variablen.¹⁶⁴

Dabei kann das erste Kriterium bereits jetzt als erfüllt angesehen werden.

Zur Isolation und Variation der zu untersuchenden Variablen müssen alle anderen eingehenden Faktoren konstant gehalten werden. Im bisher vorliegenden Modell-Experiment sind die Kugelmasse und durch die Konstruktion der Rampe auch die Geschwindigkeit der Kugel fix vorgegeben. Lediglich die Rotationsgeschwindigkeit der Platte konnte bislang nicht konstant gehalten werden.

8.4.1. Rotationsgeschwindigkeit der Platte

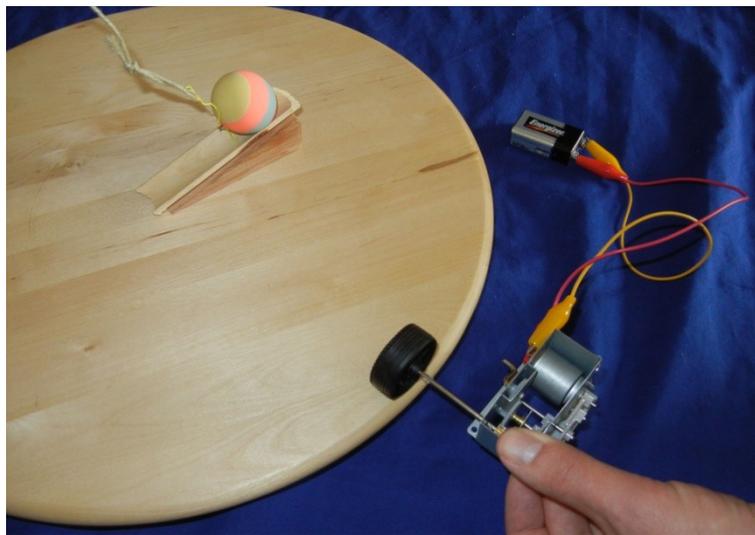


Abb. 94: Antrieb des Modell-Experiments mit einem Elektromotor¹⁶⁵

Im bisher vorgestellten Modell-Experiment wurde aus Gründen der leichteren Umsetzung und der Zeiteffizienz die Drehplatte von den Schülern von Hand beschleunigt. Dadurch war es nicht möglich, die Rotationsgeschwindigkeit bei wiederholter Versuchsdurchführung konstant zu halten und demnach die Ablenkung durch die Corioliskraft auch qualitativ zu reproduzieren. Dieser Mangel lässt sich sehr einfach mit Hilfe eines Elektromotors aus dem Modellbau, wie er in vielen Schulen in großer Stückzahl in den Technik- oder NwT-Sammlungen vorhanden ist, kompensieren (vgl. Abb. 94). Dabei kann das Antriebsrad im Gegensatz zu Abb. 94 von den Schülern

¹⁶⁴ Lethmate (2003), S. 42.

¹⁶⁵ Der dargestellte Motor kann z.B. unter www.traudl-riess.de für ca. 2 Euro bezogen werden.

auch von unten an die Platte gehalten werden, so dass die gesamte Oberfläche für die Versuchsdurchführung zur Verfügung steht.

Durch den Einsatz eines regelbaren Netzgeräts oder den Einbau eines Potentiometers ist es auch möglich, die Drehzahl des Motors und damit auch die Rotationsgeschwindigkeit zu variieren, so dass nun der Einfluss dieser Größe von den Schülern untersucht werden kann. Die Drehgeschwindigkeit kann beispielsweise mit einem Stroboskop, einem Drehzahlmesser (z.B. einem elektronischen Fahrradtacho) oder mit einem Videoanalyse-Programm (vgl. 8.4.4.) bestimmt werden.

Selbstverständlich lässt sich z.B. durch das Umpolen des Motors auch die Drehrichtung umkehren und somit die Situation auf der Südhalbkugel simulieren.

8.4.2. Teilchengeschwindigkeit

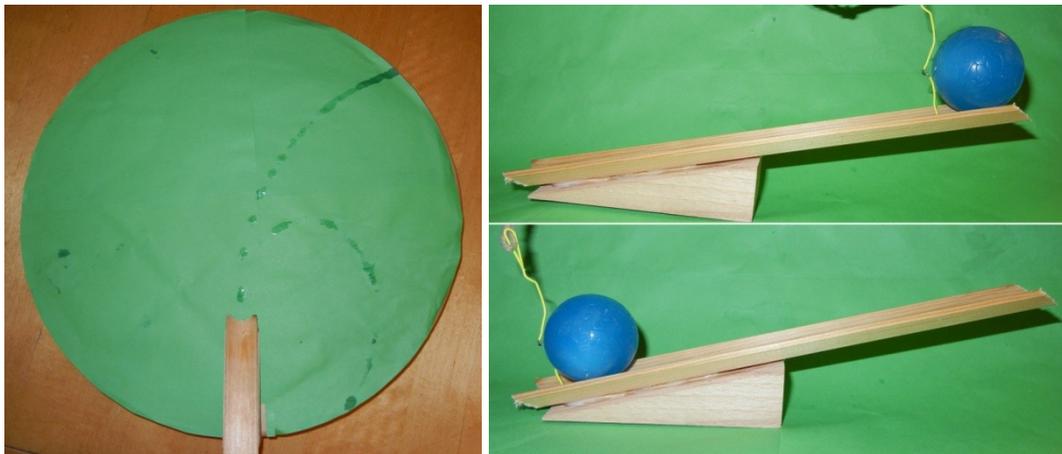


Abb. 95: Variation der Kugelgeschwindigkeit bei konstanter Rotationsgeschwindigkeit der Platte

Nach der in Kapitel 2.2. hergeleiteten Formel der Corioliskraft $F_C = 2 m \omega v \sin \varphi$ geht die Geschwindigkeit der betrachteten Luftteilchen linear in die Gleichung ein. Bisher wurde im Modell die Geschwindigkeit der Kugel aber durch den Einsatz derselben (allenfalls versetzten) Rampe bei jeder Versuchsdurchführung konstant gehalten. Möchte man nun die Abhängigkeit der Corioliskraft von der Teilchengeschwindigkeit untersuchen, so kann durch eine weitere Bohrung in der Hohlkehleiste die Anlaufstrecke der Kugel variiert werden (vgl. Abb. 95). Dabei ist zu beachten, dass der Zusammenhang zwischen der Starthöhe der Kugel und der resultierenden Geschwindigkeit nicht linear ist. Über den Energiesatz ergibt sich das folgende Verhältnis:

$$\frac{1}{2}mv^2 = mgh \quad (35)$$

Löst man diese Gleichung nun nach der Geschwindigkeit der Kugel v auf, so kürzt sich deren Masse m heraus und man erhält

$$v = \sqrt{2gh} \quad (36)$$

wobei h die Starthöhe der Kugel über der Platte und g den Ortsfaktor angibt. Beabsichtigt man demnach die Geschwindigkeit der Kugel zu halbieren, darf nur ein Viertel der Starthöhe bzw. der Anlaufstrecke verwendet werden.

8.4.3. Teilchenmasse

Wie die Geschwindigkeit geht auch die Masse eines Teilchens linear in die Formel der Corioliskraft $F_C = 2 m \omega v \sin \varphi$ ein. Durch die Verwendung ein und derselben Kugel wurde diese bislang konstant gehalten. Eine Variation ist zwar sehr einfach durch den Austausch der Kugel möglich, erfahrungsgemäß ist es aber schwierig, zwei Kugeln zu finden, deren Massen in einem einfachen, möglichst ganzzahligen Verhältnis stehen (z.B. 40 g und 20 g). Dennoch ist, neben einer qualitativen Betrachtung, theoretisch auch eine quantitative Betrachtung möglich. Dafür müssen die Massen der Kugeln lediglich über den Dreisatz ins passende Verhältnis gesetzt werden.

8.4.4. Videoanalyse



Abb. 96: Kamerapositionen

Eine Dokumentation der Versuche sollte Nachvollziehbarkeit und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse nachweisen können. Dies kann in qualitativer Form, wie bereits erwähnt, direkt über eine Wasser- oder Farbspur erfolgen. Alternativ können die Ver-

suchsabläufe aber auch per Video aufgezeichnet werden. Diese Videoaufnahmen bieten zusätzlich die Chance, sich als Beobachter in die verschiedenen Bezugssysteme (vgl. Kap. 2.2., Abb. 1) zu versetzen. Dabei lassen sich mit Hilfe von handelsüblichen Kamerastativen und Klebeknete oder dem in den naturwissenschaftlichen Sammlungen vorhandenen Stativmaterial verschiedene Kamerapositionen einnehmen und damit die folgenden Blickwinkel unterscheiden (vgl. Abb. 96):

1. Senkrechter Blick aus dem Inertialsystem auf die rotierende Scheibe (Betrachtung von außen).
2. Senkrechter Blick aus dem rotierenden System auf die Scheibe (Betrachtung von innen).
3. Horizontaler Blick aus dem rotierenden System in Bewegungsrichtung der Kugel (Betrachtung aus dem Blickwinkel eines Beobachters auf der Erdoberfläche).

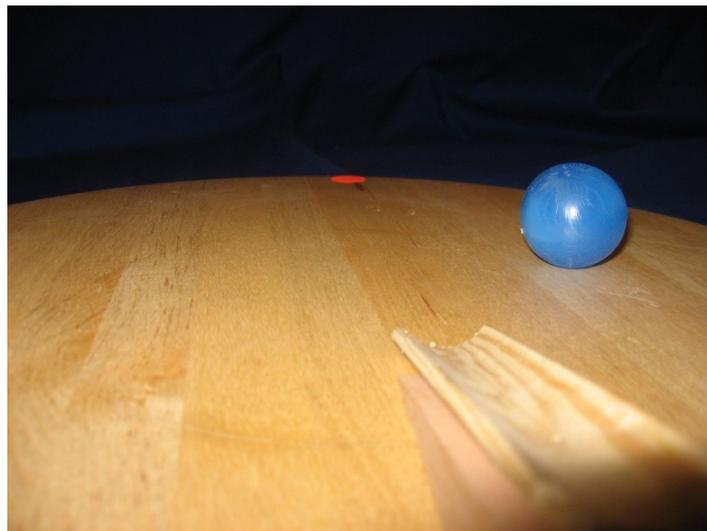


Abb. 97: Rechtsablenkung der Kugel aus Sicht einer Kamera im rotierenden System

Die erste Kameraposition entspricht dabei der gewohnten Perspektive des Experimentators. Erst mit der zweiten bzw. dritten Position versetzt man sich in das rotierende System und kann somit die Rechtsablenkung der Kugel als Folge der Scheinkraft optimal beobachten. Abb. 97 zeigt das Bild der Kamera im rotierenden System in Richtung der ursprünglichen Bewegung der Kugel. Bei ruhender Scheibe würde sich die Kugel direkt auf die rote Markierung zubewegen, tatsächlich ist sie aber durch die Corioliskraft nach rechts abgelenkt.

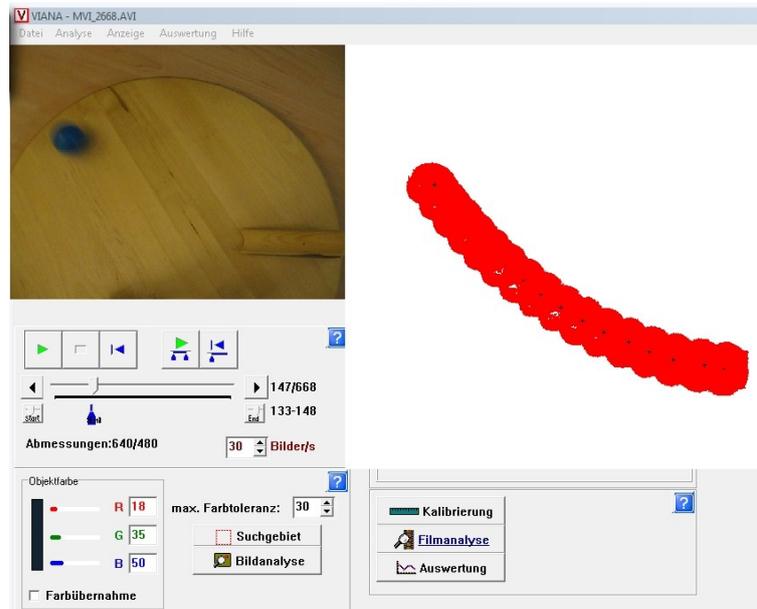


Abb. 98: Videoanalyse mit Viana (Screenshot)

Ein weiterer Vorteil der Videoaufnahmen ist, dass diese mit einer Software zur Videoanalyse wie beispielsweise dem kostenlosen und frei verfügbaren Programm Viana¹⁶⁶ der Universität Essen ausgewertet werden können und damit die Formel der Corioliskraft am konkreten Beispiel überprüft werden kann. Dazu schneidet man zunächst mit Hilfe dieser Software aus dem aufgezeichneten Video die entsprechende Sequenz heraus und kann sie damit sequentiell, Bild für Bild, betrachten. Mit den teilweise automatisierten Analysewerkzeugen ist es nun möglich, die Bewegung der Kugel exakt nachzuzeichnen (vgl. Abb. 98) und mathematisch zu analysieren. So lässt sich mit diesem Werkzeug unter anderem die Geschwindigkeit der Kugel und die der rotierenden Scheibe bestimmen.

Um letztendlich die Corioliskraft vollständig quantitativ fassen zu können, müssen nun die verschiedenen Größen der Formel ($F_C = 2 m \omega v \sin \varphi$) gemessen werden, wobei durch die horizontale Platte der Sinus von φ immer 1 ist und damit unberücksichtigt bleiben kann. Die weiteren Größen können folgendermaßen ermittelt werden:

1. Bestimmung der Masse der Kugel mit Hilfe einer Waage.
2. Bestimmung der Geschwindigkeit der Kugel bei zunächst ruhender Platte mit Hilfe von Viana. Wird die Auslösevorrichtung nicht verändert, so entspricht der

¹⁶⁶ <http://didaktik.physik.uni-essen.de/viana/>

ermittelte Wert auch der Eigengeschwindigkeit der Kugel bei rotierender Platte.

3. Videoaufzeichnung der Bewegung im rotierenden System (Kameraposition 2).
4. Bestimmung der Rotationsgeschwindigkeit¹⁶⁷ ω der Platte. Dies erfolgt mit Hilfe des Programms Viana, mit dem die Zeit für einen Umlauf der Platte T gemessen wird¹⁶⁸. Über die Formel $\omega = \frac{2\pi}{T}$ lässt sich nun die Rotationsgeschwindigkeit berechnen.
5. Analyse der Bewegung der Kugel im rotierenden System mit Hilfe von Viana.

Mit den ermittelten Werten kann der Betrag der Corioliskraft berechnet werden. Doch wie lässt sich nun überprüfen, ob dieser berechnete Betrag tatsächlich zu der im Experiment beobachteten Ablenkung passt?

Da sich die eingehenden Werte m , ω und v während der gesamten Versuchsdurchführung nicht ändern (die geringe Reibung kann vernachlässigt werden), ist zunächst festzuhalten, dass auch der Betrag der Corioliskraft konstant bleibt. Die Richtung der Corioliskraft steht dabei immer senkrecht auf dem Vektor der Geschwindigkeit, so dass sich letztendlich eine Kreisbahn ergibt.

Da nun die Corioliskraft F_C die für die Kreisbahn notwendige Zentripetalkraft F_Z aufbringt, ergibt sich für die Berechnung des Radius folgender Ansatz:

$$\begin{aligned} F_C &= F_Z & (36) \\ 2m\omega v \sin \varphi &= \frac{mv^2}{r} \\ 2\omega \sin \varphi &= \frac{v}{r} \\ r &= \frac{v}{2\omega \sin \varphi} \end{aligned}$$

Durch Einsetzen der oben bestimmten Werte, lässt sich nun der Radius r der gekrümmten Bahn berechnen. Dabei ist zu beachten, dass, wie bereits oben erwähnt, $\sin \varphi = 1$ ist und die Masse der Kugel m bei der Umformung bereits herausgekürzt wurde.

¹⁶⁷ Im Sinne einer besseren Lesbarkeit und Einheitlichkeit werden im Rahmen dieser Arbeit die Begriffe Rotationsgeschwindigkeit und der physikalisch korrekte Begriff Winkelgeschwindigkeit synonym verwendet.

¹⁶⁸ Hierfür bietet es sich an, eine farbige Markierung auf dem Experimentiertisch anzubringen, die dann leicht mit Viana erfasst werden kann.

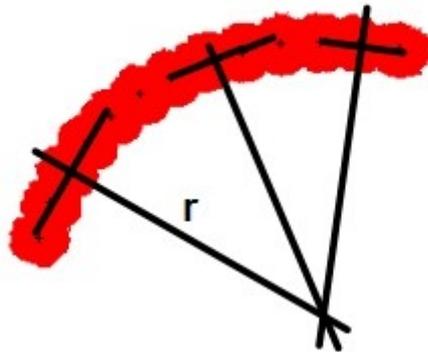


Abb. 99: Zeichnerische Bestimmung des Radius im Auswertungsbild von Viana

In einem letzten Schritt muss nun noch der Radius der tatsächlichen Bahn mit Hilfe der Videoaufzeichnung bestimmt werden. Dies lässt sich einerseits zeichnerisch lösen, wie es exemplarisch in Abb. 99 dargestellt ist. Dafür wird an mindestens drei ermittelten Punkten an der Kreisbahn eine Tangente und am jeweiligen Schnittpunkt eine Senkrechte gezeichnet. Die Geraden schneiden sich im optimalen Fall in einem Punkt, so dass der Radius leicht gemessen werden kann.

Andererseits kann der Radius auch rechnerisch bestimmt werden. Dafür lassen sich die von Viana in der Auswertung ermittelten Koordinaten der Kreisbahn nutzen, aus denen sich der Mittelpunkt und damit auch der Radius berechnen lässt. Da dies mathematisch relativ aufwendig, wenn auch nicht schwierig ist, kann diese Berechnung auch über ein Tabellenkalkulationsprogramm, eine spezielle Software oder ein Skript auf einer Internetseite¹⁶⁹ erfolgen.

In mehreren Versuchsdurchläufen haben sich nur geringe Abweichungen zwischen den berechneten und den ermittelten Werten ergeben, so dass – insbesondere in Hinblick auf den relativ einfachen Versuchsaufbau – von einer guten bis sehr guten Übereinstimmung zu sprechen ist.

8.5. Bewertung

Im Rahmen dieses Kapitels wurde eine didaktische Umsetzung für das Thema Corioliskraft entwickelt, die den Anspruch hat, alle Forderungen, die ausgehend von der

¹⁶⁹ Die Berechnung ist z.B. auch auf der Internetseite von A. Brünner problemlos möglich (<http://www.arndt-bruenner.de/mathe/scripts/kreis3p.htm>).

Umfrage in Kapitel 6 aufgestellt wurden, bestmöglich zu erfüllen. Doch ist dies nun auch gelungen?

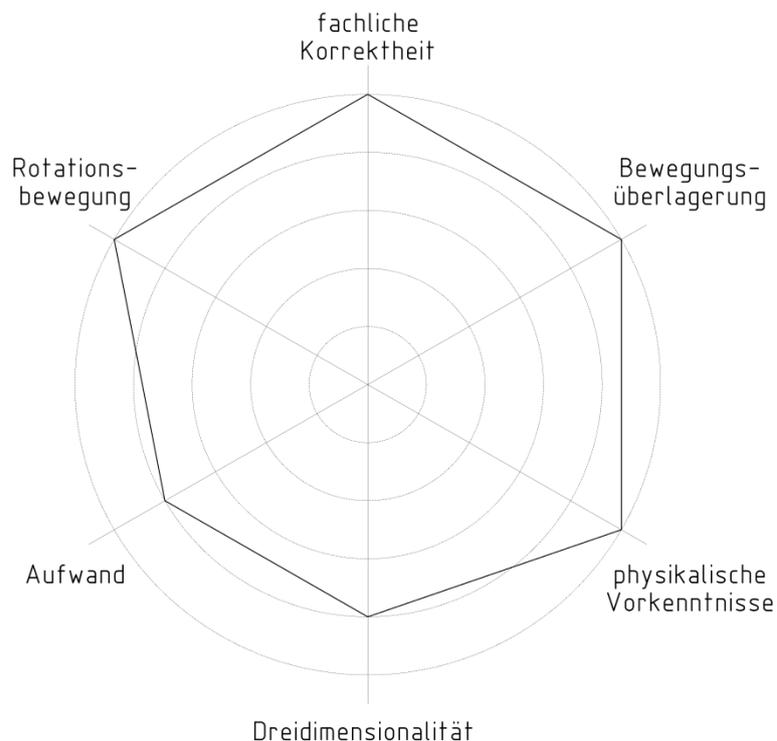


Abb. 100: Netzdiagramm zum möglichen Lösungsansatz

Betrachtet man zunächst das Netzdiagramm mit den Kernforderungen (vgl. Abb. 100), so fällt auf, dass das Modell keine wirklichen Schwachpunkte aufweist. Auch wenn die Umsetzung an vielen Stellen didaktisch deutlich reduziert erfolgt, so ergibt sich dennoch eine hohe **fachliche Korrektheit**. Die **Rotationsbewegung** ist für die Schüler nicht nur leicht nachvollziehbar und im Modell-Experiment kontrolliert veränderbar, sondern durch die Videoanalyse auch problemlos quantifizierbar. Ähnliches gilt für die **Überlagerung der Bewegungen**. Hier lässt sich einerseits die Kugelbewegung im ruhenden und im rotierenden System beobachten, andererseits aber auch ihre Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit so stark variieren, dass alle denkbaren Windrichtungen simuliert werden können. Entgegen den in der Umfrage häufig formulierten Befürchtungen sind bei der Beobachtung der Corioliskraft bzw. der durch sie hervorgerufenen Ablenkung keine speziellen **physikalischen Vorkenntnisse** erforderlich.

Da der Versuch nicht auf einer Kugeloberfläche stattfinden kann, müssen, wie auch im Netzdiagramm zu erkennen ist, geringe Abstriche im Bereich der **Dreidimensio-**

nalität gemacht werden. Diese können aber, durch die besonders anschauliche Transformation von der Dreidimensionalität in die Zweidimensionalität und wieder zurück, nahezu vollständig kompensiert werden (vgl. Kap. 8.1. und 8.3.). Dabei bleibt der zeitliche **Aufwand** – zumindest bei der Beschränkung auf das Basismodell – sehr gering. Der materielle Aufwand hält sich durch den Einsatz von preiswerten und größtenteils vorgefertigten Komponenten in Grenzen. Dies gilt auch für die vorgestellten Erweiterungen, die ausschließlich mit Material umgesetzt werden, das in den Sammlungen der Schulen vorhanden ist. Dennoch ist der materielle Aufwand im Vergleich zu einem Tafelbild oder einer einfachen zeichnerischen Lösung etwas erhöht, so dass es zu einer geringen Abwertung in dieser Kategorie kommen musste. Durch die Möglichkeit, den Versuch in kleinen Gruppen durchzuführen und die Vorgehensweise zu einem großen Teil in die Hand der Schüler zu legen, sind auch die beiden Zusatzforderungen nach **größtmöglicher Schüleraktivität** und einem **Lernvorgang auf mehreren Wahrnehmungsebenen** erfüllt. Die dritte Zusatzforderung nach der **Reproduzierbarkeit** und der damit verbundenen Stärkung des Experimentcharakters kann nur mit Hilfe der oben genannten Erweiterungen erfüllt und muss mit einem erhöhten Zeitbudget erkaufte werden. Gleichzeitig bietet sich aber durch die modular aufgebauten Erweiterungsmöglichkeiten die Chance der Binnendifferenzierung, so dass der Lernprozess an das jeweilige Leistungsniveau und das Lerntempo der Kleingruppen angepasst werden kann. Durch den geringen Materialbedarf, die ungefährliche Umsetzung und die flexiblen Ergänzungen bietet sich der vorgestellte Lösungsansatz auch als eigenständige Fach- oder Projektarbeit einzelner Schüler oder Schülergruppen an. Dabei eröffnet sich die Möglichkeit, den Schwerpunkt auf den geographischen, den physikalischen, den technischen oder den mathematischen Bereich zu legen.

9. Zusammenfassung und Fazit

Die im Rahmen der Umfrage mehrfach vorgefundene Aussage, das Thema Corioliskraft „könnte besser von einem Physiker vermittelt werden“, kann hinsichtlich ihrer Bedeutung für das Verständnis der aktuellen Klimaveränderungen aus Sicht der Geographie nur als unbefriedigend angesehen werden. Vielmehr wäre es gerade Aufgabe der Geographielehrer, eine Brücke von der rein physikalischen Erarbeitung des Phänomens über die realen klimatischen Effekte bis hin zur Betrachtung der gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und sozialen Auswirkungen zu schlagen und damit als interdisziplinäres Bindeglied zu dienen. Dafür ist es aber unerlässlich, dass die damit befassten Geographielehrer das Phänomen naturwissenschaftlich verstehen, seine Bedeutung im geographiedidaktischen Kanon realisieren und es letztendlich auch schülergerecht im Unterricht vermitteln können. Um dies zu erreichen müssen zwei wichtige Rahmenbedingungen erfüllt sein:

1. Die Bildungsvorgaben müssen das Thema verpflichtend vorschreiben und die Studentafeln den nötigen Raum für eine intensive Auseinandersetzung schaffen.
2. Es müssen praktikable und erprobte Umsetzungsvorschläge für einen altersadäquaten und modernen Unterricht verfügbar sein, im Rahmen derer die Schüler entsprechend ihrer individuellen Fähigkeiten und ihrem Leistungsniveau das Thema möglichst selbstständig erarbeiten können.

Wie in Kapitel 4 aufgezeigt, ist die erste Voraussetzung vor allen Dingen in den südlichen und südöstlichen Bundesländern erfüllt. In diesen bieten die Bildungsvorgaben viele Verknüpfungsmöglichkeiten zwischen den natur- und gesellschaftswissenschaftlichen Bereichen. Dies manifestiert sich auch darin, dass im Fach Geographie neben den anthropogeographischen Themen gerade auch die physisch-geographischen Anteile einen hohen Stellenwert einnehmen. Demzufolge setzen sich die Geographielehrer dort auch intensiver mit dem Thema Corioliskraft auseinander, was sich durch die Auswertung der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Umfrage belegen lässt (vgl. Kap. 6). Dies zeigt auch die aktuelle Bertelsmann-Studie¹⁷⁰ über die Lebens- und Lernbedingungen in Deutschland, in der „Bayern und

¹⁷⁰ vgl. Vogel (2012)

Baden-Württemberg, die Seriensieger in Bildungsvergleichen [...] insgesamt hervorragend ab[schneiden].¹⁷¹

Im Rahmen dieser Arbeit war zu zeigen, dass die zweite Bedingung, also die methodische Umsetzung der Thematik in praktikable und erprobte Unterrichtsvorschläge, ebenfalls erfüllt werden kann. Für diesen Schritt war zunächst die Bewertung vorhandener Umsetzungsvorschläge und Materialien nötig (vgl. Kap. 5). Neben einfachen, aber fachlich oft falschen oder lückenhaften Ansätzen, gab es teils hochkomplizierte und materialaufwendige Erklärungsversuche. Deren Vereinfachung und gegenseitige Kombination war ein Ziel, dessen Kosten-Nutzen-Verhältnis in Hinblick auf seine schulische Realisierung auszutesten war. Ein zweites Ziel basierte darauf, ein handhabbares Modell zu erstellen, das möglichst alle Kernforderungen erfüllt. Auch dieses wurde ausgetestet und hier vorgestellt. Es wurden also bestehende Erklärungshilfen auf Grundlage der ausformulierten Kernforderungen (vgl. Kap. 6) verbessert, zu reproduzierbaren Schülerexperimenten weiterentwickelt und letztendlich um eine ausgesprochen anschauliche Visualisierung der Dreidimensionalität ergänzt (vgl. Kap. 8).

Auf dieser Basis ist es nun möglich, ein so abstraktes und kompliziertes Thema wie die Corioliskraft ohne den Rückgriff auf vertiefte physikalische Grundlagen verständlich, schüleraktiv und auf unterschiedlichstem Anspruchsniveau zu unterrichten. Somit eröffnet dieser Ansatz neue Zugangswege, wenn es um die Klärung von Ursache und Wirkung sowie Maßnahmen und Gegenmaßnahmen bei der Inwertsetzung unserer Erde geht und ist damit im Sinne einer Bildung für nachhaltige Entwicklung ein wichtiger Orientierungspunkt. Dieser interdisziplinäre Ansatz stärkt wieder einmal die Geographie als einziges Fach im Fächerkanon, das als Beziehungswissenschaft Einzelerkenntnisse aus verschiedenen Fachdisziplinen in ihren gegenseitigen Wechselwirkungen sieht und gesamtheitlich bewertet. Es bietet sich also die Chance, den systemanalytischen Stellenwert der Geographie – zumindest im schulischen Bereich – als Bindeglied zwischen den gesellschafts- und naturwissenschaftlichen Fächern herauszustellen und entsprechend umzusetzen.

¹⁷¹ Popp u.a. (2011), S. 72.

10. Literatur- und Quellenverzeichnis

10.1. Sekundärliteratur

- Anton, M. A. (2008): Kompendium Chemiedidaktik. (Klinkhardt) Bad Heilbrunn.
- Bayrhuber, H., Bündler, W., Euler, M., Hansen, K.-H., Hassenpflug, W., Hildebrandt, K., Hlawatsch, S., Hoffmann, L., Lucius, E. R., Raffelsiefer, M., Siemer, F. (o. J.): Didaktische Analyse des Themas System Erde. Abrufbar unter: <http://systemerde.ipn.uni-kiel.de/poster/Analyse.pdf> (letzter Abruf: 10.02.2012).
- Blüthgen, J., Weischet, W. (1980): Allgemeine Klimageographie. (de Gruyter) Berlin [u.a.]. 3., neu bearb. Auflage.
- Bovet, G., Huwendiek, V. (Hrsg.) (2005): Leitfaden Schulpraxis. Pädagogik und Psychologie für den Lehrberuf. (Cornelsen) Berlin. 4., komplett überarb. Auflage.
- Bronstein, I. N., Semendjajew, K. A. (2008): Taschenbuch der Mathematik. (Deutsch) Frankfurt am Main. 7., überarb. und erg. Auflage.
- Brucker, A. (Hrsg.) (2009): Geographiedidaktik in Übersichten. (Aulis Verlag Deubner & Co) Köln.
- Budke, A. (2010): Und der Zukunft abgewandt. Ideologische Erziehung im Geographieunterricht der DDR. Univ., Magisterarbeit Potsdam, 2009. Eckert. Die Schriftenreihe 127. (V & R Unipress) Göttingen.
- Dankert, J. u. Dankert, H. (2006): Technische Mechanik. Statik, Festigkeitslehre, Kinematik, Kinetik ; mit 77 Tabellen sowie 390 Übungsaufgaben mit Lösungen und zahlreichen weiteren Aufgaben im Internet. (Teubner) Wiesbaden. 4., korr. und erg. Auflage.
- Department of Atmospheric Sciences (DAS) at the University of Illinois at Urbana-Champaign.: WW2010. the weather world 2010 project. Abrufbar unter: ww2010.atmos.uiuc.edu (letzter Abruf: 27.01.2012).
- Egger, J. (1999): Vom Tornado zum Ozonloch eine Einführung in Meteorologie und Klimaforschung. (Oldenbourg) München.
- Erdmann, M. (2011): Experimentalphysik. (Springer) Berlin, Heidelberg.
- Etling, D. (1996): Theoretische Meteorologie. Eine Einführung. (Vieweg) Braunschweig [u.a.].
- Falk, G., Ruppel, W. (1989): Mechanik, Relativität, Gravitation. Die Physik des Naturwissenschaftlers; ein Lehrbuch. (Springer) Berlin. 3., verb. Auflage.
- Forkel, M. (2008): Die allgemeine Zirkulation der Atmosphäre. Luftdruckgebiete, Coriolis-Kraft und Winde. Abrufbar unter: http://www.klima-der-erde.de/zirk_druck.html (letzter Abruf: 11.02.2012).
- Fraedrich, W. (1997): Lernkartei. Atmosphäre-Klima. In: geographie heute H. 147. S. 8–17.
- Gobrecht, H., Bergmann, L., Schaefer, C. (1975): Mechanik, Akustik, Wärme. Mit einem Anhang über die Weltraumfahrt. Lehrbuch der Experimentalphysik zum Gebrauch bei akademischen Vorlesungen und zum Selbststudium / von L. Bergmann und C. Schaefer ; Bd. 1. (de Gruyter) Berlin. 9., verb. Auflage.
- GvomStein: Coriolis-Beschleunigung. Bewegung vom Rand zum Zentrum. Abrufbar unter: http://www.geogebra.org/de/upload/files/dynamische_arbeitsblaetter/GvomStein/Physik/Mechanik/Coriolis_zumZentrum.html (letzter Abruf: 02.02.2012).
- GvomStein: Coriolis-Beschleunigung. Bewegung vom Zentrum zum Rand. Abrufbar unter: http://www.geogebra.org/de/upload/files/dynamische_arbeitsblaetter/GvomStein/Physik/Mechanik/Coriolis_zumRand.html (letzter Abruf: 02.02.2012).
- Häckel, H. (1990): Meteorologie. 25 Tabellen. (Ulmer) Stuttgart. 2., verb. Auflage.
- Haubrich, H. (Hrsg.) (2006): Geographie unterrichten lernen. Die neue Didaktik der Geographie konkret. (Oldenbourg) München. 2., erw. und vollst. überarb. Auflage.
- Hell, K. (2002): Experimente aus dem Küchenschrank. (Klett-Perthes) Gotha.
- Herrmann, F. (1990): Mechanik. Skriptum zur Vorlesung Physik I. Karlsruhe.
- Heyer, E. (1998): Witterung und Klima. Eine Einführung in die Meteorologie und Klimatologie. (Teubner) Stuttgart. 10., völlig neubearb. Auflage.

- Hlawatsch, S., Lücken, M., Hansen, K.-H., Fischer, M., Bayrhuber, H. (2005): Forschungsdialog: System Erde. Schlussbericht. Abrufbar unter: http://systemerde.ipn.uni-kiel.de/Schlussbericht20_12_05-EF.pdf (letzter Abruf: 11.02.2012).
- Höttecke, D. (Hrsg.) (2009): Chemie- und Physikdidaktik für die Lehramtsausbildung. Schwäbisch Gmünd [u.a.].
- Kaminske, V. (1993): Überlegungen und Untersuchungen zur Komplexität von Begriffen im Erdkundeunterricht. Eine Aufgabe besonderer Wichtigkeit für die Geographiedidaktik. (Univ., Lehrstuhl für Didaktik) München.
- Kauermann, G., Küchenhoff, H. (2011): Stichproben. Methoden und praktische Umsetzung mit R. Springer-Lehrbuch. (Springer) Berlin, Heidelberg.
- Kestler, F. (2002): Einführung in die Didaktik des Geographieunterrichts. (Klinkhardt) Bad Heilbrunn/Obb.
- Kittel, C., Knight, W. D., Ruderman, M. A., Helmholz, A. C. (1986): Mechanik. (Vieweg) Braunschweig, Wiesbaden. 4., durchges. Auflage.
- Klaus, D., Janßen, H. (1982): Flachsüsselmodell zur Simulation der atmosphärischen Zirkulation im Erdkundeunterricht. In: Geographie und Schule H. 16. S. 36–40.
- Knapp, D. (1990): Wetterkunde für Piloten. (Motorbuch-Verlag) Stuttgart.
- Knoll, J., von Schumann, U. (2003): Die Kraft, die keine ist - Gaspard de Coriolis und die Ablenkung der Massen.
- Köck, H., Birkenhauer, J. (Hrsg.) (1986): Grundlagen des Geographieunterrichts. (Aulis Verlag Deubner & Co) Köln.
- Köck, H., Stonjek, D. (2005): ABC der Geographiedidaktik. (Aulis Verlag Deubner & Co) Köln.
- Kohfahl, H. (1994): Die Windablenkung auf der Nordhalbkugel durch den Einfluss der Corioliskraft. Ein anschauliches Modell für den Unterricht. In: Praxis Geographie H. 2. S. 44–45.
- Konrad, A.: Naturwissenschaft und Technik an allgemeinbildenden Gymnasien in Baden-Württemberg. Abrufbar unter: <http://www.nwt-bw.de> (letzter Abruf: 11.02.2012).
- Krapp, M., Nebel, J. (2011): Methoden der Statistik. Lehr- und Arbeitsbuch. (Vieweg+Teubner) Wiesbaden.
- Kraus, H. (2001): Die Atmosphäre der Erde. Eine Einführung in die Meteorologie. (Springer) Berlin [u.a.]. 2. Auflage.
- Lauer, W., Bendix, J. (2004): Klimatologie. (Westermann) Braunschweig. 2. neubearb. Auflage.
- Lesch, H. (2005): alpha-Centauri: Was ist die Coriolis-Kraft? (br-alpha) (letzter Abruf: 18.09.2011).
- Lethmate, J. (2003): Sind "geographische Experimente" Experimente? In: Praxis Geographie H. 3. S. 42–43.
- Lethmate, J. (2005): Geomethoden. Kritische Anmerkungen zum fachdidaktischen Verständnis geographischer Arbeitsweisen. In: Geoöko XXVI. S. 251–282.
- Lethmate, J. (2006): Experimentelle Lehrformen und Scientific Literacy. In: Praxis Geographie H. 11. S. 4–11.
- Liljequist, G. H., Cehak, K. (1984): Allgemeine Meteorologie. Mit 24 Tab. (Vieweg) Braunschweig [u.a.]. 3., überarb. und erw. Auflage.
- Merten, R. (2011): Zusammenarbeit in der Bildungspolitik. Kleine Anfrage der Abgeordneten Hitzing (FDP). Abrufbar unter: <http://www.franka-hitzing.de/programm/anfragen-a-antraege/189-zusammenarbeit-in-der-bildungspolitik.html> (letzter Abruf: 11.02.2012).
- Metzler Physik (2006): (Schroedel) Hannover. 3. Auflage.
- Meyer, C. (2006): Vielfältige Unterrichtsmethoden sachgerecht anwenden. In: Haubrich, H.: Geographie unterrichten lernen: Die neue Didaktik der Geographie konkret. (Oldenbourg) München. S. 107–172.
- Meyer, H. (2010): Unterrichtsmethoden. (Cornelsen Scriptor) Berlin. 13. Auflage.
- Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2011): Das Schulwesen in Nordrhein-Westfalen aus quantitativer Sicht 2010/2011. Statistische Übersicht 373. 2. Auflage.

- Moschny, M. (2009): Die „Coriolis-Kraft“. Eine fachdidaktische Erarbeitung für den Geographieunterricht. Examensarbeit für das Lehramt an Gymnasien und Gesamtschulen. Münster.
- Muckenfuß, H. (1997): Experimentieren in der Wetterkunde. In: Naturwissenschaften im Unterricht / Physik 8 H. 6. S. 13–21.
- Müller, R. (2010): Klassische Mechanik. Vom Weitsprung zum Marsflug. (de Gruyter) Berlin [u.a.]. 2., überarb. und erw. Auflage.
- Nagy, B.: Die Ablenkung der Winde. Zwei Schülerversuche. In: Praxis Geographie 1999. H. 11. S. 42–43.
- Obermann, H. (1999): Wetter - ein zentrales Thema im Unterricht. Wind weht um die Kurve. In: Praxis Geographie H. 4. S. 21.
- Piaget, J., Inhelder, B. (1999): Die Entwicklung des räumlichen Denkens beim Kinde. (Klett-Cotta) Stuttgart. 3. Auflage.
- Pohl, R., Lüders K. (2004): Pohls Einführung in die Physik. (Springer) Berlin [u.a.]. 19., neu bearb. und mit Kommentaren versehene Auflage.
- Popp, M., Reinhard, U., Verbeet, M. (2011): Das geteilte Land. In: Der Spiegel H. 47. S. 70–78.
- Prenzel, M., Artelt, C., Baumert, J., Blum, W., Hammann, M., Klieme, E., Pekrun, R. (2008): PISA 2006 in Deutschland. Die Kompetenzen der Jugendlichen im dritten Ländervergleich. Zusammenfassung. Abrufbar unter: http://www.pisa.ipn.uni-kiel.de/Zusfsg_PISA2006_national.pdf (letzter Abruf: 11.02.2012).
- Rinschede, G. (2007): Geographiedidaktik. (Schöningh) Paderborn. 3., völlig neu bearb. und erw. Auflage.
- Salzmann, W. (o. J.): Wissenstexte: Physik-Wissen. Corioliskraft. Abrufbar unter: <http://www.physik.wissenstexte.de/coriolis.htm> (letzter Abruf: 11.02.2012).
- Schallhorn, E. (2004): Erdkunde-Didaktik. Praxishandbuch für die Sekundarstufe I und II. (Cornelsen) Berlin.
- Schmidtke, K.-D. (1994): Geographieunterricht - nicht so eng gesehen. Schulgeographie in der Praxis 10. (Aulis Verlag Deubner & Co) Köln. 3. Auflage.
- Schmidtke, K.-D. (1995): Fünf-Minuten-Experimente für den Geographieunterricht. Schulgeographie in der Praxis 11. (Aulis Verlag Deubner & Co) Köln.
- Schnell, R., Esser, E., Hill, P. B. (2005): Methoden der empirischen Sozialforschung. (Oldenbourg) München [u.a.]. 7. Auflage.
- Schnirch, M. (o. J.): Lernmodul " Bezugssysteme und die Corioliskraft". Abrufbar unter: www.webgeo.de/klimatologie (letzter Abruf: 11.02.2012).
- Schnirch, M. (2004): Lernmodul "Einfache Experimente zur Corioliskraft". Abrufbar unter: www.webgeo.de/klimatologie (letzter Abruf: 11.02.2012).
- Siegler, R. S. (2001): Das Denken von Kindern. (Oldenbourg) München [u.a.]. 3. Auflage.
- Siegler, R. S., DeLoache, J. S., Eisenberg, N. (2005): Entwicklungspsychologie im Kindes- und Jugendalter. (Elsevier, Spektrum, Akad. Verlag) München, Heidelberg.
- Stober, M. (2006): Globale Windsysteme und Corioliskraft. Ein Unterrichtsentwurf zur Herleitung komplexer Zusammenhänge mithilfe einfacher Funktionsmodelle. In: Praxis Geographie H. 11. S. 23–27.
- Strahl, A., Mohr, M., Schleusner, U., Müller, R. (2009): Beurteilung von Formeln durch Schüler - eine Fragebogen-Untersuchung. In: Höttecke, D.: Chemie- und Physikdidaktik für die Lehramtsausbildung. Schwäbisch Gmünd [u.a.]. S. 170–172.
- Swiss Science Center Technorama: Demonstration: Coriolis-Karussell. Abrufbar unter: <http://www.technorama.ch> (letzter Abruf: 27.01.2012).
- Turgas, H.-J.: Operatoren. Abrufbar unter: <http://www.schule-bw.de/unterricht/faecher/geschichte/operators/> (letzter Abruf: 07.09.2011).
- Urbana-Champaign, Department of Atmospheric Sciences at the University of Illinois. In: the weather world 2010 project. Abrufbar unter: <http://ww2010.atmos.uiuc.edu> (letzter Abruf: 11.02.2012).
- Vogel, D. H. (2012): Deutscher Lernatlas. Abrufbar unter: <http://www.deutscher-lernatlas.de> (letzter Abruf: 11.02.2012).
- Voß, W. (2003): Taschenbuch der Statistik. (Carl Hanser Fachbuchverlag) Leipzig [u.a.].

- Warnecke, G. (1997): Meteorologie und Umwelt. Eine Einführung. (Springer) Berlin [u.a.]. 2., überarb. und aktual. Auflage.
- Weischet, W. (1977): Einführung in die allgemeine Klimatologie. Physikalische und meteorologische Grundlagen. (B.G. Teubner) Stuttgart.
- Weltner, K. (1987): Mathematik für Physiker. Basiswissen für das Grundstudium der Experimentalphysik. Band 1. (Vieweg) Braunschweig. 8., verb. Auflage.
- Weltner, K. (1988): Mathematik für Physiker. Basiswissen für das Grundstudium der Experimentalphysik. Band 2. (Vieweg) Braunschweig. 8., verb. Auflage.
- Wilhelmy, H., Hüttermann, A., Schröder, P. (1990): Kartographie in Stichworten. (Hirt) Unterägeri. 5. Auflage.
- Wolf, K. R. (1952/1953): Modellversuch zur Rechtsablenkung von Luftbewegungen auf der Erdoberfläche. In: Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht. S. 241–242.

10.2. Zitierte Schulbücher

- Amtsfeld, P., Englert, W., Gehrke, A., Hebel, A., Mager, F.-P., Schmidt, M., Werb, I., Wetzel, J. (2006): Seydlitz - Geographie 3. (Schroedel) Braunschweig.
- Bauer, J., Englert, W., Meier, U., Morgeneyer, F., Waldeck, W. (2001): Physische Geographie. Rote Reihe. (Schroedel) Hannover.
- Diehl, B., Erb, R., Heise, H., Kotthaus, U., Lindner, K., Schlichting, H.-J., Schmalhofer, C., Schön, L.-H., Schröder, K. G., Schulze, H., Schulze, P. M., Tews, W., Tillmanns, P. C., Winter, R. (2008): Physik - Oberstufe. (Cornelsen) Berlin.
- Falk, G. C., Huber, M., Lehmann, D., Schneider, T. (2002): Fundamente - Kursthemen. (Klett-Perthes) Gotha, Stuttgart.
- Falk, G., Scholliers, M. (2010): Terra. Physische Geographie. (Klett) Stuttgart, Leipzig.
- Flath, M., Fischer, P. (Hrsg.) (2010): Unsere Erde. (Cornelsen) Berlin.
- Latz, W. (Hrsg.) (2011): Diercke Geographie. (Westermann) Braunschweig. 6. Auflage.
- Obermann, H. (Hrsg.) (2007): Terra - GWG, Geographie, Wirtschaft 5/6. (Klett-Schulbuchverlag) Stuttgart, Leipzig.

10.3. Bildungspläne

- Bayerisches Staatsministerium für Unterricht und Kultus (2009): Lehrpläne Gymnasium G8. München.
- Bildungsserver Rheinland Pfalz: Lehrplan Gemeinschaftskunde in den Jahrgangsstufen 11 bis 13 der gymnasialen Oberstufe. Leistungsfach mit Schwerpunkt Erdkunde. Abrufbar unter: <http://erdkunde.bildung-rp.de/> (letzter Abruf: 11.02.2012).
- Deutsche Gesellschaft für Geographie e.V. (2010): Bildungsstandards im Fach Geographie für den Mittleren Schulabschluss – mit Aufgabenbeispielen –. Bonn.
- Freie Hansestadt Bremen: Senatorin für Bildung und Wissenschaft (2008): Geographie. Bildungsplan für die Gymnasiale Oberstufe. Qualifikationsphase. Bremen.
- Freie und Hansestadt Hamburg: Behörde für Bildung (2004): Rahmenplan Geographie. Bildungsplan achtstufiges Gymnasium. Sekundarstufe I. Hamburg.
- Freie und Hansestadt Hamburg: Behörde für Bildung und Sport (2009): Rahmenplan Geographie. Bildungsplan gymnasiale Oberstufe. Hamburg.
- Hessisches Kultusministerium (2010): Lehrplan Erdkunde. Gymnasialer Bildungsgang Jahrgangsstufen 5G bis 8G und gymnasiale Oberstufe.
- Kultusministerium des Landes Sachsen-Anhalt (2003): Rahmenrichtlinien Gymnasium (angepasste Fassung gemäß Achtem Gesetz zur Änderung des Schulgesetzes des Landes Sachsen-Anhalt vom 27.2.2003). Geographie Schuljahrgänge 5 - 12.
- Landesinstitut für Schule und Medien Berlin-Brandenburg (2008): Implementationsbrief zum Rahmenlehrplan Sekundarstufe I. Geographie. Ludwigsfelde.

Ministerium für Bildung, Wissenschaft Forschung und Kultur des Landes Schleswig-Holstein (1997/1998): Lehrplan für die Sekundarstufe I der weiterführenden allgemeinbildenden Schulen Hauptschule, Realschule, Gymnasium. Erdkunde.

Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Kultur des Landes Schleswig-Holstein (2002): Lehrplan für die Sekundarstufe II Gymnasium, Gesamtschule. Erdkunde.

Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur Mecklenburg-Vorpommern (2002): Rahmenplan Gymnasium; Integrierte Gesamtschule. Geographie. Rostock.

Ministerium für Bildung, Familie, Frauen und Kultur Saarland (2008): Gymnasiale Oberstufe Saar (GOS): Lehrplan für das Fach Erdkunde (vierstündiger Kurs / Neigungsfach).

Ministerium für Bildung, Jugend und Sport Land Brandenburg (2011): Vorläufiger Rahmenlehrplan für den Unterricht in der gymnasialen Oberstufe im Land Brandenburg. Geographie.

Ministerium für Bildung, Jugend und Sport des Landes Brandenburg (2008): Rahmenlehrplan für die Sekundarstufe I. Jahrgangsstufen 7 - 10. Geographie.

Ministerium für Bildung, Kultur und Wissenschaft Saarland (2002-2005): Achtjähriges Gymnasium: Lehrplan Erdkunde.

Ministerium für Bildung, Kultur und Wissenschaft Saarland (2006): Achtjähriges Gymnasium: Lehrplan Erdkunde für die Einführungsphase der gymnasialen Oberstufe.

Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Weiterbildung und Kultur Rheinland-Pfalz: Lehrpläne. Lernbereich Gesellschaftswissenschaften. Erdkunde, Geschichte, Sozialkunde. Hauptschule, Realschule, Gymnasium, Regionale Schule (Klassen 7-9/10).

Ministerium für Kultus, Jugend und Sport des Landes Baden-Württemberg: Bildungsplan 2004. Allgemein bildendes Gymnasium.

Ministerium für Kultus, Jugend und Sport des Landes Baden-Württemberg (o. J.): Bildung stärkt Menschen. Abrufbar unter: www.bildung-staerkt-menschen.de (letzter Abruf: 11.02.2012).

Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen (2007): Kernlehrplan für das Gymnasium - Sekundarstufe I (G8) in Nordrhein-Westfalen. (Ritterbach-Verlag) Düsseldorf.

Ministerium für Schule und Weiterbildung, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen (1999): Richtlinien und Lehrpläne für die Sekundarstufe II - Gymnasium/Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen. Erdkunde. Düsseldorf.

Niedersächsisches Kultusministerium (2008): Kerncurriculum für das Gymnasium Schuljahrgänge 5 - 10. Erdkunde. Hannover.

Niedersächsisches Kultusministerium (2010): Kerncurriculum für das Gymnasium - gymnasiale Oberstufe; die Gesamtschule - gymnasiale Oberstufe; das Abendgymnasium; das Kolleg. Erdkunde. Hannover.

Sächsisches Staatsministerium für Kultus (2004/2009/2011): Lehrplan Gymnasium: Geographie. Dresden.

Senator für Bildung und Wissenschaft Bremen (2006): Welt-Umweltkunde, Geschichte, Geographie, Politik. Bildungsplan für das Gymnasium. Jahrgangsstufe 5-10. Bremen.

Senatsverwaltung für Bildung, Jugend und Sport Berlin (2005): Rahmenlehrplan für die Sekundarstufe I. Geographie. Berlin.

Senatsverwaltung für Bildung, Jugend und Sport Berlin (2006): Rahmenlehrplan für die gymnasiale Oberstufe. Geographie. Berlin.

Ständige Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland (KMK) (o. J.): Kultusministerkonferenz. Bundesweit geltende Bildungsstandards. Abrufbar unter: <http://www.kmk.org/bildung-schule/qualitaets-sicherung-in-schulen/bildungsstandards/ueberblick.html> (letzter Abruf: 11.02.2012).

Thüringer Kultusministerium (1999): Lehrplan für das Gymnasium. Geographie. Erfurt.

10.4. Eingesetzte Software

Neben Standardsoftware wurden die folgenden Programme und Skripte genutzt:

- Roth, Alexander (2005): Corioliskraft (<http://student.physik.uni-mainz.de/~rothalex>) (letzter Abruf: 11.02.2012)
- Geogebra (www.geogebra.org) (letzter Abruf: 11.02.2012)
- Kreis durch drei Punkte (<http://www.arndt-bruenner.de/mathe/scripts/kreis3p.htm>) (letzter Abruf: 11.02.2012)
- Mathegrafix (<http://mathegrafix.de>) <http://mathegrafix.de> (letzter Abruf: 11.02.2012)
- Viana (<http://www.didaktik.physik.uni-due.de/viana/>) (letzter Abruf: 11.02.2012)

11. Anhang

11.1. Liste der angeschriebenen Schulen

| <u>Name der Schule</u> | <u>Ort</u> | <u>Bundesland</u> |
|-------------------------------------|---------------------|--------------------------|
| Albert-Einstein-Gymnasium | Ravensburg | Baden-Württemberg |
| Alexander-von-Humboldt-Gymnasium | Konstanz | Baden-Württemberg |
| Gymnasium bei St. Michael | Schwäbisch Hall | Baden-Württemberg |
| Gymnasium Isny | Isny im Allgäu | Baden-Württemberg |
| Hans-Thoma-Gymnasium | Lörrach | Baden-Württemberg |
| Karls-Gymnasium | Stuttgart | Baden-Württemberg |
| Ostalb-Gymnasium | Bopfingen | Baden-Württemberg |
| Pestalozzi-Gymnasium | Biberach | Baden-Württemberg |
| Schiller-Gymnasium | Heidenheim | Baden-Württemberg |
| Wildermuth-Gymnasium | Tübingen | Baden-Württemberg |
| Albertus-Magnus-Gymnasium | Regensburg | Bayern |
| Apian-Gymnasium | Ingolstadt | Bayern |
| Chiemgau-Gymnasium | Traunstein | Bayern |
| Gabriel-von-Seidl-Gymnasium | Bad Tölz | Bayern |
| Holbein-Gymnasium | Augsburg | Bayern |
| Johannes-Nepomuk-Gymnasium | Rohr i. NB. | Bayern |
| Karl-Ritter-von-Frisch-Gymnasium | Moosburg a. d. Isar | Bayern |
| Karolinen-Gymnasium | Rosenheim | Bayern |
| Max-Planck-Gymnasium | München | Bayern |
| Willibald Gluck Gymnasium | Neumarkt i. d. Opf. | Bayern |
| Albert-Schweitzer-Gymnasium | Eisenhüttenstadt | Brandenburg |
| Ev. Gymnasium am Dom zu Brandenburg | Brandenburg / Havel | Brandenburg |
| Friedrich-Engels-Gymnasium | Senftenberg | Brandenburg |
| Friedrich-Ludwig-Jahn-Gymnasium | Forst / Lausitz | Brandenburg |
| Friedrich-Ludwig-Jahn-Gymnasium | Rathenow | Brandenburg |
| Friedrich-Schiller-Gymnasium | Königs Wusterhausen | Brandenburg |
| Gymnasium "Alexander S. Puschkin" | Hennigsdorf | Brandenburg |
| Hermann-von-Helmholtz-Gymnasium | Potsdam | Brandenburg |
| Karl-Liebknecht-Gymnasium | Frankfurt / Oder | Brandenburg |
| Ludwig-Leichhardt-Gymnasium | Cottbus | Brandenburg |
| Albert-Schweitzer-Schule | Alsfeld | Hessen |
| Alexander-von-Humboldt-Schule | Viernheim | Hessen |
| Burghardt-Gymnasium | Buchen | Hessen |
| Freiherr-vom-Stein-Schule | Frankfurt am Main | Hessen |
| Goethe-Gymnasium | Bensheim | Hessen |
| Lessing-Gymnasium | Frankfurt am Main | Hessen |
| Ludwig-Georgs-Gymnasium | Darmstadt | Hessen |
| St. Lioba Gymnasium | Bad Nauheim | Hessen |
| Taunusgymnasium | Königstein | Hessen |
| Tilemannschule Limburg | Limburg | Hessen |
| Innerstädtisches Gymnasium Rostock | Rostock | Meckl.-Vorpommern |
| Alexander-von-Humboldt-Gymnasium | Greifswald | Meckl.-Vorpommern |
| Ernst-Moritz-Arndt-Gymnasium | Bergen auf Rügen | Meckl.-Vorpommern |
| Friedrich-Franz-Gymnasium | Parchim | Meckl.-Vorpommern |
| Gerhart-Hauptmann-Gymnasium | Wismar | Meckl.-Vorpommern |
| Goethe-Gymnasium | Schwerin | Meckl.-Vorpommern |
| Goethe-Gymnasium | Ludwigslust | Meckl.-Vorpommern |

| | | |
|--------------------------------------|-----------------------|---------------------|
| Hansa-Gymnasium | Stralsund | Meckl.-Vorpommern |
| John-Brinckman-Gymnasium | Güstrow | Meckl.-Vorpommern |
| Friderico-Francisceum Gymnasium | Bad Doberan | Meckl.-Vorpommern |
| Bernhard-Riemann-Gymnasium | Scharnebeck | Niedersachsen |
| Gymnasium Eversten | Oldenburg | Niedersachsen |
| Gymnasium Hittfeld | Seevetal | Niedersachsen |
| Gymnasium Munster | Munster | Niedersachsen |
| Gymnasium Ottersberg | Ottersberg | Niedersachsen |
| Gymnasium Salzgitter-Bad | Salzgitter | Niedersachsen |
| Gymnasium Twistringen | Twistringen | Niedersachsen |
| Gymnasium Uslar | Uslar | Niedersachsen |
| Gymnasium Walsrode | Walsrode | Niedersachsen |
| Max-Planck-Gymnasium | Göttingen | Niedersachsen |
| Dietrich-Bonhoeffer-Gymnasium | Ratingen | Nordrhein-Westfalen |
| Einstein-Gymnasium | Rheda-Wiedenbrück | Nordrhein-Westfalen |
| Ernst-Barlach-Gymnasium | Unna | Nordrhein-Westfalen |
| Geschwister-Scholl-Gymnasium | Winterberg | Nordrhein-Westfalen |
| Goerdeler-Gymnasium | Paderborn | Nordrhein-Westfalen |
| Goethe-Gymnasium | Stolberg | Nordrhein-Westfalen |
| Gymnasium Siegburg | Siegburg | Nordrhein-Westfalen |
| Städtisches Gymnasium Löhne | Löhne | Nordrhein-Westfalen |
| Städtisches Gymnasium Olpe | Olpe | Nordrhein-Westfalen |
| Städtisches Gymnasium Wülfrath | Wülfrath | Nordrhein-Westfalen |
| Dietrich-Bonhoeffer-Gymnasium | Schweich | Rheinland-Pfalz |
| Gutenberg-Gymnasium | Mainz | Rheinland-Pfalz |
| Gymnasium Nieder-Olm | Nieder-Olm | Rheinland-Pfalz |
| Heinrich-Böll-Gymnasium | Ludwigshafen / Rhein | Rheinland-Pfalz |
| Helmholtz-Gymnasium | Zweibrücken | Rheinland-Pfalz |
| Humboldt-Gymnasium | Trier | Rheinland-Pfalz |
| Johann-Wolfgang-Goethe-Gymnasium | Germersheim | Rheinland-Pfalz |
| Leibniz-Gymnasium | Neustadt / Weinstraße | Rheinland-Pfalz |
| Sickingen-Gymnasium | Landstuhl | Rheinland-Pfalz |
| Werner-Heisenberg-Gymnasium | Neuwied | Rheinland-Pfalz |
| Albert Schweitzer Gymnasium | Dillingen | Saarland |
| Christian von Mannlich Gymnasium | Homburg / Saar | Saarland |
| Cusanus-Gymnasium | St. Wendel | Saarland |
| Gymnasium Ottweiler | Ottweiler | Saarland |
| Illtal-Gymnasium | Illingen | Saarland |
| Marie-Luise-Kaschnitz-Gymnasium | Völklingen | Saarland |
| Otto-Hahn-Gymnasium | Saarbrücken | Saarland |
| Peter-Wust-Gymnasium | Merzig | Saarland |
| Saarlouiser Gymnasium am Stadtgarten | Saarlouis | Saarland |
| Saarpfalz-Gymnasium | Homburg / Saar | Saarland |
| Carl-von-Bach-Gymnasium | Stollberg | Sachsen |
| G.-E.-Lessing-Gymnasium | Döbeln | Sachsen |
| Georgius-Agricola-Gymnasium | Glauchau | Sachsen |
| Goethe-Gymnasium | Auerbach / Vogtland | Sachsen |
| Gymnasium "Am Breiten Teich" | Borna | Sachsen |
| Humboldt-Schule | Leipzig | Sachsen |
| Käthe-Kollwitz-Gymnasium | Zwickau | Sachsen |
| Léon-Foucault-Gymnasium | Hoyerswerda | Sachsen |
| Marie-Curie-Gymnasium | Dresden | Sachsen |
| Schiller-Gymnasium | Bautzen | Sachsen |

| | | |
|---|------------------------|--------------------|
| Diesterweg-Gymnasium | Tangermünde | Sachsen-Anhalt |
| Gerhart-Hauptmann-Gymnasium | Wernigerode | Sachsen-Anhalt |
| Geschwister-Scholl-Gymnasium | Zeitz | Sachsen-Anhalt |
| Gymnasium "J. G. Herder" | Merseburg | Sachsen-Anhalt |
| Gymnasium "Werner von Siemens" | Magdeburg | Sachsen-Anhalt |
| Gymnasium am Markt | Hettstedt | Sachsen-Anhalt |
| Gymnasium Querfurt | Querfurt | Sachsen-Anhalt |
| Heinrich-Heine-Gymnasium | Bitterfeld-Wolfen | Sachsen-Anhalt |
| Hildebrand-Gymnasium | Stendal | Sachsen-Anhalt |
| Lucas-Cranach-Gymnasium | Lutherstadt Wittenberg | Sachsen-Anhalt |
| Alexander-von-Humboldt Schule | Neumünster | Schleswig-Holstein |
| Dietrich-Bonhoeffer-Gymnasium | Quickborn | Schleswig-Holstein |
| Ernst-Barlach-Gymnasium | Kiel | Schleswig-Holstein |
| Goethe-Schule | Flensburg | Schleswig-Holstein |
| Helene-Lange-Gymnasium | Rendsburg | Schleswig-Holstein |
| Hermann-Tast-Schule | Husum | Schleswig-Holstein |
| Johannes-Brahms-Schule | Pinneberg | Schleswig-Holstein |
| Katharineum zu Lübeck | Lübeck | Schleswig-Holstein |
| Otto-Hahn-Gymnasium | Geesthacht | Schleswig-Holstein |
| Sophie-Scholl Gymnasium | Itzehoe | Schleswig-Holstein |
| Albert-Schweitzer-Gymnasium | Sömmerda | Thüringen |
| Arnoldischule | Gotha | Thüringen |
| Dr. Sulzberger Gymnasium | Bad Salzungen | Thüringen |
| Heinrich-Hertz-Gymnasium | Erfurt | Thüringen |
| Heinrich-Böll-Gymnasium | Saalfeld | Thüringen |
| Henfling-Gymnasium | Meiningen | Thüringen |
| Staatliches Gymnasium "Leuchtenburg" | Kahla | Thüringen |
| Staatliches Gymnasium "Marie Curie" | Leinefelde-Worbis | Thüringen |
| Staatliches Gymnasium Bergschule Apolda | Apolda | Thüringen |
| Ulf-Merbold-Gymnasium | Greiz | Thüringen |

11.2. Schulen, an denen Lehrerinterviews durchgeführt wurden

| <u>Name der Schule</u> | <u>Ort</u> |
|---------------------------------|-------------------|
| Bismarck-Gymnasium | Karlsruhe |
| Edith-Stein-Gymnasium | Bretten |
| Goethe-Gymnasium | Karlsruhe |
| Gymnasium Hohenbaden | Baden-Baden |
| Heinrich-Heine-Gymnasium | Kaiserslautern |
| Heisenberg-Gymnasium | Karlsruhe |
| Justus-Knecht-Gymnasium | Bruchsal |
| Kepler-Gymnasium | Pforzheim |
| Klosterschule vom Heiligen Grab | Baden-Baden |
| Lessing-Gymnasium | Karlsruhe |
| Ludwig-Marum-Gymnasium | Pfinztal |
| Markgraf-Ludwig-Gymnasium | Baden-Baden |
| Reuchlin-Gymnasium | Pforzheim |
| Richard-Wagner-Gymnasium | Baden-Baden |
| Theodor-Heuss-Gymnasium | Pforzheim |
| Thomas-Mann-Gymnasium | Stutensee |

Lebenslauf

Persönliche Daten:

Name: Matthias Stober
Adresse: Am Rüppurrer Schloß 5, 76199 Karlsruhe
Geburtstag: 01.04.1972
Geburtsort: Karlsruhe
Staatsangehörigkeit: deutsch

Schulbildung:

1978-1983 Grundschule Karlsruhe-Rintheim
1983-1992 Bismarck-Gymnasium Karlsruhe

Zivildienst:

1992-1993 Zivildienst beim Diakonischen Werk Karlsruhe im sozialen Zentrum Nußbaumweg

Studium:

1993-2002 Technische Universität Karlsruhe
Studium der Geographie und Germanistik auf Lehramt an Gymnasien
2002 erstes Staatsexamen

Referendariat:

2003-2005 erste Ausbildungsschule: Klosterschule vom Heiligen Grab Baden-Baden
Zweite Ausbildungsschule: Markgraf-Ludwig-Gymnasium Baden-Baden
2005 zweites Staatsexamen

Beruflicher Werdegang:

2005-2009 Lehrer für die Fächer Geographie, NwT, Deutsch und ITG am Markgraf-Ludwig-Gymnasium Baden-Baden
seit 2008 Lehrbeauftragter am Staatlichen Seminar für Didaktik und Lehrerbildung (Gymnasien) Karlsruhe für die Fächer Geographie, NwT und Multimedia
seit 2009 Lehrer für die Fächer Geographie, NwT und Deutsch am Bismarck-Gymnasium Karlsruhe