
Die „Coriolis-Kraft“:
Eine fachdidaktische Erarbeitung für den
Geographieunterricht

THEMENSTELLER:
PROF. DR. OTTO KLEMM

Examensarbeit für das Lehramt an
Gymnasien und Gesamtschulen
verfasst von
MAGDALENA MOSCHNY

Münster, 28. September 2009

I	Inhaltsverzeichnis.....	III
II	Abbildungsverzeichnis	V
III	Tabellenverzeichnis	VII
III	Abkürzungsverzeichnis	VIII
IV	Symbolverzeichnis.....	VIII

I Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG.....	1
2	MATHEMATISCH-PHYSIKALISCHE HERLEITUNG DER CORIOLIS-KRAFT	4
2.1	Kinematik	4
2.1.1	Kartesische Koordinaten.....	5
2.1.2	Zylinderkoordinaten	6
2.2	Newton'sche Axiome.....	9
2.3	Inertialsysteme	10
2.4	Galilei-Transformation	11
2.5	Beschleunigte und rotierende Bezugssysteme	12
2.6	Beliebig beschleunigte Bezugssysteme	15
2.7	Kräfte	16
2.8	Erhaltungssätze	18
3	DIE CORIOLIS-KRAFT IN DEN GEOWISSENSCHAFTEN.....	20
3.1	Astrophysikalische Grundlagen.....	20
3.2	Luftdruck	22
3.3	Entstehung horizontaler Druckgradienten	24
3.4	Gradientwind und thermische Zirkulation	25
3.5	Zirkulationselemente der reibungsfreien Troposphäre: Coriolis-Kraft, geostrophischer Wind und Zentrifugalkraft.....	26
3.6	Hoch- und Tiefdruckgebiete	28
3.7	Die globale planetarische Zirkulation	29
4	DIDAKTISCHE GRUNDLAGEN	32
4.1	Einordnung in den Lehrplan Geographie	32
4.2	Didaktische Reduktion	33
4.2.1	Mathematische Voraussetzungen	34
4.2.2	Physikalische Voraussetzungen	35
4.3	Methoden und Medien im Geographieunterricht	36
4.3.1	Experimente	36
4.3.2	Versuche	38
4.3.3	Modelle	38

4.3.4	Lehrvideo	39
4.4	Berücksichtigung von Schülerinteressen	40
4.5	Rahmenbedingungen von Unterricht.....	41
5	DIE CORIOLIS-KRAFT IM GEOGRAPHIEUNTERRICHT	43
5.1	Erklärungsansätze in Schulbüchern.....	43
5.2	Erklärungsansätze in der Geographiedidaktik.....	43
5.2.1	Schülerversuch: Schüler in Bewegung	44
5.2.2	Schülerversuch: Papierscheibe	45
5.2.3	Experiment zur Coriolis-Beschleunigung	45
5.2.4	Einfaches Experiment zur Coriolis-Kraft	46
5.2.5	Zweidimensionales Modell.....	47
5.2.6	Modell: drehender Kegelmantel.....	48
5.2.7	Funktionsmodell zur allgemeinen Zirkulation.....	48
5.2.8	Modell zur Demonstration des Coriolis-Effekts auf dem Overheadprojektor	49
5.2.9	Modellversuch zur Coriolis-Ablenkung.....	50
5.2.10	Lehrvideo zur Coriolis-Kraft	51
5.2.11	Physik auf einem rotierenden Bezugssystem	53
6	BEWERTUNG DER UNTERRICHTSANSÄTZE.....	54
6.1	Bewertung der Schulbücher.....	54
6.2	Bewertung der fachdidaktischen Unterrichtsansätze	55
6.2.1	Schülerversuch: Schüler in Bewegung	56
6.2.2	Schülerversuch: Papierscheibe	57
6.2.3	Experiment zur Coriolis-Beschleunigung	58
6.2.4	Einfaches Experiment zur Coriolis-Kraft	59
6.2.5	Zweidimensionales Modell.....	60
6.2.6	Modell: drehender Kegelmantel.....	60
6.2.7	Funktionsmodell zur allgemeinen Zirkulation.....	62
6.2.8	Modell zur Demonstration des Coriolis-Effekts auf dem Overheadprojektor	63
6.2.9	Modellversuch zur Coriolis-Ablenkung.....	64
6.2.10	Lehrvideo zur Coriolis-Kraft	65
6.2.11	Physik auf einem rotierenden Bezugssystem	67
6.3	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	68
6.4	Eigene Erfahrungen zur C-K im Unterricht.....	71
7	FAZIT.....	75
8	LITERATURVERZEICHNIS	77

II Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Das kartesische Koordinatensystem nach Stephani	5
Abb. 2:	Zur Festlegung von Zylinderkoordinaten nach Nolting	6
Abb. 3:	Basisvektoren in Zylinderkoordinaten nach Fließbach	7
Abb. 4:	Ortsvektor eines Massenpunktes in zwei relativ zueinander bewegten Koordinatensystemen nach Fließbach	11
Abb. 5:	Zwei relativ zueinander rotierende Bezugssysteme mit gleichem Ursprung nach Stephani.....	13
Abb. 6:	Zur Richtung der Coriolis-Kraft.....	14
Abb. 7:	Zur Richtung des Drehimpulsvektors	18
Abb. 8:	Einfallswinkel der Sonnenstrahlen	21
Abb. 9:	Die Entstehung der Jahreszeiten durch Erdrevolution und Schiefe der Ekliptik	22
Abb. 10:	Die Abnahme des Luftdrucks mit der Höhe.....	23
Abb. 11:	Isobarenlinien und der Luftdruckgradient	24
Abb. 12:	Entstehung einer thermischen Zirkulation	25
Abb. 13:	Zur Entstehung des geostrophischen Windes.....	27
Abb. 14:	Hoch- und Tiefdruckgebiete: oben unter Vernachlässigung der Reibung, unten mit Reibung.....	29
Abb. 15:	Schema der bodennahen planetarischen Zirkulation	30
Abb. 16:	Arbeitsbogen zum Schülerversuch	44
Abb. 17:	Skizze zum Schülerversuch	45
Abb. 18:	Skizze zur Versuchsanordnung	46
Abb. 19:	Experiment zum Erfassen der Bahnkurve im rotierenden Bezugssystem	46
Abb. 20:	Einfaches Experiment zur Coriolis-Kraft.....	47
Abb. 21:	Modell zur Reduktion einer Dimension bei der Betrachtung der C-K.....	47
Abb. 22:	Skizze des Modells zur Demonstration der Coriolis-Kraft.....	48
Abb. 23:	Funktionsmodell zur allgemeinen Zirkulation	49

Abb. 24: Skizze zur Demonstrationsapparatur	49
Abb. 25: Skizze zur Versuchsanordnung	51
Abb. 26: Schema zum Versuchsaufbau	52
Abb. 27: Ein rotierendes Bezugssystem.....	53
Abb. 28: Modell: drehender Kegelmantel	61
Abb. 29: Coriolis-Effekt auf dem Overhead-Projektor.....	63
Abb. 30: Nachgebautes Funktionsmodell.....	72
Abb. 31: Ablenkung der Kugel bei der Bewegung vom Mittelpunkt der Scheibe zum Rand	72
Abb. 32: Die verschiedenen Bahngeschwindigkeiten der Erde	73
Abb. 33: Ablenkung der Kugel bei der Bewegung von außen zum Mittelpunkt der Scheibe	73
Abb. 34: Die ablenkende Wirkung der Erddrehung	75
Abb. 35: Abbildung I und Abbildung III	90
Abb. 36: Abbildung II.....	90
Abb. 37: Abbildung II und Abbildung IV.....	90
Abb. 38: Abbildung V	90
Abb. 39: Versuchsergebnis ein und derselben Bewegung mit markierter Trajektorie.....	92
Abb. 40: Polardiagramm der in Abb. 39 dargestellten Bewegung.....	92

III Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Die Länge und Inhalte der Abschnitte im Lehrvideo zur Coriolis-Kraft.....	65
Tabelle 2:	Zusammenfassende Bewertung der Unterrichtsansätze.....	68
Tabelle 3:	Geographiebücher des Landes Nordrhein-Westfalen für die Oberstufe.....	85
Tabelle 4:	Umfang der Inhalte zur Coriolis-Kraft in den Geographiebüchern	86
Tabelle 5:	Inhalte der Unterrichtsbeispiele aus den 10 Geographiebüchern, in denen die Coriolis-Kraft erwähnt wird, sortiert nach Ursachen und Erklärungen, weiteren Eigenschaften sowie Wirkungen und Folgen	87
Tabelle 6:	Abbildungen zur Coriolis-Kraft	89
Tabelle 7:	Nummerierung der Unterrichtsansätze aus den fachdidaktischen Zeitschriften.....	91

III Abkürzungsverzeichnis

Abb.	-	Abbildung
C-K	-	Coriolis-Kraft
GU	-	Geographieunterricht
Hrsg.	-	Herausgeber
KS	-	Koordinatensystem
MSWWF	-	Ministerium für Schule und Weiterbildung, Wissenschaft und Forschung
o. A.	-	ohne Angabe
SuS	-	Schülerinnen und Schüler

IV Symbolverzeichnis

\vec{x}	-	x-Vektor
\dot{x}	-	Zeitableitung von x
∂	-	kleiner griechischer Buchstabe ‚Delta‘
ω	-	kleiner griechischer Buchstabe ‚Omega‘
φ	-	kleiner griechischer Buchstabe ‚Phi‘
ρ	-	kleiner griechischer Buchstabe ‚Roh‘

1 EINLEITUNG

„Corioliskraft? Das Thema solltet ihr Geographen den Physikern überlassen und für eine 8. Klasse ist es sowieso zu schwer. Das verstehen noch nicht einmal die Schüler der 11. Klasse.“¹ Dies ist durchaus eine gängige Meinung über die Schülerinnen und Schüler (SuS), jedoch sieht es in Bezug auf die Lehrkräfte ähnlich aus. „Wie die Erfahrung (...) zeigt, tun sich Lehrende beim Verständnis des Konzeptes selbst schwer...“² Kann den SuS sowie den Lehrern der Umgang mit der Thematik erleichtert werden oder ist der Gegenstand tatsächlich zu anspruchsvoll für den Geographieunterricht? Diese Frage wird im Laufe der Einleitung entschieden beantwortet.

Laut Lehrplan für die Sekundarstufe II der Gymnasien in Nordrhein-Westfalen ist der thematische Baustein „Klima und Vegetationszonen in ihrer unterschiedlichen Bedeutung für die Entwicklung von Räumen“³ ein obligatorischer Unterrichtsgegenstand aus dem ersten Inhaltsfeld für die Oberstufe. Das heißt, die Coriolis-Kraft muss in der Oberstufe von den Geographielehrern thematisiert werden. Selten wird ein Schüler oder eine Schülerin jedoch nach Beenden der Unterrichtsreihe zu diesem Thema wiedergeben können, welches Phänomen auf der „Coriolis-Kraft“ basiert und wodurch diese Kraft hervorgerufen wird. Falls die SuS mit der „Coriolis-Kraft“ die Ablenkung der Winde in Verbindung bringen können, so bleibt die Vorstellung in der Regel ungenau und sehr abstrakt. Erfahrungsgemäß können sich viele Studenten der Geographie nicht erinnern, diesen Gegenstand in der Schule behandelt zu haben.

Dies widerspricht dem allgemeinen Auftrag von Schule, nach dem die Erziehung und Bildung in der gymnasialen Oberstufe zu einer wissenschaftspropädeutischen Ausbildung führen soll. „Wissenschaftspropädeutisches Lernen setzt ein jederzeit verfügbares gut vernetztes Grundlagenwissen voraus...“⁴ Aus diesem Grund ist dem langfristigen Lernen in der Schule besonderer Wert beizumessen.

Vorraussetzung dafür ist ein fachlich korrekter und nach didaktisch-methodischen Kriterien optimal gestalteter Unterricht. Da es sich bei der Ablenkung der Winde um ein sehr komplexes, mehrperspektivisches Phänomen handelt, ist bei der Vermittlung insbesondere auf die didaktische Reduktion des Unterrichtsgegenstandes sowie auf die Methodenwahl zu achten. Das Thema muss so kompakt und anschaulich wie möglich präsentiert werden.

¹ KOHFAHL, H. (1994): Die Windablenkung auf der Nordhalbkugel durch den Einfluß der Corioliskraft. S. 44.

² WAGNER, A. et al. (2007): Multimedien zur Physikausbildung. S. 39.

³ MINISTERIUM FÜR SCHULE UND WEITERBILDUNG, WISSENSCHAFT UND FORSCHUNG (MSWWF) (1999): Richtlinien und Lehrpläne für die Sekundarstufe II - Gymnasium / Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen. S. 12.

⁴ MSWWF (1999): Richtlinien und Lehrpläne für die Sekundarstufe II - Gymnasium / Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen. S. XII.

Ein Grund für das fehlende Verständnis auf Seiten der Lehrer und eine damit verbundene fachlich mangelhafte Präsentation der „Coriolis-Kraft“ können die fachlichen Präferenzen vieler Geographielehrer sein. Von den Zweit- und Drittfachnennungen entfallen am Hochschulstandort Münster 57,5 % auf die Geistes- und Sozialwissenschaften, 18,6 % auf Sport, 11,4 % auf Mathematik sowie Informatik und 11 % auf Naturwissenschaften. Demnach erscheint es plausibel, dass viele Geographielehrer die Anthropogeographie bevorzugen und die physischen Themen in der Schule nicht mit der gleichen Begeisterung und Gründlichkeit vertreten.⁵ Einige Autoren gehen sogar so weit von einer „Geographielehrerschaft [zu sprechen], die mit ihrer „geisteswissenschaftlich-sportlichen“ Fächerausrichtung naturwissenschaftliche Unterrichtsinhalte, wenn überhaupt, auf dem Niveau von Trivialabstraktionen berücksichtig[t] (...).“⁶

Wo bleibt der Anspruch des Faches Geographie? Muss das fachliche Niveau reduziert werden? Muss die „Coriolis-Kraft“ als Unterrichtsgegenstand aus dem Lehrplan gestrichen werden? Diese Fragen werden in der Fachdidaktik entschieden beantwortet. „Die intellektuellen Anforderungen [des Faches Geographie] sind so anzusetzen, dass sie nicht unter denjenigen anderer Fächer liegen.“⁷ Diese gegenwärtige Problematik zeigt die besondere Notwendigkeit auf, Geographielehrern konkrete fachliche und didaktische Hilfestellungen in Bezug auf physisch-geographische Unterrichtsthemen, wie z.B. die „Coriolis-Kraft“, zur Verfügung zu stellen.

Die universitäre Ausbildung ist in besonderer Weise hierzu geeignet. Da viele Themen in der fachlichen Lehrerbildung jedoch sehr theoretisch und abstrakt behandelt werden, können die zukünftigen Lehrer diese im späteren Unterricht oft nicht ohne weiteres „greifbar“ vermitteln. Aus diesem Grund erscheint es sinnvoll, anschauliche Erklärungsansätze bereits in das Lehramtstudium zu integrieren. Nur die Methoden und Inhalte, die die angehenden Lehrer selbst erfahren, verstanden, gelernt und verinnerlicht haben, können sie von Beginn an in der Schule nutzen und weitergeben.

Mit der Behandlung der „Coriolis-Kraft“ im Geographieunterricht kann ein wichtiges Grundprinzip des Lehren und Lernens in der gymnasialen Oberstufe verwirklicht werden: das fachübergreifende und fächerverbindende Lernen, da die Ablenkung der Winde ein Naturphänomen darstellt, welches auf physikalischen Gesetzen beruht. Durch diese Unterrichtsform wird eine „mehrperspektivische Betrachtung der Wirklichkeit gefördert, und es werden damit auch übergreifende Einsichten, Fähigkeiten, Arbeitsmethoden und Lernstrategien entwickelt, die unterschiedliche fachliche Perspektiven für gemeinsame Klärung und Problemlösungsstrategien verbinden und so zur Kenntnis

⁵ vgl. LETHMATE, J. (2006): Experimentelle Lehrformen und Scientific Literacy und LETHMATE, J. (2005): „Geomethoden“.

⁶ LETHMATE, J. (2005): „Geomethoden“. S. 251 f.

⁷ WIECZOREK, U. (1992): Geographie als Systemanalyse. S. 66.

der komplexen und interdependenten Probleme der Gegenwart beitragen.“⁸ Hier verbirgt sich ein besonderes Potenzial der Geographie: „Naturwissenschaftliche Bildung ist neben gesellschaftswissenschaftlicher Bildung Aufgabe der Geographie“⁹. Da das Fach bereits in sich fachübergreifend ist, sollte es dem genannten Grundprinzip durch die Behandlung von Unterrichtsgegenständen wie der „Coriolis-Kraft“ im Besonderen nachkommen.¹⁰

Mit dieser Arbeit kann somit ein Beitrag dazu geleistet werden, Geographielehrer an das naturwissenschaftliche Phänomen der Ablenkung der Winde heranzuführen. Es werden Unterrichtsansätze zur „Coriolis-Kraft“ aus den Schulbüchern sowie aus verschiedenen fachdidaktischen Zeitschriften auf ihre fachliche sowie didaktische Korrektheit und Anwendbarkeit überprüft. Des Weiteren wird geklärt, inwiefern sie das geowissenschaftliche Phänomen der Ablenkung der Winde veranschaulichen. Als Grundlage der Bewertung wird die „Coriolis-Kraft“ zunächst mathematisch-physikalisch hergeleitet, gefolgt von einer Einordnung der Thematik in die Geowissenschaften. In diesen ersten beiden Kapiteln wird ein fundiertes Fachwissen bereitgestellt, das jedem Lehrer bei der Vermittlung der „Coriolis-Kraft“ und der Entwicklung eigener Erklärungsansätze helfen kann. Darüber hinaus wird im vierten Kapitel eine didaktisch-methodische Basis für die Bewertung der Unterrichtsbeispiele geschaffen.

Ziel ist es, verschiedene anschauliche Möglichkeiten zu erarbeiten, mit denen die „Coriolis-Kraft“ in erster Linie in der Schule behandelt werden kann. Vor dem Hintergrund des langfristigen Lernens soll den SuS ein grundlegendes Verständnis für die Ursachen und Wirkungen dieser geowissenschaftlich interessanten Kraft vermittelt werden.

Zuletzt darf eine Anmerkung im Hinblick auf die Nutzung des Terminus „Coriolis-Kraft“ einleitend nicht fehlen. Am Ende der mathematisch-physikalischen Herleitung erhält man fachlich korrekt eine Coriolis-Beschleunigung. Erst durch die Multiplikation mit der Masse auf beiden Seiten gelangt man zur Bezeichnung der Kraft. „In der Literatur ist es fälschlicherweise üblich, die Formeln für die Zentrifugalbeschleunigung, die Gradientenbeschleunigung und die Coriolisbeschleunigung anzugeben und die daraus resultierenden Größen als Zentrifugalkraft, Gradientkraft und Corioliskraft zu bezeichnen.“¹¹ Im Folgenden werden beide Ausdrücke ohne Anführungszeichen verwendet, obwohl die Ursache für die Ablenkung der Winde fachlich korrekt immer die Coriolis-Beschleunigung ist.

⁸ MSWWF (1999): Richtlinien und Lehrpläne für die Sekundarstufe II - Gymnasium / Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen. S. XVIII.

⁹ LETHMATE, J. (2006): Experimentelle Lehrformen und Scientific Literacy. S. 4.

¹⁰ vgl. DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOGRAPHIE (2007) (Hrsg.): Bildungsstandards im Fach Geographie.

¹¹ LITTMANN, T. (1994): Physikalische Grundlagen und Übungen zur Klimatologie. S. 84.

2 MATHEMATISCH-PHYSIKALISCHE HERLEITUNG DER CORIOLIS-KRAFT

Die Winde in unserer Atmosphäre werden abgelenkt, wodurch das globale Windsystem schwerwiegend beeinflusst wird. Als Grund dieser Ablenkung wird in der Literatur die Coriolis-Kraft oder die Coriolis-Beschleunigung benannt. Im Laufe der Herleitung wird deutlich, dass die Ursache der Kraft in der Transformation von Bezugssystemen liegt. Als Ausgangspunkt der Herleitung werden zunächst die Grundlagen der Kinematik und die Eigenschaften von Bezugssystemen vorgestellt. Es folgt die Erläuterung relevanter Kräfte und Erhaltungssätze.

Bei der Analyse der Unterrichtsbeispiele aus verschiedenen fachdidaktischen Zeitschriften soll herausgearbeitet werden, ob einige das Phänomen der Coriolis-Kraft nicht korrekt darstellen. Die mathematisch-physikalische Herleitung soll als fundierte Basis dienen, um alle Fehler erkennen zu können. Erst das Verständnis für die Herkunft der Kraft und für ihre Auswirkungen ermöglicht eine fachliche Beurteilung. Des Weiteren kann es Lehrkräften dienen, ihr Grundlagenwissen zu erweitern. Mathematische Defizite, vor allem in Bezug auf die Vektorrechnung, können mit Hilfe von Schulbüchern der Klasse 12 und 13 aufgearbeitet werden. Eine grundlegende Basis in Physik kann mit Hilfe von David Halliday (2003), Physik, angeeignet werden.

Deutschsprachige Werke über theoretische Physik oder Mechanik beinhalten in den ersten Kapiteln vielfach eine Herleitung der Coriolis-Kraft, so die Arbeiten von J. Wess (2008), W. Demtröder (2008), T. Fließbach (2007), P. Mittelstaedt (1995), K. Lüders / G. von Oppen (2008) und S. Brandt / D. Dahmen (2005). Aufgrund der kompakten und anschaulichen Darstellung bei W. Nolting (2005), H. Stephani / G. Kluge (1995) und F. Kuypers (2008) wird im Folgenden vor allem auf diese Werke Bezug genommen.

2.1 Kinematik

Die Kinematik ist die Lehre von der Bewegung. Sie stellt die mathematischen und physikalischen Begriffe zusammen, die benötigt werden, um die Bewegung eines Massenpunktes zu beschreiben. Ein Massenpunkt ist ein physikalischer Körper mit der Masse m und einer vernachlässigbaren räumlichen Ausdehnung. Dafür muss ein Körper nicht sehr klein oder punktförmig sein. Wenn man statt eines ausgedehnten Gegenstandes seinen Schwerpunkt oder einen anderen ausgezeichneten Punkt betrachtet, entspricht dies dem Konzept des Massenpunktes.

Um die Bewegung eines solchen Punktes beschreiben zu können, muss man seinen Ort zu einem gegebenen Zeitpunkt, seine Geschwindigkeit und Beschleunigung sowie

die jeweiligen Richtungen der Bewegung angeben können. Zwischen den drei letztgenannten Größen besteht der folgende Zusammenhang:

$$\vec{r}(t) \tag{1}$$

$$\vec{v}(t) = \dot{\vec{r}}(t) \tag{2}$$

$$\vec{a}(t) = \dot{\vec{v}}(t). \tag{3}$$

Bewegung bedeutet, dass ein Körper seine Lage relativ zu seiner näheren Umgebung ändert. Um diese Bewegung relativ zu einem Bezugssystem mathematisch beschreiben zu können, bedient man sich verschiedener Koordinatensysteme (KS).¹² Im Folgenden werden die beiden KS vorgestellt, die für die Herleitung der Coriolis-Kraft von Bedeutung sind.

2.1.1 Kartesische Koordinaten

Das kartesische KS ist das am häufigsten verwendete und einfachste Bezugssystem. Es besteht aus drei senkrecht zueinander stehenden Geraden, den Koordinatenachsen x, y und z, die sich in einem gemeinsamen Punkt schneiden, dem Koordinatenursprung. Bei der Verteilung der Richtungen der Achsen (x, y, z) muss beachtet werden, dass sie insgesamt ein Rechtssystem bilden müssen. Das heißt, wenn die z-Achse nach oben zeigt, muss die y-Achse 90° rechts von der x-Achse liegen (Abb.1).

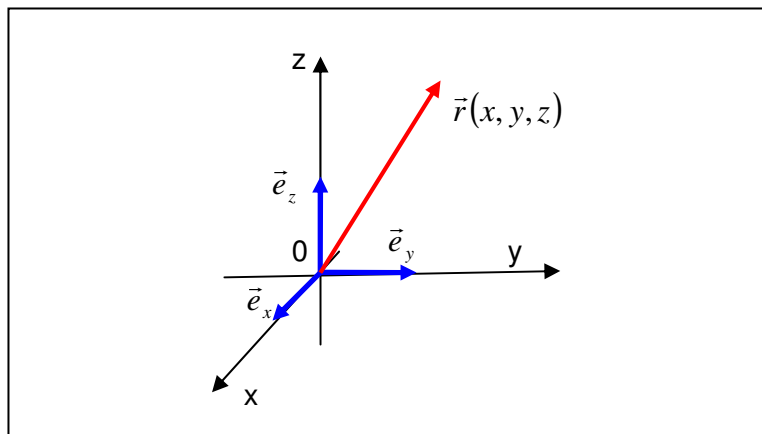


Abb. 1: Das kartesische Koordinatensystem nach Stephani

\vec{e}_x , \vec{e}_y und \vec{e}_z sind die Einheitsvektoren, die in die Richtung der x-, y- und z-Achse zeigen und die Länge 1 haben. Jeder Ort kann zu einem gegebenen Zeitpunkt durch den Ortsvektor $\vec{r}(t)$ angegeben werden:

¹² vgl. NOLTING, W. (2005): Grundkurs - Theoretische Physik 1 und LÜDERS, K. et al. (2008): Lehrbuch der Experimentalphysik.

$$\vec{r}(t) = (x(t), y(t), z(t)) = x(t) \cdot \vec{e}_x + y(t) \cdot \vec{e}_y + z(t) \cdot \vec{e}_z. \quad (4)$$

Die Geschwindigkeit \vec{v} des Massenpunktes ergibt sich nach Gleichung (2) aus der Ableitung des Ortsvektors nach der Zeit:

$$\vec{v}(t) = \dot{\vec{r}}(t) = \dot{x}(t) \cdot \vec{e}_x + \dot{y}(t) \cdot \vec{e}_y + \dot{z}(t) \cdot \vec{e}_z = v_x \cdot \vec{e}_x + v_y(t) \cdot \vec{e}_y + v_z(t) \cdot \vec{e}_z. \quad (5)$$

Entsprechend erhält man die Beschleunigung gemäß (3) aus der Ableitung der Geschwindigkeit nach der Zeit:

$$\vec{a}(t) = \dot{\vec{v}}(t) = \dot{v}_x(t) \cdot \vec{e}_x + \dot{v}_y(t) \cdot \vec{e}_y + \dot{v}_z(t) \cdot \vec{e}_z = a_x \cdot \vec{e}_x + a_y(t) \cdot \vec{e}_y + a_z(t) \cdot \vec{e}_z. \quad (6)$$

2.1.2 Zylinderkoordinaten

Das Verständnis von Zylinderkoordinaten wird durch eine vorherige Veranschaulichung von Polarkoordinaten stark vereinfacht. Mit dessen Hilfe kann ein Punkt P im zweidimensionalen Raum durch die Angabe des Abstandes ρ zwischen dem Punkt P und dem Koordinatenursprung 0 und dem Winkel φ zwischen der Verbindungslinie \overline{OP} und der x-Achse angegeben werden. Statt x und y wird der Punkt durch φ und ρ definiert. Die Punkte für ein konstantes φ ergeben Geraden, während man für die Punkte mit konstantem ρ Kreise erhält.

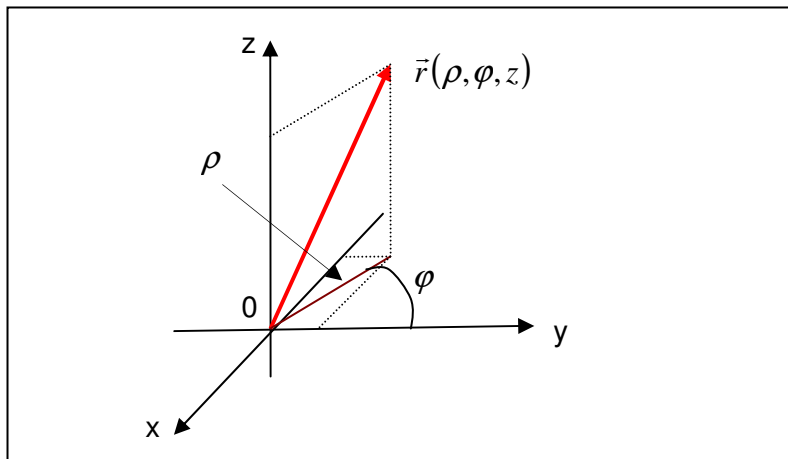


Abb. 2: Zur Festlegung von Zylinderkoordinaten nach Nolting

„Zylinderkoordinaten (ρ, φ, z) sind Polarkoordinaten (ρ, φ) , die für den dreidimensionalen Raum durch eine Höhenkoordinate (z) ergänzt werden.“¹⁴ Der momentane Ort P des Massenpunktes kann zu einem gegebenen Zeitpunkt durch seine Höhe z über

¹³ vgl. NOLTING, W. (2005): Grundkurs - Theoretische Physik 1, LÜDERS, K. et al. (2008): Lehrbuch der Experimentalphysik und STEPHANI, H. et al. (1995): Theoretische Mechanik.

¹⁴ NOLTING, W. (2005): Grundkurs - Theoretische Physik 1. S. 95.

der x-,y-Ebene, den Abstand ρ zur z-Achse und den Winkel φ zwischen der x-Achse und der Projektion ρ des Vektors $\vec{r}(\rho, \varphi, z)$ auf die x-,y-Ebene angegeben werden (Abb. 2, S. 6).

Die Transformationsformeln vom kartesischen KS zu Zylinderkoordinaten lauten:

$$x = \rho \cdot \cos \varphi, \quad y = \rho \cdot \sin \varphi \quad \text{und} \quad z = z. \quad (7)$$

Daraus folgt:
$$\vec{r}(t) = \rho \cos \varphi \cdot \vec{e}_x + \rho \sin \varphi \cdot \vec{e}_y + z \cdot \vec{e}_z. \quad (8)$$

Um den Ortsvektor in Zylinderkoordinaten anzugeben, müssen die kartesischen Einheitsvektoren in Zylinderkoordinaten umgerechnet und in Gleichung (8) ersetzt werden,

wobei $\frac{\partial \vec{r}}{\partial \rho}$ die partielle Ableitung von \vec{r} nach ρ ist:

$$\vec{e}_\rho = \frac{\frac{\partial \vec{r}}{\partial \rho}}{\left| \frac{\partial \vec{r}}{\partial \rho} \right|} = (\cos \varphi, \sin \varphi, 0) = \cos \varphi \cdot \vec{e}_x + \sin \varphi \cdot \vec{e}_y, \quad (9)$$

$$\vec{e}_\varphi = \frac{\frac{\partial \vec{r}}{\partial \varphi}}{\left| \frac{\partial \vec{r}}{\partial \varphi} \right|} = (-\sin \varphi, \cos \varphi, 0) \quad \text{und} \quad (10)$$

$$\vec{e}_z = \frac{\frac{\partial \vec{r}}{\partial z}}{\left| \frac{\partial \vec{r}}{\partial z} \right|} = (0, 0, 1). \quad (11)$$

Die Richtung der Einheitsvektoren hängt vom betrachteten Ort ab (siehe Abb.3).

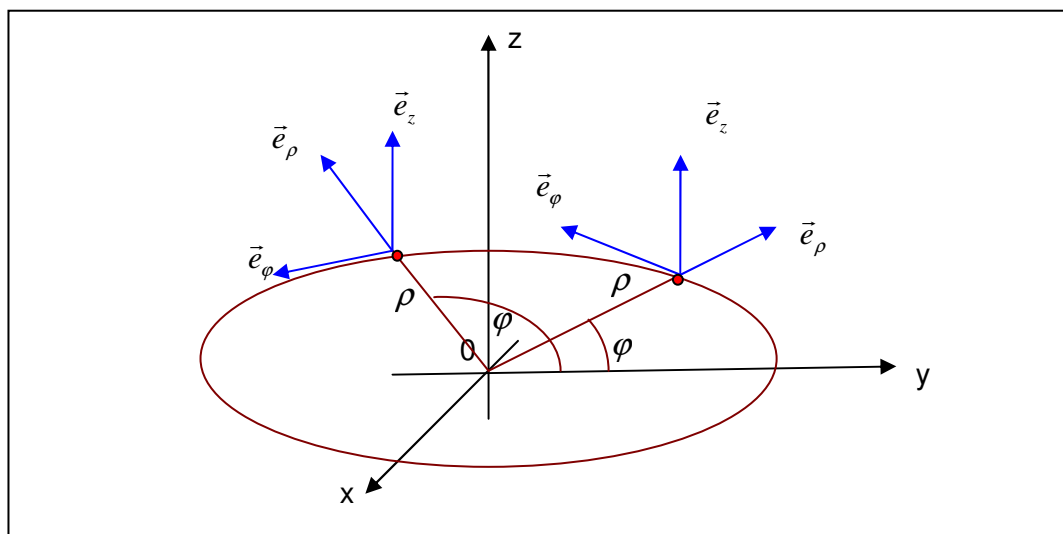


Abb. 3: Basisvektoren in Zylinderkoordinaten nach Fließbach

Aus Gleichung (9) bis (11) erhält man für die Einheitsvektoren im kartesischen KS:

$$\vec{e}_1 = \cos \varphi \cdot \vec{e}_\rho - \sin \varphi \cdot \vec{e}_\varphi, \quad \vec{e}_2 = \sin \varphi \cdot \vec{e}_\rho + \cos \varphi \cdot \vec{e}_\varphi \quad \text{und} \quad \vec{e}_3 = \vec{e}_z. \quad (12)$$

Setzt man diese in (8) ein, kann der Ortsvektor in Zylinderkoordinaten angegeben werden:

$$\begin{aligned} \vec{r}(t) &= \rho \cos \varphi \cdot \vec{e}_x + \rho \sin \varphi \cdot \vec{e}_y + z \cdot \vec{e}_z \\ &= \rho \cos^2 \varphi \cdot \vec{e}_\rho - \rho \sin \varphi \cos \varphi \cdot \vec{e}_\varphi + \rho \sin^2 \varphi \cdot \vec{e}_\rho + \rho \sin \varphi \cos \varphi \cdot \vec{e}_\varphi + z \cdot \vec{e}_z \\ &= \rho \cdot \vec{e}_\rho + z \cdot \vec{e}_z \end{aligned} \quad (13)$$

Die Geschwindigkeit wird in Zylinderkoordinaten wie folgt berechnet:

$$\vec{v}(t) = \frac{d\vec{r}(t)}{dt} = \dot{\rho} \cdot \vec{e}_\rho + \rho \cdot \dot{\vec{e}}_\rho + \dot{z} \cdot \vec{e}_z. \quad (14)$$

Leitet man den Einheitsvektoren \vec{e}_ρ aus (9) ab, erhält man:

$$\dot{\vec{e}}_\rho = (-\sin \varphi \cdot \dot{\varphi}, \cos \varphi \cdot \dot{\varphi}, 0) = \dot{\varphi} \cdot \vec{e}_\varphi. \quad (15)$$

Setzt man (15) in (14) ein, kommt man zur Definition des Geschwindigkeitsvektors in Zylinderkoordinaten:

$$\vec{v}(t) = \frac{d\vec{r}(t)}{dt} = \dot{\rho} \cdot \vec{e}_\rho + \rho \dot{\varphi} \cdot \vec{e}_\varphi + \dot{z} \cdot \vec{e}_z. \quad (16)$$

Die Beschleunigung wird auf die gleiche Weise berechnet:

$$\vec{a}(t) = \frac{d\vec{v}(t)}{dt} = \ddot{\rho} \cdot \vec{e}_\rho + \dot{\rho} \cdot \dot{\vec{e}}_\rho + \rho \ddot{\varphi} \cdot \vec{e}_\varphi + \dot{\rho} \dot{\varphi} \cdot \vec{e}_\varphi + \rho \dot{\varphi} \cdot \dot{\vec{e}}_\varphi + \ddot{z} \cdot \vec{e}_z \quad (17)$$

$$\text{Mit} \quad \dot{\vec{e}}_\varphi = (-\cos \varphi \cdot \dot{\varphi}, -\sin \varphi \cdot \dot{\varphi}, 0) = -\dot{\varphi} \cdot \vec{e}_\rho \quad (18)$$

und (15) folgt:

$$\begin{aligned} \vec{a}(t) &= \ddot{\rho} \cdot \vec{e}_\rho + 2\dot{\rho}\dot{\varphi} \cdot \vec{e}_\varphi + \rho \ddot{\varphi} \cdot \vec{e}_\varphi - \rho \dot{\varphi}^2 \cdot \vec{e}_\rho + \ddot{z} \cdot \vec{e}_z \\ &= (\ddot{\rho} - \rho \dot{\varphi}^2) \vec{e}_\rho + (\rho \ddot{\varphi} + 2\dot{\rho}\dot{\varphi}) \vec{e}_\varphi + \ddot{z} \cdot \vec{e}_z \end{aligned} \quad (19)$$

Zylinderkoordinaten erweisen sich als besonders zweckmäßig, wenn eine Drehsymmetrie um eine feste Achse vorliegt. Der rechnerische Erfolg bei der Lösung physikalischer Probleme wird maßgeblich durch die Wahl des KS beeinflusst.¹⁵

¹⁵ vgl. NOLTING, W. (2005): Grundkurs - Theoretische Physik 1 und STEPHANI, H. et al. (1995): Theoretische Mechanik.

2.2 Newton'sche Axiome

Was ist die Ursache der Bewegung? Aus den Alltagserfahrungen weiß man, dass Kraft aufgewendet werden muss, um einen Gegenstand oder den eigenen Körper zu bewegen. Andererseits hängt der Bewegungszustand eines Massenpunktes auch vom Beobachter beziehungsweise vom gewählten KS ab. In der Umgangssprache spricht man nur dann von Bewegung, wenn der Körper seine Lage relativ zu seiner näheren Umgebung ändert. „Es gibt Koordinatensysteme, in denen ein kräftefreier Körper (Massenpunkt) im Zustand der Ruhe oder der gradlinig gleichförmigen Bewegung verharrt.“¹⁶ Jene Systeme nennt man Inertialsysteme. Diese Feststellung bezeichnet man als das 1. Newton'sche Axiom oder auch als Trägheitsgesetz.

Für die gleiche Beschleunigung zweier Körper gleichen Volumens aber unterschiedlicher Dichte sind in inertialen Systemen unterschiedlich große Kraftanstrengungen notwendig. Der Körper setzt der Bewegungsänderung einen Trägheitswiderstand entgegen, der nicht von der Stärke der Kraft, sondern von seiner Masse abhängt. Andererseits werden zwei in Bezug auf Volumen und Dichte gleiche Körper, auf die eine verschieden große Kraft einwirkt, auch unterschiedlich stark beschleunigt.

Aus diesen Grunderfahrungstatsachen entwickelte Newton das zweite Axiom für Inertialsysteme (Gleichung (20)). Der Impuls beschreibt die Bewegungsgröße und ist definiert als das Produkt der Masse m und der Geschwindigkeit v . Die Änderung dieser Größe ist proportional zur Einwirkung der bewegenden Kraft. Die Kraft und die Änderung des Impulses haben die gleiche Richtung:

$$\vec{F} = \dot{\vec{p}} = \frac{d}{dt}(m_t \cdot \vec{v}). \quad (20)$$

In dieser Arbeit werden nur Fälle bearbeitet, in denen die Masse nicht zeitabhängig ist. Daraus folgt:

$$\vec{F} = m_t \frac{d}{dt} \vec{v} = m_t \dot{\vec{v}} = m_t \vec{a}. \quad (21)$$

Die Einheit der Kraft ist das Newton: $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$

Jeder Massenpunkt, auf den eine Kraft ausgerichtet ist, wirkt auch auf die Quelle der Kraft zurück. Das dritte Newton'sche Axiom, bekannt unter dem Ausdruck ‚Actio = Reactio, beschreibt diesen Zusammenhang. „Der Kraft, mit der die Umgebung auf einen Massenpunkt wirkt, entspricht stets eine gleich große, entgegengesetzt gerichtete Kraft, mit der der Massenpunkt zurückwirkt,...“.¹⁷

¹⁶ NOLTING, W. (2005): Grundkurs - Theoretische Physik 1. S. 118.

¹⁷ STEPHANI, H. et al. (1995): Theoretische Mechanik. S. 13.

$$F_{12} = -F_{21} \quad (22)$$

Greifen einen Massenpunkt mehrere Kräfte $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \dots$ an, so addieren sich diese vektoriell zu einer resultierenden Kraft:

$$\vec{F}_{Ges} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i \quad \text{mit } n = 0, 1, 2, 3, \dots^{18} \quad (23)$$

Durch die Kenntnis aller Kräfte, die auf einen Körper wirken, kann man dessen Bewegung berechnen und vorhersagen.

2.3 Inertialsysteme

Die Bewegung eines Massenpunktes kann nur relativ zu einem Bezugssystem definiert werden. Die Auswahl dieser Systeme kann jedoch beliebig erfolgen. Sind KS nur starr gegeneinander verschoben oder gedreht, hat dies keine Auswirkung auf die Beschreibung der Bewegung. Es ändern sich zwar die Koordinaten, aber nicht die Gestalt der Bahn, auf der sich der Massenpunkt bewegt oder der zeitliche Ablauf. Dies wird jedoch möglich, wenn sich die Bezugssysteme relativ zu einander bewegen. Die Newton'schen Axiome machen daher nur Sinn, wenn sie sich auf eine bestimmte Klasse von Bezugssystemen beziehen, die Inertialsysteme. In diesen bewegt sich ein kräftefreier Massenpunkt mit konstanter Geschwindigkeit auf einer Geraden.

Alle Systeme, die fest mit den Fixsternen verbunden sind, sind inertial. Wie man gleich noch sehen wird, sind auch alle Bezugssysteme inertial, die sich mit konstanter Geschwindigkeit gegen den Fixsternhimmel bewegen. Die Geschwindigkeiten in den Bezugssystemen unterscheiden sich in diesem Fall nur durch die konstanten Relativgeschwindigkeiten.

Man betrachte ein Bezugssystem S, dass fest mit dem Fixsternhimmel verbunden ist und ein weiteres Bezugssystem S', dass sich mit konstanter Relativgeschwindigkeit \vec{u} im System S bewegt. Die Vektoren in S' werden jeweils mit einem Strich gekennzeichnet. Ein Massenpunkt habe in den beiden Systemen jeweils den Ortsvektor \vec{r} und \vec{r}' . Für die Beziehung zwischen den beiden Ortsvektoren folgt (Abb. 4, S.11):

$$\vec{r} = \vec{u} \cdot t + \vec{r}' = r_0 + \vec{r}' \quad (24)$$

Für die Geschwindigkeit und Beschleunigung erhält man nach (2) und (3):

$$\vec{v} = \vec{u} + \vec{v}' \quad (25)$$

¹⁸ vgl. NOLTING, W. (2005): Grundkurs - Theoretische Physik 1 und STEPHANI, H. et al. (1995): Theoretische Mechanik.

$$\vec{a} = \vec{a}'. \quad (26)$$

„Die Beschleunigungen sind in allen Inertialsystemen gleich groß.“¹⁹

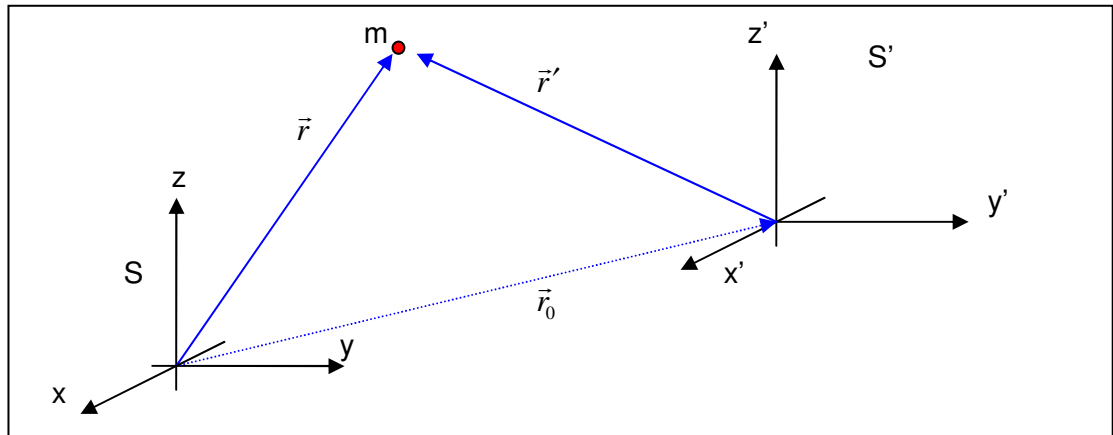


Abb. 4: Ortsvektor eines Massenpunktes in zwei relativ zueinander bewegten Koordinatensystemen nach Fließbach

Ein Inertialsystem S geht genau dann wieder in ein Inertialsystem S' über, wenn in S' wieder das erste Newton'sche Axiom gilt, das heißt, wenn aus $m\ddot{\vec{r}} = 0$ wieder $m\ddot{\vec{r}}' = 0$ folgt. Für Bezugssysteme mit konstanter Relativgeschwindigkeit ist diese Bedingung durch Gleichung (26) erfüllt.²⁰

2.4 Galilei-Transformation

Die Transformation in Formel (24), die die Ortsvektoren \vec{r} und \vec{r}' eines Massenpunktes mit der konstanten Relativgeschwindigkeit \vec{u} verbindet, heißt Galileitransformation. Diese ist die allgemeinste Transformation, die von einem Inertialsystem wieder auf ein solches führt.

Da $\ddot{\vec{r}} = \ddot{\vec{r}}'$ ist, sind die Beschleunigungen in beiden Systemen gleich groß. Des Weiteren hängen auch die Massen nicht von der Wahl des Inertialsystems ab, insofern die Relativgeschwindigkeit viel kleiner als die Lichtgeschwindigkeit ist. Aus der Beziehung (20) und (26) folgt:

$$m\ddot{\vec{r}} = m\ddot{\vec{r}}' \quad (27)$$

$$\Leftrightarrow \vec{F} = \vec{F}'. \quad (28)$$

¹⁹ KUYPERS, F. (2008): Klassische Mechanik. S. 3.

²⁰ vgl. NOLTING, W. (2005): Grundkurs - Theoretische Physik 1, KUYPERS, F. (2008): Klassische Mechanik und STEPHANI, H. et al. (1995): Theoretische Mechanik.

Das heißt, das zweite Newton'sche Axiom ist unter Galileitransformationen invariant. Inertialsysteme sind somit äquivalent für die Beschreibung physikalischer Gesetze.²¹

2.5 Beschleunigte und rotierende Bezugssysteme

Man betrachte ein Inertialsystem S und ein relativ zu S mit \vec{b} gradlinig beschleunigtes Bezugssystem S' . Für die Beziehung zwischen den Ortsvektoren \vec{r} und \vec{r}' eines Massenpunktes in den beiden Systemen gilt:

$$\vec{r} = \frac{1}{2}\vec{b} \cdot t^2 + \vec{u} \cdot t + \vec{r}' \quad (29)$$

Für die Geschwindigkeit und Beschleunigung erhält man nach (2) und (3):

$$\vec{v} = \vec{b} \cdot t + \vec{u} + \vec{v}' \quad (30)$$

$$\vec{a} = \vec{b} + \vec{a}' \quad (31)$$

Der kräftefreie Massenpunkt erfährt in S' eine zusätzliche Beschleunigung. Laut dem ersten Newton'schen Axiom handelt es sich bei gradlinig beschleunigten Bezugssystemen daher nicht um Inertialsysteme. Die Newton'schen Gesetze gelten daher im KS S' nicht. Somit ist für die Beschreibung der Bewegung die Wahl des Bezugssystems relevant.

Multipliziert man (31) mit der Masse erhält man:

$$m\vec{a} = m\vec{b} + m\vec{a}' \quad \Leftrightarrow \quad \vec{F} = \vec{F}' + m\vec{b} \quad (32)$$

Der zusätzliche Term $m\vec{b}$ ist auf die Beschleunigung des Systems S' relativ zu S zurückzuführen. Durch eine Transformation auf ein Inertialsystem könnte er wieder beseitigt werden und wird deshalb als Scheinkraft bezeichnet. Die Kraft wird zum Beispiel für Fahrzeuginsassen erlebbar, sobald das Auto abgebremst oder beschleunigt wird.²² „Die Einführung dieser Scheinkräfte ist nötig, wenn man auch in beschleunigten Bezugssystemen die physikalischen Vorgänge durch die Newton'schen Bewegungsgleichungen beschreiben will.“²³

Ein weiteres Beispiel für ein Nicht-Inertialsystem, ist ein Bezugssystem S' , das relativ zu einem Inertialsystem S mit der konstanten Winkelgeschwindigkeit ω um die z-Achse rotiert. Die Ursprünge von S und S' fallen zusammen. In diesem Fall ist die

²¹ vgl. KUYPERS, F. (2008): Klassische Mechanik und STEPHANI, H. et al. (1995): Theoretische Mechanik.

²² vgl. DEMTRÖDER, W. (2008): Experimentalphysik I und BRANDT, S. et al. (2005): Mechanik.

²³ BRANDT, S. et al. (2005): Mechanik. S. 132.

Verwendung von Zylinderkoordinaten sinnvoll. Für die Koordinaten in beiden Systemen gilt:

$$\rho = \rho' \quad (33)$$

$$\varphi = \varphi' + \omega t \quad (34)$$

$$z = z' \quad (35)$$

Die KS sind in Abbildung 5 unter Vernachlässigung der z-Koordinate dargestellt, da sich diese laut Gleichung (35) bei einer Koordinatentransformation nicht verändert.

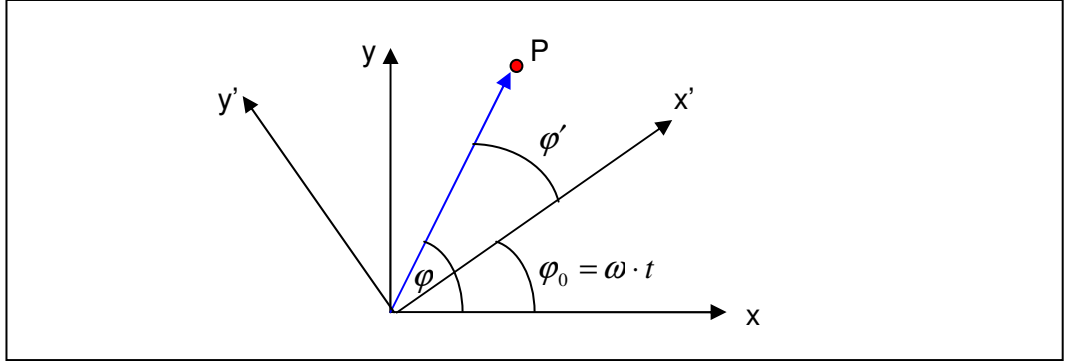


Abb. 5: Zwei relativ zueinander rotierende Bezugssysteme mit gleichem Ursprung nach Stephani

Für die Beschleunigung im Koordinatensystem S gilt nach (19) in Zylinderkoordinaten $\vec{a} = (\ddot{\rho} - \rho\dot{\varphi}^2)\vec{e}_\rho + (\rho\ddot{\varphi} + 2\dot{\rho}\dot{\varphi})\vec{e}_\varphi + \ddot{z}\cdot\vec{e}_z$. Für die Umrechnung auf das rotierende Koordinatensystem S' verwendet man die Gleichungen (33) bis (35) und deren Ableitungen:

$$\dot{\rho} = \dot{\rho}'; \quad \dot{\varphi} = \dot{\varphi}' + \omega; \quad \dot{z} = \dot{z}' \quad (36)$$

$$\ddot{\rho} = \ddot{\rho}'; \quad \ddot{\varphi} = \ddot{\varphi}'; \quad \ddot{z} = \ddot{z}' \quad (37)$$

und setzt sie in (19) ein:

$$\begin{aligned} \vec{a}' &= (\ddot{\rho}' - \rho'(\dot{\varphi}' + \omega)^2)\vec{e}_\rho + (\rho'\ddot{\varphi}' + 2\dot{\rho}'(\dot{\varphi}' + \omega))\vec{e}_\varphi + \ddot{z}'\cdot\vec{e}_z \\ &= (\ddot{\rho}' - \rho'\dot{\varphi}'^2 - 2\rho'\dot{\varphi}'\omega - \rho'\omega^2)\vec{e}_\rho + (\rho'\ddot{\varphi}' + 2\dot{\rho}'\dot{\varphi}' + 2\dot{\rho}'\omega)\vec{e}_\varphi + \ddot{z}'\cdot\vec{e}_z \\ &= (\ddot{\rho}' - \rho'\dot{\varphi}'^2)\vec{e}_\rho + (\rho'\ddot{\varphi}' + 2\dot{\rho}'\dot{\varphi}')\vec{e}_\varphi + \ddot{z}'\cdot\vec{e}_z - (2\rho'\dot{\varphi}'\omega + \rho'\omega^2)\vec{e}_\rho + 2\dot{\rho}'\omega\cdot\vec{e}_\varphi \\ \Leftrightarrow \quad \vec{a}' &= \vec{a} - 2\rho'\dot{\varphi}'\omega\cdot\vec{e}_\rho - \rho'\omega^2\cdot\vec{e}_\rho + 2\dot{\rho}'\omega\cdot\vec{e}_\varphi. \end{aligned} \quad (38)$$

$$\Leftrightarrow \quad \vec{a} = \vec{a}' + 2\rho'\dot{\varphi}'\omega\cdot\vec{e}_\rho + \rho'\omega^2\cdot\vec{e}_\rho - 2\dot{\rho}'\omega\cdot\vec{e}_\varphi \quad (39)$$

Wäre S' ein Inertialsystem, so müsste $\vec{a}' = \vec{a}$ sein. Da jedoch Zusatzkräfte auftreten, handelt es sich nicht um solch ein System. Man nennt diese außerdem auftretenden Kräfte Scheinkräfte, obwohl sie sehr reale Auswirkungen haben.

Sie treten in Nicht-Inertialsystemen auf, um dort „gewissermaßen die Newton-Mechanik „in Ordnung [zu] bringen“. Sie sorgen dafür, dass ein kräftefreier Massenpunkt im Nicht-Inertialsystem (...) eine solche Scheinkraft erfährt, dass er vom Inertialsystem (...) aus gesehen, eine gradlinig gleichförmige Bewegung ausführt.“²⁴ Charakteristisch für Scheinkräfte ist, dass sie im Unendlichen nicht verschwinden. „Kräfte, die tatsächlich zwischen Körpern wirken [wie z.B. die Gravitationskraft], nehmen erfahrungsgemäß mit zunehmender Entfernung ab.“²⁵

Die in Gleichung (39) zusätzlich auftretende Beschleunigung

$$\vec{a}_C = -2\dot{\rho}'\omega \cdot \vec{e}_\varphi \quad (40)$$

nennt man Coriolis-Beschleunigung. Multipliziert man auf beiden Seiten mit der Masse m , erhält man die Coriolis-Kraft:

$$\vec{F}_C = m\vec{a}_C = -2m\dot{\rho}'\omega \cdot \vec{e}_\varphi \quad (41)$$

Diese Beschleunigung ist proportional zur Winkelgeschwindigkeit der Drehachse und zur radialen Geschwindigkeit eines Massenpunktes. Daher wirkt die Coriolis-Kraft nur auf Körper, die sich in radialer Richtung bewegen, das heißt, ihren Abstand zur Drehachse verändern. Die Bewegung in z-Richtung, demnach parallel zur Drehachse, spielt für die Coriolis-Beschleunigung keine Rolle.

Der Einheitsvektor \vec{e}_φ zeigt immer in die Gegenrichtung des Uhrzeigersinns (Abb. 3, S. 7). Aufgrund des Minus in Gleichung (41) zeigt die Coriolis-Kraft bezogen auf die Rotationsachse in Richtung des Uhrzeigersinns (Abb. 6), wenn die übrigen Größen positiv sind (siehe auch Gleichung 45 im nächsten Abschnitt).²⁶

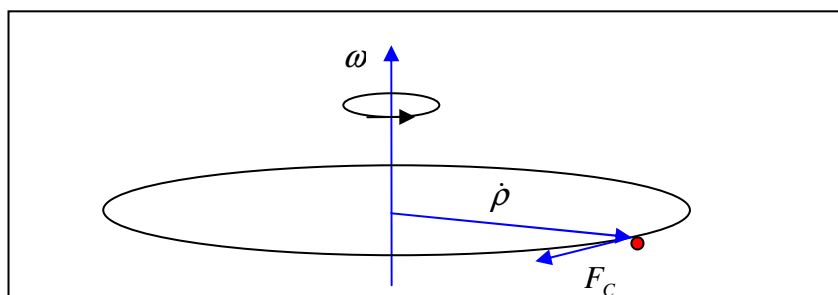


Abb. 6: Zur Richtung der Coriolis-Kraft

Jeder Mensch, der sich zum Beispiel auf einer rotierenden Scheibe von der Mitte nach außen oder andersherum bewegt, wird diese ablenkende Kraft spüren. In Paris in der

²⁴ NOLTING, W. (2005): Grundkurs - Theoretische Physik 1. S. 128.

²⁵ WESS, J. (2008): Theoretische Mechanik. S. 13.

²⁶ vgl. NOLTING, W. (2005): Grundkurs - Theoretische Physik 1 und STEPHANI, H. et al. (1995): Theoretische Mechanik.

Cite de la science gibt es einen geschlossenen rotierenden Raum, in dem jeder Besucher die Coriolis-Kraft erleben kann.²⁷

Als weitere Scheinkraft tritt die Zentrifugalbeschleunigung bzw. Zentrifugalkraft in Gleichung (39) auf:

$$\vec{a}_Z = \rho' \omega^2 \cdot \vec{e}_\rho \quad (42)$$

$$\Leftrightarrow \quad \vec{F}_Z = m \rho' \omega^2 \cdot \vec{e}_\rho \quad (43)$$

Diese Beschleunigung ist proportional zum Quadrat der Winkelgeschwindigkeit sowie zum radialen Abstand und zeigt in Richtung des Einheitsvektors \vec{e}_ρ . Sie macht sich zum Beispiel bei einer Fahrt durch eine Kurve bemerkbar.²⁸

2.6 Beliebige beschleunigte Bezugssysteme

Fest auf der Erde verankerte Bezugssysteme sind aufgrund der Erdrotation und der beschleunigten Translationsbewegung der Erde im Weltraum nicht exakt inertial. Vor allem sehr großräumige oder lang andauernde Bewegungen, wie beispielsweise die Windzirkulationen oder die Meeresströmungen, werden entscheidend durch die Erdrotation beeinflusst.

Ein Bezugssystem S' wird relativ zu einem Inertialsystem S beliebig beschleunigt. Die Relativbewegung von S und S' kann man sich vorstellen als Bewegung des Ursprungs von S' und einer Drehung der Achsen von S' um diesen Ursprung, jeweils relativ gesehen zu S .

An dieser Stelle wird auf die Berechnung der Beschleunigung im Bezugssystem S' verzichtet, da sie sehr komplex, aber wenig nützlich ist. Das Ergebnis lautet gemäß Wolfgang Nolting:

$$\vec{a}' = \vec{a} - \vec{r}_{00} - \vec{\omega} \times [\vec{\omega} \times \vec{r}'] - 2m\vec{\omega} \times \vec{v}' - m\vec{\omega} \times \vec{r}'. \quad (44)$$

\vec{a}' und \vec{a} stehen jeweils für die Beschleunigungen eines Massenpunktes in den Systemen S und S' . Die restlichen Terme entstehen aufgrund der Beschleunigung des Bezugssystems S' und können durch die Transformation auf ein Inertialsystem beseitigt werden. Die Bewegung des Massenpunktes verläuft aufgrund Gleichung (44) im

²⁷ vgl. Cité des Sciences et de l'Industrie: The inertial merry-go-round.

²⁸ vgl. STEPHANI, H. et al. (1995): Theoretische Mechanik.

Nicht-Inertialsystem wiederum gerade so kompliziert, damit sie im Inertialsystem S gradlinig ist.²⁹

Die vier Beschleunigungen sollen kurz beschrieben werden:

$\vec{r}_{00'}$ geht auf die Beschleunigung des Koordinatenursprungs $0'$ des Bezugssystems S' relativ zum System S zurück. Die nächsten beiden Terme stehen für die bereits weiter oben erwähnte Zentrifugalbeschleunigung und die Coriolis-Beschleunigung.

Multipliziert man die Terme mit m erhält man für die Coriolis-Kraft (C-K) in der Vektorschreibweise:

$$\vec{F}_C = -2m \cdot \vec{\omega} \times \vec{v}' . \quad (45)$$

Das Vektorprodukt in Gleichung (45) $\vec{\omega} \times \vec{v}'$ verdeutlicht noch einmal, dass die Coriolis-Beschleunigung senkrecht auf der Geschwindigkeit des Massenpunktes und der Rotationsachse steht und so zu interessanten Effekten führt, auf die im nächsten Kapitel eingegangen wird. Die Richtung der C-K erhält man durch die Anwendung der Rechten-Hand-Regel. Der Daumen zeigt in Richtung von $\vec{\omega}$, die dem Drehsinn einer Rechtsschraube senkrecht zur Bewegungsebene entspricht (Abb. 6, S. 14), der Zeigefinger zeigt in Richtung von \vec{v}' . Die Richtung der C-K wird durch den Mittelfinger angegeben. Zwischen allen Finger muss ein rechter Winkel bestehen. Aufgrund des Minus in Gleichung (45) muss man die erhaltene Richtung dann noch einmal um 180° drehen (Abb. 6, S. 14).

Der letzte Term ist bei einer nichtgleichförmigen Rotation ungleich 0.³⁰

2.7 Kräfte

Die auf ein Luftteilchen wirksamen Kräfte sind die Druckgradient-, die Schwer- und die Reibungskraft sowie die bereits besprochene Zentrifugal- und Coriolis-Kraft. Für das Verständnis von Kapitel 3 sind diese von Bedeutung, daher werden die noch nicht erwähnten Kräfte hier kurz erläutert.

Die Schwerkraft

$$\vec{F}_G = m \cdot \vec{g} \quad (46)$$

bzw. die Schwerebeschleunigung g ist im Vergleich zu den anderen in der Atmosphäre auftretenden Beschleunigungen sehr groß und ist die Ursache für das Gewicht aller Körper auf der Erde. Sie resultiert aus der Gravitationsanziehung zwischen zwei Mas-

²⁹ vgl. NOLTING, W. (2005): Grundkurs - Theoretische Physik 1.

³⁰ vgl. STEPHANI, H. et al. (1995): Theoretische Mechanik und KUYPERS, F. (2008): Klassische Mechanik.

sen. Die Gravitationskraft, die von der Erde auf einen Massenpunkt, z.B. ein Luftteilchen ausgeübt wird, ist proportional zur Masse des Teilchens. Nach dem dritten Newton'schen Gesetz gibt es eine gleich große Gegenkraft. Aus Symmetriegründen sollte diese proportional zur Masse der Erde sein. Da die Masse der Erde jedoch um ein Vielfaches größer ist als die Masse eines Luftteilchens, ist die Gravitationsbeschleunigung des Teilchens auf die Erde minimal und kann vernachlässigt werden, während die Gravitationswirkung der Erde auf alle sie umgebenden Teilchen erhebliche Auswirkungen hat. Da die Erde keine ideale Kugel ist und damit keinen idealen Massenpunkt darstellt, ist die anziehende Gravitationskraft der Erde nicht immer genau auf ihren Mittelpunkt hin gerichtet, sondern steht senkrecht auf der Erdoberfläche und ist im Betrag abhängig vom Breitenkreis und der Höhe über dem Meeresspiegel.

Wird im Gravitationsgesetz

$$\vec{F} = \gamma \frac{m_1 \cdot m_2}{r_{12}^2} \vec{e}_r \quad (47)$$

die Masse der Erde für m_1 und der Radius der Erde für r_{12} eingesetzt, erhält man die Schwerkraft (Gleichung (46)), die auf jeden Massenpunkt auf der Erde wirkt. γ wird Gravitationskonstante genannt.³¹

Aufgrund von Temperaturunterschieden oder eines für eine bestimmte Anzahl an Molen unterschiedlich großen zur Verfügung stehenden Volumens, variiert laut der idealen Gasgleichung $pV = nRT$ der Druck von Gasen oder auch Flüssigkeiten. Dabei steht n für die Anzahl der Mole, R ist die Rydberg-Konstante. Variiert der Druck in einem Fluid, so entsteht ein Druckgradient vom Gebiet mit einem höheren Druck zum Gebiet mit einem niedrigeren Druck. Dieser bewirkt eine Kraft, die die Teilchen entlang des Gradienten beschleunigt, bis sich ein Druckausgleich eingestellt hat.³²

Reibung ist auf der Erde allgegenwärtig. Sie entsteht, wenn sich zwei Körper mit einer räumlich ausgedehnten Oberfläche berühren und relativ zueinander bewegen. Die Reibungskraft „hängt von dem Betrag der Geschwindigkeit ab und ist der Bewegung, d.h. der Geschwindigkeit, entgegengerichtet.“³³ In höheren Schichten der Atmosphäre wird die Reibung immer geringer, da der Druck mit der Höhe abnimmt und sich die Teilchen immer seltener berühren. Im Vakuum des Weltraumes gibt es keine Reibung mehr.³⁴

³¹ vgl. DEMTRÖDER, W. (2008): Experimentalphysik und KLOSE, B. (2008): Meteorologie.

³² vgl. KLOSE, B. (2008): Meteorologie und HÄNSEL, H. et al. (1993): Physik.

³³ STEPHANI, H. et al. (1995): Theoretische Mechanik. S. 16.

³⁴ vgl. DEMTRÖDER, W. (2008): Experimentalphysik I und STEPHANI, H. et al. (1995): Theoretische Mechanik.

In Kapitel 3 werden diese Kräfte noch einmal auf Luftteilchen und ihre Bewegung bezogen sowie die Auswirkungen auf das globale Windsystem dargestellt.

2.8 Erhaltungssätze

Die C-K lässt sich zwar nicht vollständig mit Hilfe der Erhaltungssätze herleiten, aber ihre Wirkungsweise kann durch diese sehr gut veranschaulicht werden. Aus diesem Grund sollen hier einige Erhaltungssätze und ihre Auswirkung auf die Bewegung eines Teilchens vorgestellt werden.

Wenn auf einen Körper keine äußeren Kräfte \vec{F}_{ex} einwirken, so bleibt der Gesamtimpuls \vec{P} in Richtung und Betrag konstant:

$$\vec{F}_{ex} = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \vec{P} = const. \quad (48)$$

Dabei bezeichnet man als Gesamtimpuls die Summe aller einzelnen Impulse.

Analog gilt, wenn kein äußeres Drehmoment \vec{M}_{ex} vorhanden ist, so bleibt der Gesamtdrehimpuls erhalten:

$$\vec{M}_{ex} = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \vec{L} = const. \quad (49)$$

Zwischen dem Drehimpuls und dem Impuls (Abb.7) sowie der Kraft und dem Drehmoment bestehen folgende Zusammenhänge:

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{P} \quad (50)$$

und $\vec{M}_{ex} = \vec{r} \times \vec{F}_{ex}. \quad (51)$

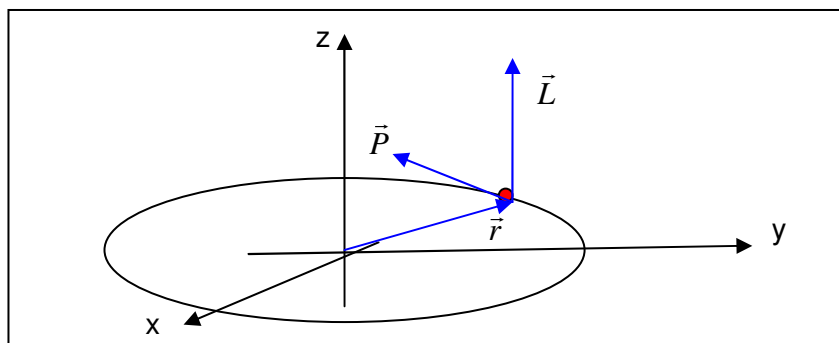


Abb. 7: Zur Richtung des Drehimpulsvektors

Laut Gleichung (20) gilt für den Impuls bei konstanter Masse:

$$\vec{P} = m \cdot \vec{v}. \quad (52)$$

Setzt man (52) in (51) für den Impuls, folgt:

$$\vec{L} = \vec{r} \times (m \cdot \vec{v}) = m \cdot \vec{r} \times \vec{v}. \quad (53)$$

Bewegt sich ein Massenpunkt mit der Winkelgeschwindigkeit $\vec{\omega}$ auf einer Kreisbahn mit dem Radiusvektor \vec{r} , so folgt für seine Bahngeschwindigkeit \vec{v} :

$$\vec{v} = \vec{\omega} \times \vec{r} \quad (54)$$

Unter Verwendung dieser Beziehung erhält man für den Bahndrehimpuls:

$$\vec{L} = m \cdot \vec{r} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}). \quad (55)$$

Laut dem Entwicklungssatz für das doppelte Vektorprodukt gilt:

$$\vec{L} = m(\vec{\omega}(\vec{r} \cdot \vec{r}) - \vec{r}(\vec{r} \cdot \vec{\omega})) = m \cdot \vec{\omega} \cdot r^2. \quad (56)$$

Der zweite Term in Gleichung (56) fällt weg, da \vec{r} und $\vec{\omega}$ senkrecht aufeinander stehen und ihr Skalarprodukt damit Null ergibt. Der Drehimpulsvektor hat damit die gleiche Richtung wie die Winkelgeschwindigkeit und ist proportional zu dieser sowie zum Quadrat des Radius der Rotationsbahn.

Man betrachte ein Luftteilchen, das auf einem bestimmten Breitenkreis auf der Nordhalbkugel mit der gleichen Geschwindigkeit wie die Erde um diese rotiert. Bewegt sich das Teilchen in nördliche oder südliche Richtung, so verändert sich sein Abstand r zur Rotationsachse. Da der Bahndrehimpuls des Luftteilchens jedoch erhalten bleibt, muss sich die Winkelgeschwindigkeit entsprechend Gleichung (56) verändern.

Vermindert sich z.B. der Abstand zur Achse, so wird die Winkelgeschwindigkeit deutlich erhöht. Das bedeutet, dass ein Teilchen, das sich in nördliche Richtung bewegt, schneller rotiert, als die Teilchen, die sich bereits auf dieser Bahn befinden. Es wird, bildlich gesprochen, nach rechts abgelenkt. Analog kann man diesen Gedanken für die Bewegung in südlicher Richtung und auf der Südhalbkugel formulieren.³⁵

³⁵ vgl. BRANDT, S. et al. (2005): Mechanik, NOLTING, W. (2005): Grundkurs - Theoretische Physik und KUYPERS, F. (2008): Klassische Mechanik.

3 DIE CORIOLIS-KRAFT IN DEN GEOWISSENSCHAFTEN

Die Coriolis-Kraft hat sehr vielfältige Auswirkungen mit erheblichen Folgen für das globale Klimasystem. Die Ablenkung der Winde und der Meeresströmungen ist hier besonders hervorzuheben.

Norbert Schirra beschreibt in seinem Buch über die C-K fünf Phänomene, die auf ihr beruhen. Der Coriolis-Effekt, der sich auf die Ablenkung der Winde bezieht, ist das Hauptthema in seinem Werk. Des Weiteren erfolgt die Betrachtung des Asymmetrie-Effekts, bei dem die Flüsse das Flussbett auf der rechten Seite mehr auswaschen als auf der linken Seite, und des Ostablenkungs-Effekts. Hierbei erfährt ein frei fallender Körper auf der nördlichen Halbkugel eine Ostabweichung. Der Eötvös-Effekt erklärt die Änderung der Fallbeschleunigung g eines sich auf der Erde bewegenden Körpers in Abhängigkeit von seiner Geschwindigkeit und Richtung. Zuletzt beschreibt Schirra den Foucault-Effekt, der einen Nachweis der Erdrotation darstellt.³⁶

Da die C-K im Geographieunterricht der Schule lediglich im Zusammenhang mit der Windablenkung erwähnt wird, wird sich dieses Kapitel auch nur mit dieser befassen. Es dient als Basis zur Überprüfung, ob das geowissenschaftliche Phänomen auch korrekt in den weiter unten vorgestellten Unterrichtsbeispielen präsentiert wird. Darüber hinaus stellt es das benötigte Fachwissen für eine Unterrichtsreihe zum Thema Klimazonen bereit.

3.1 Astrophysikalische Grundlagen

Die Sonneneinstrahlung ist der primäre Motor der Klimaprozesse. Sie variiert jedoch sowohl räumlich als auch zeitlich stark aufgrund der Tages- und Jahresgänge der Erde. Ferner beeinflussen die Neigung der Erde sowie ihre kreisförmige Gestalt den Einfallswinkel der Sonnenstrahlen erheblich. Je geringer dieser Winkel auf der Erde ist, desto geringer ist die Einstrahlungsintensität:

$$I = I_0 \cdot \cos \alpha . \quad (57)$$

Die Solarkonstante $I_0 = 1368 \text{ Wm}^{-2}$ gibt den Strahlungsfluss durch ein Flächenelement bei senkrechtem Sonnenstand an, das heißt für den Sonnenzenitwinkel $\alpha = 0^\circ$. Bei schrägem Einfall der Sonne, z.B. $\alpha = 60^\circ$ muss der gleiche Strahlungsfluss aufgrund der Schrägprojektion auf eine größere horizontale Fläche verteilt werden (siehe Abb. 8, S. 21). Man erhält mit Gleichung (57) für $\alpha = 60^\circ$ den Strahlungsfluss von

³⁶ vgl. SCHIRRA, N. (o. A.): Coriolis-Kraft.

$I = 684 \text{ Wm}^{-2}$. Mit abnehmender Sonnenhöhe nimmt daher auch die verfügbare Solarstrahlung ab. Die kreisförmige Gestalt der Erde kann bei der Betrachtung sehr kleiner Flächenelemente vernachlässigt werden.³⁷

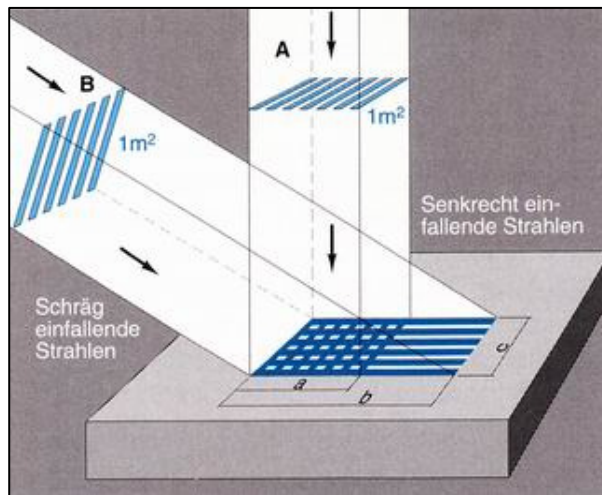


Abb. 8: Einfallswinkel der Sonnenstrahlen³⁸

Die Erde umläuft die Sonne (Erdrevolution) gegen den Uhrzeigersinn in 365 $\frac{1}{4}$ Tagen auf einer Ebene, die auch Ebene der Ekliptik genannt wird. Die Umlaufbahn ist eine Ellipse, in deren einem Fixpunkt die Sonne liegt. Wenn auf der Nordhalbkugel Sommer ist, ist die Erde 5 Millionen Kilometer weiter von der Sonne entfernt als im Winter (siehe Abb. 9, S. 22). Die größte Sonnennähe wird Perihel genannt, die größte Sonnenferne wird als Aphel bezeichnet.

Die Erde rotiert an einem Tag einmal von West nach Ost um ihre Drehachse. Diese ist gegenüber der Senkrechten auf der Ebene der Ekliptik um etwa 23,5° geneigt. Dieser Winkel variiert zwischen 21,5° und 24,5° bei einer Schwingungsdauer von 41.000 Jahren. Die Folge dieser Schiefe der Ekliptik sind unterschiedliche Bestrahlungen der Erdoberfläche im Jahresverlauf und somit die Jahreszeiten. Am 21. Juni ist die Nordhalbkugel der Sonne maximal zugewandt, während die Südhalbkugel am stärksten am 22. Dezember zur Sonne geneigt ist. Dies wird auch als Solstitialstand bezeichnet. Die Veränderung der Stellung der Sonne zur Erde bewirkt einen ständigen Wechsel der Tag- und Nachtlängen (siehe Abb. 9, S. 22).

Am stärksten macht sich dieser Wechsel an den Polen bemerkbar, wo es im Dezember und Juni jeweils zur Polarnacht bzw. zum Polartag kommt. Entsprechend des Einfallswinkels der Sonnenstrahlen erhöht oder verringert sich die Einstrahlungsintensität der Sonne und damit auch die Erwärmung der Erdoberfläche.

³⁷ vgl. STRAHLER, A. et al. (2002): Physische Geographie und LAUER, W. et al. (2004): Klimatologie.

³⁸ STRAHLER, A. et al. (2002): Physische Geographie. S. 60.

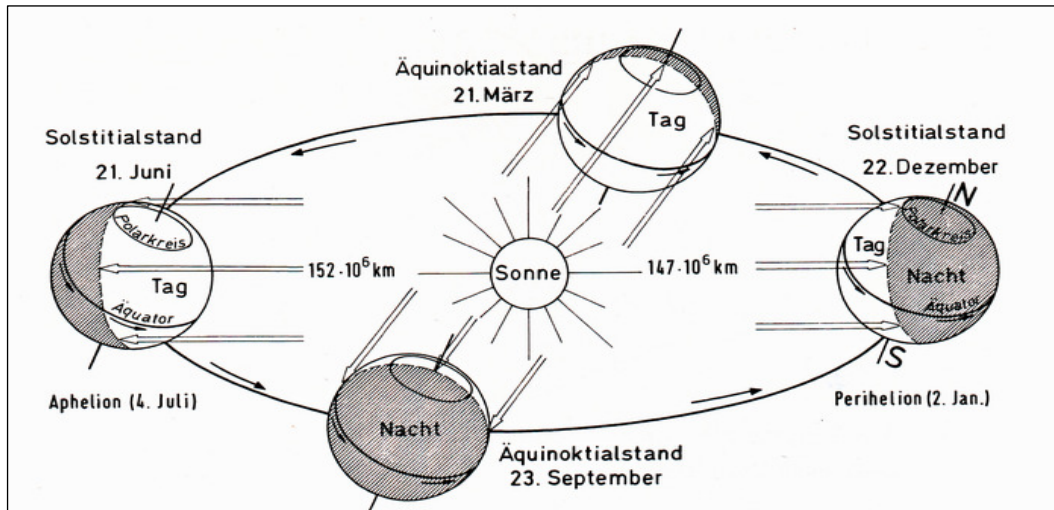


Abb. 9: Die Entstehung der Jahreszeiten durch Erdrevolution und Schiefe der Ekliptik³⁹

Das Nordende der Erdachse bleibt trotz der Bewegungen und Rotation des Erdkörpers konstant auf den Polarstern gerichtet.⁴⁰

Insgesamt bewirken die Erdrotation, die Erdrevolution und die Schiefe der Ekliptik eine unterschiedliche Beleuchtung des Erdkörpers. Diese äußert sich in der Strahlungsdauer und -intensität im jahreszeitlichen und tageszeitlichen Ablauf.

3.2 Luftdruck

Die Erde besitzt eine Lufthülle, die Atmosphäre. Sie besteht aus einem Gasgemisch mit den Hauptbestandteilen Stickstoff, Sauerstoff, Argon, Kohlendioxid und Wasserdampf, wobei die zuletzt genannte Komponente variabel ist. Der Zustand der Luft kann durch die drei Zustandsgrößen Druck p , Temperatur T und Dichte ρ angegeben werden. Ihr Zusammenhang wird durch die ideale Gasgleichung beschrieben:

$$pV = nRT. \quad (58)$$

R ist die allgemeine Gaskonstante und n steht für die Anzahl der Mole.

„Der Druck auf einen Quadratzentimeter der Landoberfläche kann als das tatsächliche Gewicht einer Luftsäule aufgefasst werden, die mit einem Querschnitt von 1 cm^2 vom Boden bis zur Außengrenze der Atmosphäre reicht (...).“⁴¹ Das Gewicht der Luftsäule entspricht der Kraft F , die durch die Wirkung der Gravitation auf eine Masse von einem Kilogramm Luft entsteht:

³⁹ LAUER, W. et al. (2004): Klimatologie. S. 23.

⁴⁰ vgl. STRAHLER, A. et al. (2002): Physische Geographie, LAUER, W. et al. (2004): Klimatologie und SCHÖNWIESE, C.-D. (2008): Klimatologie.

⁴¹ STRAHLER, A. et al. (2002): Physische Geographie. S. 37.

$$p = \frac{F}{A} = \frac{m \cdot g}{A} . \quad (59)$$

Für die Einheit gilt daher: $1[p] = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2 \cdot \text{m}^2} = 1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 1 \text{Pa} = 10^{-2} \text{mbar} .$

Der Druck wirkt in alle Richtungen auf jede feste und flüssige Oberfläche, da er sich als statistische Größe aus den Bewegungen bzw. Stößen der vielen frei beweglichen Gasmoleküle ergibt.

Da Luft durch die Wirkung der Erdanziehung bzw. Gravitationskraft kompressibel ist, werden aufgrund der größeren Auflast die untersten Luftschichten stärker zusammengedrückt als die oberen. Je stärker die Luft zusammengepresst wird, desto öfter stoßen die Luftteilchen aneinander und desto höher ist der Druck. Daher nehmen die Dichte und der Druck mit der Höhe ab.

Weil „bei einer Zunahme der Höhe dz über dem Meeresspiegel die vertikale Erstreckung der darüber liegenden Luftsäule abnimmt, verringert sich der hydrostatische Druck um

$$dp = -\rho \cdot g \cdot dz .^{42} \quad (60)$$

Wie in Abbildung 10 zu sehen ist, erfolgt diese Abnahme exponentiell.⁴³

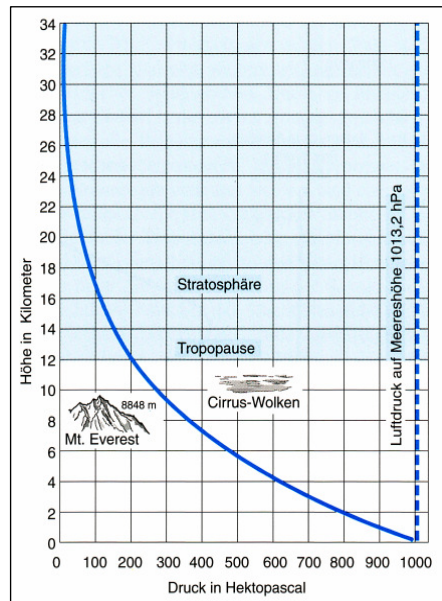


Abb. 10: Die Abnahme des Luftdrucks mit der Höhe⁴⁴

Insgesamt beträgt die Masse der Atmosphäre mehrere 10^{15} t. „Unter der Wirkung der Schwerkraft lastet sie auf Meeresniveau im Mittel auf jedem Quadratmeter der Erd-

⁴² KLOSE, B. (2008): Meteorologie. S. 67.

⁴³ vgl. KRAUS, H. (2004): Die Atmosphäre der Erde und KLOSE, B. (2008): Meteorologie, STRAHLER, A. et al. (2002): Physische Geographie und HÄCKEL, H. (1999): Meteorologie.

⁴⁴ STRAHLER, A. et al. (2002): Physische Geographie. S. 39.

oberfläche mit einer Kraft von $1,01 \times 10^5 \text{ N}$. Das entspricht einem Druck von 1013 bar (...).⁴⁵

3.3 Entstehung horizontaler Druckgradienten

Der Luftdruck hat eine herausragende Bedeutung für das Wettergeschehen im Klimasystem, da von seiner Verteilung die Entstehung von Luftbewegungen und atmosphärischen Zirkulationen abhängt.

In einer ruhenden Atmosphäre ist der Druck laut Gleichung (60) in einer bestimmten Höhe über dem Meeresspiegel überall gleich. Die Flächen gleichen Luftdrucks werden Isobaren genannt. Bei einer zweidimensionalen Betrachtung spricht man von Linien.

Ist die Rate der vertikalen Druckabnahme lokal erniedrigt, so sind die Isobaren an dieser Stelle A im Vergleich zur Umgebung B erhöht. Auf einer bestimmten Höhe nimmt der Luftdruck von A nach B ab (rote Linie in Abb.11)

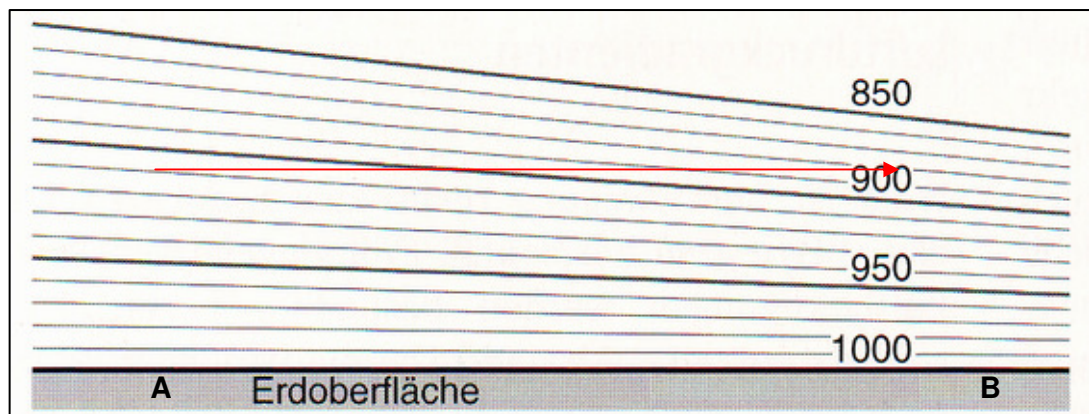


Abb. 11: Isobarenlinien und der Luftdruckgradient⁴⁶

Diese Veränderung des Luftdrucks auf einer horizontalen Fläche über der Erdoberfläche stellt ein Druckgefälle dar, den Luftdruckgradienten. Dieser ist von höheren zum tieferen Druck hin gerichtet. „Wo ein Luftdruckgradient vorhanden ist, besteht für die Luftmoleküle die Tendenz, sich in Richtung jenes Gradienten zu bewegen. Diese Tendenz zur Massenbewegung der Luft wird Luftdruckgradientkraft genannt.“⁴⁷ Diese versucht stets die horizontalen Druckunterschiede auszugleichen.

Die Änderung der vertikalen Druckabnahme wird durch unterschiedliche Temperaturen der Luft bewirkt, die wiederum zu Volumen- und Dichteänderung führen. In der realen Atmosphäre befinden sich nebeneinander mehrere Luftsäulen mit jeweils unterschied-

⁴⁵ HÄCKEL, H. (1999): Meteorologie. S. 34.

⁴⁶ STRAHLER, A. et al. (2002): Physische Geographie. S. 98.

⁴⁷ STRAHLER, A. et al. (2002): Physische Geographie. S. 98.

lichen Temperaturen. Gründe dafür liegen in der räumlich unterschiedlichen Strahlungsbilanz an der Erdoberfläche. Während solare Strahlung, die die Luftteilchen empfangen, bei Vernachlässigung des Wasserdampfs und der Wolken nur vom Abstand zur Sonne abhängt, kommt es bei der Strahlung der Erde auf ihre Erwärmung und damit auf den Einfallswinkel der solaren Strahlung, die Albedo und die spezifische Wärmekapazität der an der Erdoberfläche anstehenden Materie an.

Je mehr die Luft von der Erdstrahlung und durch Wärmeleitung erwärmt wird, desto größer ist die Bewegungsenergie der einzelnen Luftteilchen. Sie stoßen viel häufiger aneinander als die Luftteilchen in benachbarten Luftschichten über kühleren Oberflächen. Die Folge ist eine Ausdehnung der Luft in alle Richtungen, sodass die Abnahme des Luftdrucks mit der Höhe über dieser Fläche herabgesetzt wird. Das heißt, der Luftdruck ist in einer bestimmten Höhe über der warmen Fläche höher als der Luftdruck über der kalten Fläche. Der Druckgradient zeigt von der wärmeren Luftschicht zur kühleren und nimmt mit der Höhe zu.⁴⁸

3.4 Gradientwind und thermische Zirkulation

Wind entsteht immer dann, wenn an zwei Orten unterschiedlicher Druck herrscht. Je höher der horizontale Druckgradient ist, desto größer ist die Gradientkraft, die versucht, den Druckunterschied auszugleichen, und der daraus resultierende Gradientwind.

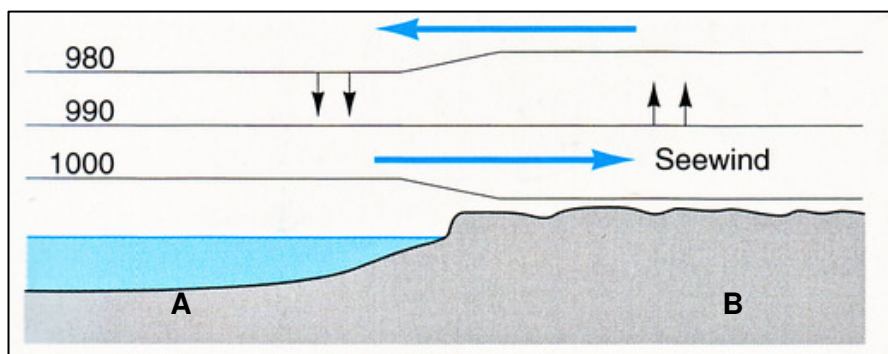


Abb. 12: Entstehung einer thermischen Zirkulation⁴⁹

Eine Land- und eine Wasseroberfläche werden aufgrund ihrer unterschiedlichen spezifischen Wärmekapazität und des unterschiedlich effektiven Wärmetransports in die Landmasse bzw. in den Wasserkörper verschieden stark erwärmt. Die Erdoberfläche erwärmt sich tagsüber schneller und damit auch die darüber liegenden Luftschichten.

⁴⁸ vgl. LAUER, W. et al. (2004): Klimatologie, STRAHLER, A. et al. (2002): Physische Geographie und SCHÖNWIESE, C.-D. (2008): Klimatologie.

⁴⁹ STRAHLER, A. et al. (2002): Physische Geographie. S. 99.

Wie oben beschrieben, entsteht in der Höhe ein Gradientwind vom Hochdruckgebiet über dem Land (A) zum Tiefdruckgebiet über dem Wasser (B). Aufgrund der Luftmassenbewegung lasten auf der Oberfläche B mehr Luftteilchen als auf der Oberfläche A. Die Folge ist ein bodennahes Hochdruckgebiet über B und ein bodennahes Tiefdruckgebiet über A. Daraus folgt ein bodennaher Luftstrom vom Wasser zum Land, der Seewind. Den horizontalen Luftmassenbewegungen folgen vertikale Strömungen, so dass es insgesamt zu einer thermisch bedingten Zirkulation kommt (Abb. 12, S. 25). Die Voraussetzung für die Ausbildung solch eines Zirkulationssystems ist ein genügend großer Druckgradient.

Nachts kehren sich die Verhältnisse unter Umständen um, nämlich wenn die Landoberfläche deutlich stärker auskühlt als die Wasseroberfläche. Die gleiche Betrachtung kann man für die Erwärmung des Äquators im Vergleich zu den Polen, oder von Berg und Tal, Land und Stadt, sowie Feld und Wald machen.⁵⁰

3.5 Zirkulationselemente der reibungsfreien Troposphäre: Coriolis-Kraft, geostrophischer Wind und Zentrifugalkraft

Wenn die Erde nicht um ihre Achse rotieren würde, würden sich die Winde immer entlang des Luftdruckgradienten bewegen. Wie in Kapitel 2 hergeleitet, verursacht die Rotation jedoch die Coriolis- und die Zentrifugalbeschleunigung.

Am Äquator hat jeder Punkt der Erdoberfläche und jedes aufgrund der Gravitationskraft mitrotierende Teilchen eine Geschwindigkeit von 1667 km/h. Polwärts nimmt diese Geschwindigkeit laut Gleichung (54) aufgrund der geringeren Entfernung zur Rotationsachse ab. Sie beträgt z.B. bei 60° Breite 835 km/h, an den Polen selbst verschwindet sie völlig.

Bewegt sich ein Luftpaket entlang eines Längengrades vom Äquator in Richtung des Nordpols, so ändert sich sein Abstand zur Rotationsachse. Das Teilchen besitzt daher eine radiale Geschwindigkeit \dot{r} bzw. \vec{v}' . Laut Gleichung (45), $\vec{F}_C = -2m \cdot \vec{\omega} \times \vec{v}'$, wird dieses Luftpaket nach rechts abgelenkt. Aussagen über die Stärke der Kraft, kann man durch die Betrachtung des Betrages treffen:

$$F_C = -2m \cdot \omega \cdot v \cdot \sin \alpha \quad (61)$$

Je näher man dem Äquator kommt, desto geringer wird die C-K, da „sich mit abnehmender geographischer Breite die Entfernung zur Rotationsachse der Erde pro Grad

⁵⁰ vgl. HÄCKEL, H. (1999): Meteorologie und LAUER, W. et al. (2004): Klimatologie.

Breitenänderung immer weniger ändert.⁵¹ Dies kommt durch den Sinus in Gleichung 61 zum Ausdruck.

Betrachtet man auf der Nordhalbkugel zwei Gebiete unterschiedlichen Luftdrucks p_1 und p_2 sowie unterschiedlicher geographischer Breite, zeigt die Gradientkraft immer vom Hochdruckgebiet p_1 zum Tiefdruckgebiet p_2 (Abb. 13). Ein Teilchen, das sich entlang des Gradienten bewegt, wird in jedem Moment seiner Bewegung durch die C-K erfasst und um 90° nach rechts abgelenkt (Abb. 6, S. 14). Während die Richtung der Gradientkraft unverändert bleibt, richtet sich die C-K immer wieder neu aus. Die resultierende Richtung des Luftteilchens ändert sich solange, bis die C-K der Gradientkraft genau entgegenwirkt und ein Kräftegleichgewicht resultiert. Das Luftteilchen wird entlang der Resultierenden aus Gradient- und Coriolis-Kraft beschleunigt, was einer Bewegung parallel zu den Isobaren entspricht (siehe Abb. 13). Diese Strömung von Luft bezeichnet man mit dem Begriff geostrophischer Wind.⁵²

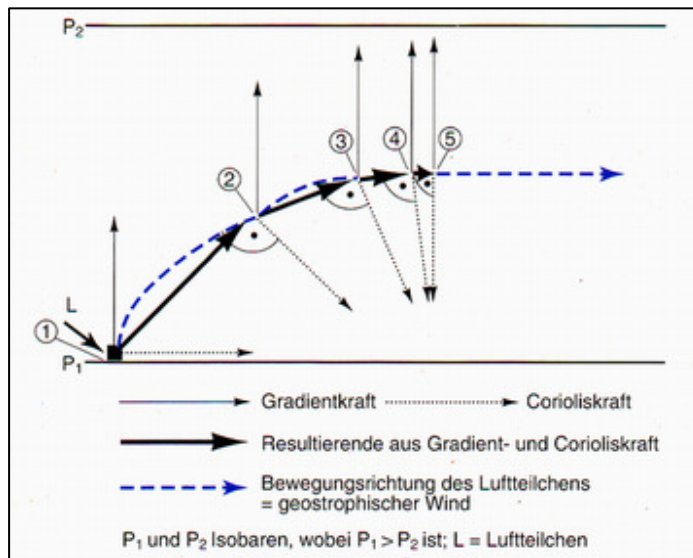


Abb. 13: Zur Entstehung des geostrophischen Windes⁵³

Am Äquator verschwindet die C-K, da der Sinus von α für 0° Null ist. Trotzdem beobachtet man bei Luftteilchen, die sich entlang des Äquators bewegen, eine Rechtsablenkung des Windes. Auch bei einem Luftteilchenstrom entlang anderer Breitengrade nimmt man dieses Phänomen wahr. Die C-K kann dafür nicht verantwortlich gemacht werden, da die Voraussetzung der Änderung des Abstandes zur Rotationsachse in diesen Fällen nicht erfüllt ist. Der Grund für jene Ablenkungen ist die Zentrifugalkraft.

Betrachtet man den Betrag von Gleichung (43), $F_Z = m \cdot r \cdot \omega^2$, und setzt für die Winkelgeschwindigkeit laut Gleichung (54) $\omega = \frac{v^2}{r}$ ein, erhält man:

⁵¹ HÄCKEL, H. (1999): Meteorologie. S. 242 f.

⁵² vgl. HÄCKEL, H. (1999): Meteorologie, SCHÖNWIESE, C.-D. (2008): Klimatologie und STRAHLER, A. et al. (2002): Physische Geographie.

⁵³ HÄCKEL, H. (1999): Meteorologie. S. 244.

$$F_Z = m \cdot \frac{v^2}{r} \quad (62)$$

Die Zentrifugalkraft „wirkt immer von der Rotationsachse weg nach außen und ist abhängig von der Bahngeschwindigkeit und dem Radius des rotierenden Systems.“⁵⁴

Verringert sich die Bahngeschwindigkeit oder erhöht sich der Radius, so nimmt bei konstanter Masse die Zentrifugalkraft zu. Dies hat Folgen für Luftteilchen, die sich entlang eines Breitenkreises bewegen. Durch eine Luftströmung in Richtung der Erdrotation wird die Bahngeschwindigkeit und damit die Zentrifugalkraft erhöht. Die Teilchen werden von der Rotationsachse weg, das heißt in Richtung des Äquators beschleunigt. Analog wird ein Luftstrom, der sich entgegen der Erdrotation bewegt zu den Polen hin beschleunigt. Dies entspricht in beiden Fällen einer Ablenkung um 90° nach rechts. Entsprechend werden die Luftströme auf der Südhalbkugel nach links abgelenkt.⁵⁵

3.6 Hoch- und Tiefdruckgebiete

Ein Hochdruckgebiet (Antizyklon) stellt ein Gebiet hohen Luftdrucks dar, von dessen Zentrum aus der Luftdruck zu allen Seiten hin abnimmt. Analog nimmt der Luftdruck von einem Tiefdruckgebiet (Zyklon) aus zu allen Seiten zu. Beide Drucksysteme zeichnen sich daher durch geschlossene, meist annähernd kreisförmige Isobaren aus. Die Gradientkraft bewirkt eine Luftmassenbewegung vom höheren zum tieferen Luftdruck. Bei den Antizyklonen strömt die Luft radial vom Zentrum weg, während sie bei den Zyklonen von allen Seiten auf dieses zuströmt. Alle Bewegungen der Luftteilchen auf der Nordhalbkugel erfahren aufgrund der Coriolis-Kraft und der Zentrifugalkraft in Bezug auf den Druckgradienten eine Ablenkung um 90° nach rechts. In beiden Drucksystemen strömt die Luft daher parallel zu den Isobaren, jedoch in entgegengesetzte Richtungen (oberer Teil in Abb. 14, S. 29). „Auf der Nordhalbkugel werden die Zyklone vom Wind gegen den Uhrzeigersinn, die Antizyklone im Uhrzeigersinn umweht, auf der Südhalbkugel ist die Umströmungsrichtung umgekehrt.“⁵⁶

Da es sich bei Hoch- und Tiefdruckgebieten um rotierende Strömungsgebilde handelt, tritt zusätzlich eine Zentrifugalbeschleunigung der Luftteilchen auf. Sie wirkt von der Rotationsachse, dem Druckzentrum, weg. Zum Beispiel wirkt die Gradientkraft bei einem Antizyklon nach außen, sodass sich diese und die Zentrifugalkraft ergänzen.

⁵⁴ LAUER, W. et al. (2004): Klimatologie. S. 174.

⁵⁵ vgl. LAUER, W. et al. (2004): Klimatologie und SCHÖNWIESE, C.-D. (2008): Klimatologie.

⁵⁶ MALBERG, H. (2007): Meteorologie und Klimatologie. S. 123.

Würden sich die Winde in der Atmosphäre tatsächlich wie oben beschrieben bewegen, so würden sich die Luftdruckdifferenzen nicht abbauen, da die Zyklone und Antizyklone beständig bestehen blieben. Bei den bisherigen Betrachtungen der Windsysteme wurde jedoch die Reibung vernachlässigt. Sie wirkt der Luftströmung „(...) umso stärker [entgegen], je näher die Strömung an der Erdoberfläche auftritt“⁵⁷, je mehr Geländehindernisse dem Wind entgegenstehen und je schneller der Wind weht. Die unter Berücksichtigung der bereits genannten Kräfte und der Reibung auftretenden Winde bezeichnet man als geotriptische Winde. Ihre Form ist dem unteren Abschnitt von Abbildung 14 zu entnehmen. Die Ablenkung der Winde beträgt nur noch etwa 45°. Der Winkel hängt jedoch stark von der Rauhgigkeit der Erdoberfläche und der Höhe der Strömung ab. Ab etwa 1000 m kann die Reibung vernachlässigt werden.⁵⁸

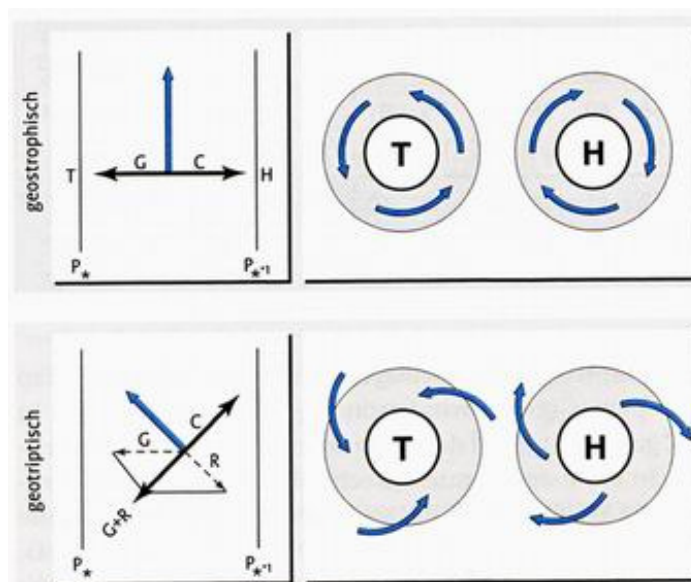


Abb. 14: Hoch- und Tiefdruckgebiete: oben unter Vernachlässigung der Reibung, unten mit Reibung⁵⁹

3.7 Die globale planetarische Zirkulation

Ohne die globale planetarische Zirkulation würde sich die Äquatorregion aufgrund der positiven Strahlungsbilanz immer weiter aufheizen, während die Polarregionen auskühlen würden. Dort herrscht eine negative Strahlungsbilanz, das heißt die Erdausstrahlung ist größer als die solare Einstrahlung. Im Jahresmittel wird die Strahlungsbilanz ab

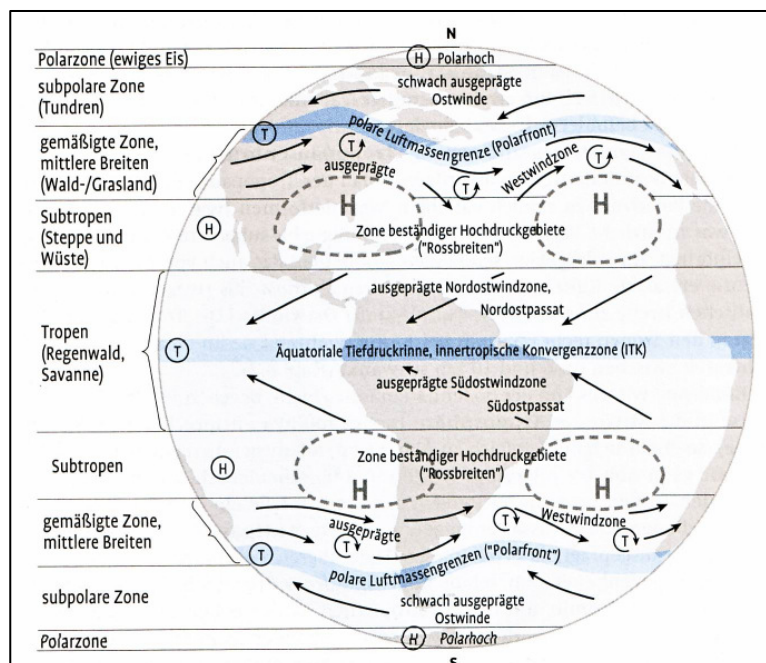
⁵⁷ SCHÖNWIESE, C.-D. (2008): Klimatologie. S. 137.

⁵⁸ vgl. STRAHLER, A. et al. (2002): Physische Geographie, SCHÖNWIESE, C.-D. (2008): Klimatologie, MALBERG, H. (2007): Meteorologie und Klimatologie, LAUER, W. et al. (2004): Klimatologie und HUPFER, P. (2005): Witterung und Klima.

⁵⁹ SCHÖNWIESE, C.-D. (2008): Klimatologie. S. 137.

etwa 40° Breite negativ. Das globale Luftdrucksystem basiert auf diesen Strahlungsverhältnissen. Statt einer Verschärfung der Temperatur- und Druckunterschiede findet ein permanenter Ausgleich statt. Diese Ausgleichsbewegungen werden wiederum erheblich durch die Erdrotation und die auf ihr basierenden Kräfte, durch die Reibungs- und Gravitationskraft sowie die Verteilung von Land- und Seeflächen und die daraus resultierenden thermischen Zirkulationen beeinflusst.

Unter der Annahme, der Sonnenzenit befinde sich am Äquator, kann das folgende Modell zu den globalen bodennahen Windsystemen (Abb. 15) entwickelt werden: Am Äquator ist die Einstrahlungsintensität aufgrund der Stellung der Sonne maximal. Die Luft wird im Vergleich zu den höheren Breiten stärker erwärmt. In der Höhe folgt daraus ein Hochdruckgebiet über dem Äquator. Um einen Druckausgleich zu erreichen strömen die Luftteilchen in der Höhe vom Äquator polwärts und werden dabei auf der Nordhalbkugel nach rechts abgelenkt. Bei etwa 25° bis 35° Breite wird diese Strömung als ein Westwind nach Osten wehen. Dies führt dazu, „dass kein direkter meridionaler Energieaustausch zwischen Äquator und Pol im Sinne einer singulären thermischen Zelle möglich ist.“⁶⁰ Die Luftteilchen ‚stauen‘ sich in dieser Breite auf. Dies ruft einen hohen Luftdruck hervor und die Luftmassen sinken ab. Entsprechend der thermischen Zirkulation bildet sich in den Subtropen ein bodennaher Hochdruckgürtel aus. Gemäß der oben beschriebenen thermischen Zirkulation bewegt sich der größte Teil der Luft-



teilchen zurück zum Äquator. Auch dieser bodennahe Strom wird durch die Coriolis-Kraft nach rechts abgelenkt. Es folgen auf der nördlichen Hemisphäre ausgeprägte Nordostpassate, die aufgrund der Reibung nicht so stark abgelenkt werden wie die Höhenwestwinde.

Abb. 15: Schema der bodennahen planetarischen Zirkulation⁶¹

⁶⁰ LAUER, W. et al. (2004): Klimatologie. S. 168.

⁶¹ SCHÖNWIESE, C.-D. (2008): Klimatologie. S. 165.

Analog erhält man auf der Südhalbkugel Südostwinde. Dort, wo die Passate aus nördlicher und südlicher Richtung aufeinander stoßen und wieder aufsteigen, befindet sich die äquatoriale Tiefdruckrinne bzw. die innertropische Konvergenzzone. Die beiden auf diese Weise auf der Nord- und Südhalbkugel entstehenden Kreisläufe werden Hadleyzelle genannt.

An den Polen hingegen wird die Luft aufgrund der geringen Strahlungsintensität wenig erwärmt. Aus der zur Umgebung relativen Abkühlung folgt ein Höhentief bzw. ein bodennahes Hoch. Analog zur Ausgleichszirkulation zwischen der Äquatorialen Tiefdruckrinne und dem subtropischen Hochdruckgürtel, bildet sich eine thermische Zirkulation zwischen dem Polarhoch und der subpolaren Tiefdruckrinne aus (Abb. 15, S. 30). Die Luftteilchen werden vom Hoch äquatorwärts beschleunigt und aufgrund der C-K auf der Nordhalbkugel nach rechts sowie auf der Südhalbkugel nach links abgelenkt. Man erhält auf beiden Halbkugeln die polaren Ostwinde. Die Zirkulation wird auch hier durch polwärts strömende Höhenwestwinde geschlossen.

Zwischen diesen Zirkulationszellen am Äquator und an den Polen befindet sich eine weitere Zirkulation. Als Folge der Ausgleichsströmung zwischen den Subtropenhochs und den subpolaren Tiefdruckzonen findet man auf beiden Halbkugeln ausgeprägte Westwinde vor. Der Druckgradient zeigt wiederum in Nord-Süd-Richtung, jedoch lenkt die C-K die Winde ab, sodass sich die Luftteilchen nach Osten bewegen.

Der Jahresgang des Sonnenzenits bewirkt eine meridionale Verlagerung der innertropischen Konvergenzzone und der Druckgürtel. Des Weiteren ergeben sich aus der Verteilung von Land und See weitere regional spezifische Druck- und Strömungssysteme.

Basierend auf dem Verständnis der globalen planetarischen Zirkulationensysteme, kann eine Klimazoneneinteilung wie in Abbildung 15 (S. 30) vorgenommen werden. Die C-K spielt bei der Entstehung wetter- und klimawirksamer Phänomene wie den Hoch- und Tiefdruckgebieten eine bedeutende Rolle. Gleichzeitig nimmt sie erheblichen Einfluss auf die atmosphärischen Zirkulationen und dementsprechend auf das Zustandekommen der Klimazonen.⁶²

⁶² vgl. MALBERG, Horst (2007): Meteorologie und Klimatologie, STRAHLER, A. et al. (2002): Physische Geographie, SCHÖNWIESE, C.-D. (2008): Klimatologie, HÄCKEL, H. (1999): Meteorologie und LAUER, W. et al. (2004): Klimatologie.

4 DIDAKTISCHE GRUNDLAGEN

Die vorangehenden Kapitel machen deutlich, dass es sich bei der C-K sowohl in Bezug auf ihren Ursprung als auch ihre Auswirkungen auf die atmosphärischen Zirkulationen um einen sehr komplexen Gegenstand handelt. Bei seiner Vermittlung in der Schule ist es somit zwingend notwendig, zu klären, in welcher Stufe die C-K vermittelt wird und ob die Schüler bereits Vorkenntnisse im Bereich der Klimatologie vorweisen können. Des Weiteren spielt das mathematische und physikalische Verständnis der Schüler eine große Rolle, da dieses im Wesentlichen bestimmt, inwiefern der Gegenstand den Schülerinnen und Schülern (SuS) vereinfacht präsentiert werden muss.

Obwohl die C-K im Unterricht in reduzierter Form behandelt wird, bleibt der Gegenstand anspruchsvoll. Aus diesem Grund muss besonderer Wert auf eine anschauliche Erklärung gelegt werden. Einige Methoden und Medien sind hierfür in spezieller Weise geeignet. Voraussetzung ist jedoch ein didaktisch korrekter Einsatz. Um diesen zu gewährleisten, werden weiter unten Kriterien einiger Methoden und Medien vorgestellt.

Entscheidend für eine erfolgreiche Vermittlung im Unterricht sind darüber hinaus die Schülerinteressen sowie die Rahmenbedingungen, denen der Unterricht unterliegt. An diesen kann der Unterricht nämlich trotz fachlich und didaktisch einwandfreier Vermittlung scheitern.

4.1 Einordnung in den Lehrplan Geographie

Da die Unter- und Mittelstufe von insgesamt sechs auf fünf Jahre verkürzt wurde, wird hier der neue Lehrplan des Faches Geographie für die Stufen fünf bis neun betrachtet. Für die Oberstufe gibt es für das Bundesland Nordrhein-Westfalen bisher keinen neuen Lehrplan. Da die Oberstufe jedoch weiterhin drei Jahre beinhaltet, kann von geringen Änderungen ausgegangen werden, sodass hier der alte Lehrplan für die Oberstufe zu Grunde gelegt wird. Die gleiche Problematik taucht ebenfalls bei der weiter unten vorgenommenen Betrachtung der Lehrpläne für die Fächer Mathematik und Physik auf.

Bei zwei der drei obligatorischen Inhaltsfelder der Jahrgangsstufen fünf und sechs im Fach Geographie werden physische Themen angesprochen. In der Unterrichtsreihe ‚Arbeit und Versorgung in Wirtschaftsräumen unterschiedlicher Ausstattung‘ wird während des Schwerpunkts ‚Bedeutung ausgewählter Standortfaktoren für Industrie, Landwirtschaft und Dienstleistungen‘ vor allem in Bezug auf die Landwirtschaft das Klima thematisiert. Am Rande können klimatische Aspekte im Kontext der Umweltverschmutzung bei der Behandlung des Inhaltsfeldes ‚Auswirkungen von Freizeitgestaltung

auf Erholungsräume und deren naturgeographisches Gefüge' bearbeitet werden. Insgesamt betrachtet sind die Gegenstände dieser beiden Stufen jedoch stark anthropogeographisch geprägt.

Die Jahrgangsstufen sieben bis neun beinhalten zwei Inhaltsfelder (von fünf) mit stärkerer physischgeographischer Ausrichtung. Bei der Einbindung der ‚Naturbedingten und anthropogen bedingten Gefährdung von Lebensräumen‘ in den Unterricht kann der anthropogene Treibhauseffekt Gegenstand einer Stunde werden. Das Inhaltsfeld ‚Leben und Wirtschaften in verschiedenen Landschaftszonen‘ basiert wiederum auf einer Thematisierung der Klimazonen. Hier könnte eine erste Annäherung an den Gegenstand der C-K stattfinden.⁶³

In der Oberstufe gibt es drei Inhaltsfelder mit verschiedenen obligatorischen Bausteinen bzw. Unterthemen. Vor allem das erste Feld ist inhaltlich durch physische Themen geprägt. Die Behandlung der C-K findet im Kontext des verbindlichen Themas ‚Klima- und Vegetationszonen in ihrer unterschiedlichen Bedeutung für die Entwicklung von Räumen‘ statt. Weitere klimatologische Aspekte können im Zusammenhang des Bausteins ‚Ursachen und Folgen von Eingriffen in geoökologische Kreisläufe‘ angesprochen werden. Die C-K wird in den Schulbüchern, die auf den Lehrplänen basieren, im Jahrgang 11 bzw. im ersten Jahr der Oberstufe thematisiert. Das bedeutet im Zuge der verkürzten Schullaufbahn, dass die C-K in Zukunft in Klasse 10 bearbeitet wird. Es gibt zwar keine festgelegte Reihenfolge für die drei Inhaltsfelder, aber aufgrund dieser Kopplung ist anzunehmen, dass in der Regel nacheinander ein Feld pro Stufe behandelt wird.⁶⁴ Es wird daher im weiteren Verlauf dieser Arbeit von SuS mit Kompetenzen und Fachkenntnissen ausgegangen, die zu Beginn der Oberstufe vorausgesetzt werden können.

4.2 Didaktische Reduktion

Für einen Unterrichtsgegenstand ist von besonderer Bedeutung, dass bei seiner Behandlung im Unterricht die Wirklichkeit in ihrer Komplexität reduziert wird, da diese in all ihren Erscheinungsformen von den SuS in der Regel nicht zu verstehen ist. Die didaktische Reduktion beinhaltet daher die Klärung der Frage „was von der jeweiligen Lerngruppe erarbeitet und verstanden werden kann.“⁶⁵ Das für die SuS Verstehbare

⁶³ vgl. MSWWF (2007): Kernlehrplan für das Gymnasium - Sekundarstufe I (G8) in Nordrhein-Westfalen. Erdkunde.

⁶⁴ vgl. MSWWF (1999): Richtlinien und Lehrpläne für die Sekundarstufe II - Gymnasium / Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen. Erdkunde.

⁶⁵ VOGEL, P. (1986): Didaktische Reduktion. S. 567.

muss durch zulässige Vereinfachungen und Kürzungen herausgefiltert werden. Der Lehrer sollte den Unterrichtsgegenstand in verschiedene Teilaspekte gliedern und sich die folgenden Fragen stellen:

Welche dieser Teilaspekte sind notwendig, weil sie wertvoll und wichtig für das Gesamtverständnis sind?

Welche Aspekte sind aufgrund ihrer Zugänglichkeit und Eignung möglicherweise integrierbar?

Auf welche dieser Teilaspekte ist zu verzichten, weil sie für die SuS zu komplex sind oder zu hohe intellektuelle Anforderungen stellen?⁶⁶

Um insbesondere die dritte Frage in Bezug auf die C-K beantworten zu können, muss sich der Lehrer bewusst machen, welche Variablen, Bezüge und Rechenarten den SuS aus dem Physik- und Mathematikunterricht bereits bekannt sind. Um überprüfen zu können, inwiefern in den im nächsten Kapitel vorgestellten Unterrichtsbeispielen zu viel oder zu wenig reduziert wurde, ist die Klärung der zu erwartenden mathematischen und physikalischen Voraussetzungen der SuS zu Beginn der Oberstufe daher von großer Bedeutung.

4.2.1 Mathematische Voraussetzungen

Am Ende der Klasse 9 haben die SuS im Bereich Algebra und Arithmetik folgende Fähigkeiten und Fertigkeiten erworben, die für die Behandlung der C-K relevant sein könnten: Sie können lineare, einfache quadratische Gleichungen und lineare Gleichungssysteme lösen, erwerben Kenntnisse zur Zehnerpotenzschreibweise als auch zur Potenzschreibweise mit ganzzahligen Exponenten, haben den Umgang mit rationalen und irrationalen Zahlen erlernt, können Terme umformen und mit Brüchen rechnen. Im Zusammenhang mit dem Unterrichtsgegenstand ‚Funktionen‘ beherrschen die SuS in der Unter- und Mittelstufe das kartesische Koordinatensystem und den Maßstab. Die Darstellung von linearen, quadratischen, exponentiellen Funktionen sowie von Sinusfunktionen im kartesischen KS wird geübt. Darüber hinaus lernen die SuS im Kontext des Modellierens, mathematische Modelle auf Realsituationen und Realsituationen auf mathematische Modelle zu übersetzen.⁶⁷ Alle weiteren Fähigkeiten und Fertigkeiten, die die SuS im Mathematikunterricht erwerben, tragen nicht zum Unterrichtsgegenstand ‚Coriolis-Kraft‘ bei und bleiben daher hier unerwähnt.

⁶⁶ vgl. VOGEL, P. (1986): Didaktische Reduktion.

⁶⁷ vgl. MSWWF (2007): Kernlehrplan für das Gymnasium - Sekundarstufe I (G8) in Nordrhein-Westfalen. Mathematik.

Im ersten Jahrgang der Oberstufe vertiefen die SuS ihre Kenntnisse in der Koordinatengeometrie in Bezug auf Geraden, Parabeln, Kreise, Tangenten und deren Bestimmung. Des Weiteren wird die Differentialrechnung ganzrationaler Funktionen eingeführt. Die SuS können den Differentialquotienten und darauf aufbauend Ableitungen berechnen.

Bei der Betrachtung des zweiten und dritten Jahrgangs der Oberstufe wird Bezug auf Grundkurskenntnisse genommen, da diese am Ende jedem SuS zu Verfügung stehen müssten. Es gibt drei Oberthemen für diese beiden Stufen: Analysis, Lineare Algebra und Geometrie sowie Stochastik. Unter anderem erlernen die SuS den Umgang mit weiteren Ableitungsregeln sowie mit der Vektorrechnung. In Bezug auf diese erwerben die SuS Kenntnisse zur Parameter- und Koordinatendarstellung, zu Lagebeziehungen und zum Standard-Skalarprodukt mit den Anwendungen der Orthogonalität, der Winkel und der Länge von Vektoren. Für die Reihenfolge der drei Oberthemen gibt es keine Vorgaben im Lehrplan.⁶⁸

4.2.2 Physikalische Voraussetzungen

Im Physikunterricht eignen sich die SuS viele verschiedene Fähigkeiten und Kenntnisse an, die relevant für das Verständnis der C-K sind. In der fünften und sechsten Klasse werden Grundlagen zur Temperatur und Energie, zum Beispiel Längenänderung bei Erwärmung und Abkühlung eines Gegenstands vermittelt. Als mögliche Kontexte für diese Themen werden die Sonne und die Jahreszeiten genannt. Ferner können Lichtquellen und -empfänger sowie die Mondphasen im Zusammenhang mit der Sonnen- und Mondfinsternis behandelt werden. Weitere wichtige Größen werden in den Jahrgangsstufen 7 bis 9 eingeführt, wie die Geschwindigkeit, die Kraft als vektorielle Größe, die Gewichtskraft, die Masse, der Druck und die Energieerhaltung.

Für die Themen der Oberstufe gibt es keine vorgegebene Reihenfolge. Der Lehrplan schlägt jedoch zwei Sequenzen vor, auf die sich die weitere Beschreibung stützt. Die Fachkonferenz kann jedoch begründet eine andere Abfolge bestimmen. In der ersten Stufe der Oberstufe nimmt die Kinematik den größten Teil der Unterrichtsstunden ein. Obligatorisch müssen die Gesetze der gleichförmigen und gleichmäßig beschleunigten Bewegung, die träge Masse, die Kraft, die Grundgleichung der Mechanik, der Impuls und die Impulserhaltung, die Kreisbewegung, die Zentripetalkraft, das Gravitationsgesetz, die IR- und UV-Strahlung sowie die Strahlungsgesetze thematisiert werden.

⁶⁸ vgl. MSWWF (1999): Richtlinien und Lehrpläne für die Sekundarstufe II - Gymnasium / Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen. Mathematik.

Empfohlene Unterrichtsgegenstände sind des Weiteren das Modell des Massenpunktes, Bezugssysteme, Inertialsysteme, die Galilei-Transformation, die Trägheitskräfte in beschleunigten Bezugssystemen (Zentrifugalkraft, Coriolis-Kraft), die Gesetze der gleichförmigen und gleichmäßig beschleunigten Drehbewegung, das Trägheitsmoment, das Drehmoment, der Drehimpuls und die Drehimpulserhaltung. Ferner kann im Rahmen der kinetischen Gastheorie das Verhalten von Gasen bei Temperaturänderung angesprochen werden. Die Energieabstrahlung der Sonne sowie der Energiehaushalt der Erde und der Atmosphäre sind zwei weitere empfohlene Unterrichtsgegenstände für die Oberstufe. Inwiefern sie tatsächlich thematisiert werden, hängt von den Entscheidungen der Fachkonferenz und der unterrichtenden Lehrkraft ab.

Die Hauptsätze der Thermodynamik sind die einzigen für uns relevanten Aspekte, die erst im zweiten Jahrgang der Oberstufe fakultativ durchgenommen werden können. Ansonsten werden in den letzten beiden Jahren der Oberstufe vorwiegend elektrodynamische und quantenmechanische Themen gelehrt.⁶⁹

Abschließend erscheint es im Hinblick auf die physikalischen Voraussetzungen der SuS problematisch, dass das Fach Physik in der Oberstufe ein Wahlfach ist und somit nicht von allen SuS belegt wird. Entsprechend können die zuvor genannten in der Oberstufe zu erlernenden Kenntnisse und Größen nicht von allen SuS vorausgesetzt werden. Auch dies ist bei der Unterrichtsplanung zu berücksichtigen.

4.3 Methoden und Medien im Geographieunterricht

Die Methoden- und Medienauswahl im Fach Geographie ist groß und vielfältig. Im Folgenden werden daher nur die Methoden und Medien definiert, die in den Unterrichtsbeispielen der fachdidaktischen Zeitschriften und der Schulbücher vorkommen. Somit soll eine Basis für eine fachdidaktische Bewertung geschaffen werden.

4.3.1 Experimente

Eine Definition des Begriffs ‚Experiment‘ erscheint besonders wichtig, da sowohl in der Schulbuchliteratur als auch in der geographiedidaktischen Literatur häufig unter anderem Messungen und Beobachtungen als Experimente deklariert werden. Diese finden

⁶⁹ vgl. MSWWF (2008): Kernlehrplan für das Gymnasium - Sekundarstufe I in Nordrhein-Westfalen. Physik und MSWWF (1999): Richtlinien und Lehrpläne für die Sekundarstufe II - Gymnasium / Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen. Physik.

sich zwar in einem Experiment wieder, ein Experiment umfasst zudem jedoch noch weitere Aspekte. Es ist immer an einen bestimmten Ablauf sowie an bestimmte Kriterien geknüpft. Dem Experiment geht eine klar formulierte Frage voraus sowie darauf aufbauend eindeutige, von den SuS entwickelte Hypothesen. Diese gilt es im Rahmen eines Experiments zu überprüfen und entweder zu verifizieren oder zu falsifizieren. Dazu gehört die Planung des Experiments, die Beschreibung des Aufbaus, die Durchführung (Messung und Beobachtung) und schriftliche Dokumentation sowie die Interpretation. Widerspricht das Ergebnis der formulierten Hypothese, werden neue Hypothesen formuliert und wiederum Experimente durchgeführt. Stimmt die Hypothese mit dem Experiment überein, kann eine Theorie entwickelt werden, die gegebenenfalls durch weitere Experimente gestützt werden kann. Diese Vorgehensweise wird auch als experimenteller Algorithmus bezeichnet.⁷⁰

Während des Experiments muss das zu untersuchende Objekt unter künstlich hergestellten und kontrollierten Bedingungen beobachtet werden. Die Bedingungen, unter denen das Experiment stattfindet, müssen vom Experimentator veränderbar sein. „Einzelne Einflussfaktoren eines Vorgangs werden isoliert, systematisch variiert und kontrolliert.“⁷¹ Dazu gehört auch ein Kontrollansatz, bei dem die zu untersuchende Variable ausgespart wird. Somit stehen beim Experiment der Ablauf und die Dynamik im Vordergrund. Diese Lehrform liefert messbare und wiederholbare Ergebnisse. Nur unter Beachtung dieser Kriterien ist es möglich, Ursache-Wirkungs-Beziehungen offen zu legen. Eine bloße Veranschaulichung kann dabei nicht als Experiment bezeichnet werden. Ist der Untersuchungsgegenstand nicht die Natur, sondern ein Modell (siehe 4.3.3), so spricht man von einem Modellexperiment.⁷²

Führt eine Lehrkraft ein Experiment durch, sollte sie darauf achten, dass die Versuchsanordnung so einfach wie möglich gehalten wird. Besonders bei Demonstrationsexperimenten sollte der Versuchsaufbau gut überschaubar sein. Des Weiteren muss der experimentelle Algorithmus in den Unterrichtsverlauf integriert werden.

Obwohl das Experiment die einzige Methode ist, bei der die SuS den naturwissenschaftlichen Erkenntnisweg selbst gehen kann, kommt sie im Geographieunterricht eher vereinzelt zum Einsatz. Gründe sind unter anderem der hohe Aufwand, die unzureichende materielle Ausstattung, die oft verbesserungsbedürftige Aus- und Weiterbil-

⁷⁰ vgl. DRIELING, K. (2006): Der experimentelle Algorithmus, ARNING, H. et al. (2003): Experimentelles Arbeiten im Geographieunterricht und LETHMATE, J. (2003): Sind „geographische Experimente“ Experimente?

⁷¹ LETHMATE, J. (2006): Experimentelle Lehrformen und Scientific Literacy. S. 5.

⁷² vgl. LETHMATE, J. (2003): Sind „geographische Experimente“ Experimente? und LETHMATE, J. (2006): Experimentelle Lehrformen und Scientific Literacy.

derung der Geographielehrer in diesem Bereich sowie die mangelhafte Thematisierung in der geographiedidaktischen Literatur.⁷³

4.3.2 Versuche

Ein Versuch ist prinzipiell mit einem Experiment gleichzusetzen. Erfüllt ein Versuch nicht die Experimentkriterien, sollte die Methode entsprechend der durchgeführten Tätigkeit, beispielsweise als Beobachtung, Untersuchung (Beobachtung mit Hilfsmitteln), Messung oder allgemein mit dem Oberbegriff experimentelle Lehrform, bezeichnet werden.⁷⁴

4.3.3 Modelle

Modelle liefern im Gegensatz zu Experimenten keine konkreten Erkenntnisse. Sie dienen viel mehr der Veranschaulichung eines bestimmten Gegenstandes oder Prozesses. Da das Gedächtnis nach Birkhauer über Vorstellungen funktioniert, können Modelle einen wesentlichen Beitrag zum langfristigen Lernen leisten. Sie stellen zum einen Transparenz her durch die Vereinfachung der Realität auf die entscheidenden Merkmale und durch die Verkleinerung auf eine überschaubare Größe. Man kann mit ihrer Hilfe Sachverhalte sichtbar machen, die in der Wirklichkeit nicht oder kaum erkennbar sind. Zum anderen schaffen Modelle eine geordnete Welt begrifflicher Vorstellungen. Es findet eine Visualisierung von Gegenständen und Prozessen statt, damit die Vielfalt und Komplexität geographischer Erscheinungsformen von den SuS geordnet und leichter verinnerlicht werden kann. Des Weiteren findet eine Einbindung in umfassende Wissensstrukturen statt.

Man unterscheidet vier Arten von Modellen. Das konkrete Modell ist eine dreidimensionale Abbildung realer Gegenstände oder Sachverhalte. Es besitzt eine große Realitätsnähe und wird überwiegend manuell gestaltet. Anschaulichkeit und Greifbarkeit stehen im Vordergrund. Der Abstraktionsgrad kann je nach Menge der verwendeten Symbole und Signaturen variieren. Bei den illustrativen Modellen handelt es sich um nur noch zweidimensionale Abbildungen, zum Beispiel eine Karte oder ein Klimadiagramm. Die Vergleichbarkeit zur Realität ist dadurch eingeschränkt. Zusätzlich kann auch bei diesen Modellen der Abstraktionsgrad variieren. Theoretische Modelle hingegen verlangen immer eine hohe Abstraktionsfähigkeit. Sie zeichnen sich durch ex-

⁷³ vgl. OTTO, K.-H. (2003): Experimentieren im Geographieunterricht und LETHMATE, J. (2006): Experimentelle Lehrformen und Scientific Literacy.

⁷⁴ vgl. LETHMATE, J. (2006): Experimentelle Lehrformen und Scientific Literacy.

emplarische Darstellungen von Abläufen, Vorgängen und Zusammenhängen aus, beispielsweise Regelkreise, Zyklen und mathematische Formeln.

Die Simulation einer realen Situation etwa in einem Rollenspiel wird als Aktions- oder Verhaltensmodell bezeichnet. Ein konkreter Sachverhalt wird zum Anlass einer Handlung. Verschiedene Fakten, Ansichten, Verhalten und Vorgänge werden auf die jeweiligen Rollen projiziert. Hierbei steht die Kommunikation im Vordergrund.

Ausschlaggebend für einen gelungenen Einsatz eines Modells ist das Parallelisieren, da die SuS nur das Anschauungsmodell sehen und nicht was reduziert und vereinfacht wurde. Den SuS muss klar werden, welche Struktur in der Wirklichkeit welcher Struktur im Modell entspricht.⁷⁵

4.3.4 Lehrvideo

Lehrvideos, die im Unterricht eingesetzt werden, müssen drei Prinzipien genügen:

- Gemäß dem kinematographischen Prinzip muss der Film eine Bewegung oder einen Prozess zeigen. Er darf nicht aus einer Aneinanderreihung statischer Bilder bestehen.
- Das phonographische Prinzip besagt, dass Bild und Ton übereinstimmen müssen. Des Weiteren muss der Kommentar insgesamt untergeordnet bleiben. Die Sprache des Kommentars soll möglichst einfach, natürlich und knapp sein. Sie sollte der gesprochenen anstatt der geschriebenen Sprache entsprechen. Insgesamt muss die Bildinformation im Vordergrund bleiben.
- Das didaktische Prinzip fordert, dass der Inhalt je nach Altersstufe reduziert sein muss. Er „muss der Anschauung dienen und ‚das Konkrete vor das Abstrakte‘ stellen. Des Weiteren muss das Lehrvideo zeitlich begrenzt sein und sollte durch einen Lebensbezug motivierend wirken.

Werden diese drei Prinzipien beachtet, so kann der Filmeinsatz viele Vorzüge vorweisen. Dynamische Prozesse können den SuS mit hoher Wirklichkeitstreue veranschaulicht und beliebig oft reproduziert werden. Die unterstützende Wirkung des Tons erhöht die Einprägsamkeit aufgrund der Kopplung von Bild und Ton. Darüber hinaus bietet ein Film eine höhere Anschaulichkeit und bewirkt damit verbunden eine höhere Motivation bei den SuS.

⁷⁵ vgl. CLAABEN, K. (1997): Gruppen von Modellen und BIRKHAUER, J. (1997): Modelle im Geographieunterricht.

Auf der anderen Seite kann ein Videoeinsatz viele Probleme mit sich bringen, da es sich um ein vorgefertigtes Produkt handelt, auf dessen Inhalte, Methoden und Ziele der Lehrer keinen Einfluss mehr nehmen kann. Somit handelt es sich bei jedem Film beispielsweise durch die Kameraführung, den Schnitt und den Ton um eine subjektiv gefärbte Darstellung von Inhalten. Des Weiteren kann der Lehrer keinen Einfluss auf die Länge des Films sowie auf die Geschwindigkeit des Gezeigten nehmen. Vor allem die Wahrnehmungs- bzw. Verarbeitungsgeschwindigkeit des Gezeigten kann je nach Lerngruppe bei den SuS bedeutend variieren. Zuletzt muss erwähnt werden, dass ein Film eine Fülle von Informationen und Details beinhaltet. Die SuS behalten jedoch lediglich einen allgemeinen und verschwommenen Eindruck.

Bei der Einbettung eines Films in den Unterricht sollte die Lehrkraft vorab klären, ob das Video für den bestimmten Jahrgang geeignet ist. Vor dem Ablauf des Videos sollten Beobachtungsaufgaben gestellt werden. Nach dem Abspielen des Films sind die allgemeinen Eindrücke zu sammeln und die gestellten Aufgaben zu bearbeiten. Dabei sollten die Erkenntnisse formuliert und festgehalten sowie gegebenenfalls mit Hilfe anderer Medien vertieft und ausgeweitet werden.⁷⁶

4.4 Berücksichtigung von Schülerinteressen

Interesse wird in der Forschung durch die drei Merkmale Kognition, Emotion und Valenz definiert. Veranschaulichen kann man diese Begriffe am Beispiel eines Kindes. Wenn sich dieses für etwas interessiert, bedeutet das, dass es ein differenziertes Wissen über den Gegenstand besitzt (Kognition), die Beschäftigung damit positive Emotionen hervorruft und diese Auseinandersetzung aus eigenem Antrieb erfolgt (Valenz). Aus diesem Grund kann das Schülerinteresse die Qualität von Unterricht positiv beeinflussen und zu größerem Lernerfolg führen.

In mehreren Studien (Hemmer, Ingrid und Hemmer, Michael (2002): Mit Interesse Lernen. Obermaier, Gabriele (1997): Strukturen und Entwicklung des geographischen Interesses von Gymnasialschülern in der Unterstufe. Golay, David (2000): Das Interesse der Schüler/-innen am Schulfach Geographie in der Sekundarstufe I in der Region Basel.) konnte gezeigt werden, dass Geographie in Bezug auf das Schülerinteresse im Fächervergleich einen guten Mittelplatz oder sogar einen der Vorderplätze einnimmt. Das Interesse der SuS am Fach selbst ist somit vorhanden, aber wie sieht es mit bestimmten Themen und Arbeitsweisen aus?

⁷⁶ vgl. HAUBRICH, H. (Hrsg.) (2006): Geographie unterrichten lernen und HAUBRICH, H. et al. (1997): Didaktik der Geographie konkret.

Hemmer und Hemmer konnten mit Hilfe mehrerer Studien aufdecken, dass das Interesse an physischen Themen von Klasse fünf bis Klasse elf durchgehend größer ist als an anthropogeographischen und topographischen Themen. Dieses vermehrte Interesse an der ‚Physischen Geographie‘ muss jedoch eher einzelnen thematischen Spitzenreitern, wie z. B. der ‚Entstehung der Erde‘ oder den ‚Naturkatastrophen‘, als traditionellen geomorphologischen und klimageographischen Themen zugeschrieben werden. Geschlechtsspezifische Unterschiede im Interesse an physischen Themen sind verschwindend gering. Die Präferenzen der Lehrer stehen allerdings im Gegensatz zu den Schülerinteressen.

Ähnliche Differenzen ergeben sich bei der Betrachtung von Arbeitsweisen. Anschauliche Methoden und Medien wie das Experiment, der Computer, Filme, Fotos und Modelle wecken ein deutlich größeres Interesse als die oft abstrakte Arbeit mit dem Schulbuch, Texten, Diagrammen, Karten und Tabellen. Auch hierbei korrelieren die Schülerpräferenzen negativ mit der Anwendungshäufigkeit im Unterricht.

Da Klimatologie im Bereich der physischen Geographie bei den SuS weniger beliebt ist, erscheint es sinnvoll, das Interesse der Lerngruppe durch eine geschickte Kombination mit einer der bevorzugten anschaulichen Arbeitsweise zu steigern.⁷⁷

4.5 Rahmenbedingungen von Unterricht

Bei der Planung von Unterricht müssen verschiedene Rahmenbedingungen beachtet werden. Da nicht in jeder Schule ein Geographieraum oder eine -sammlung zur Verfügung steht, sollte ein allgemeines Unterrichtsbeispiel im Klassenraum durchführbar sein. Des Weiteren sollte berücksichtigt werden, dass Geographie in der Unter- und Mittelstufe mit zwei Einzelstunden und in der Oberstufe mit drei Stunden pro Woche im Stundenplan verankert ist. Im elften Jahrgang wechseln sich Einzel- und Doppelstunden immer wieder ab. Der Schulalltag zeigt, dass nie genau vorhersagbar ist, in genau welcher Stunde ein Gegenstand behandelt wird. Das bedeutet, dass jede Geographiestunde einzeln geplant und in sich vollständig sein muss, sowie dass sie inhaltlich und methodisch nach 45 Minuten mit einer Sicherungsphase abgeschlossen werden kann.

Darüber hinaus müssen sich die Lehrer beim Entwerfen ihrer Unterrichtseinheiten an den Lehrplan halten. Thematische Vertiefungen einiger Themen oder die Behandlung von Gegenständen, die nicht im Lehrplan verankert sind, sind nur in seltenen Fällen möglich, da nach der Bearbeitung aller obligatorischen Themen kaum noch Zeit für

⁷⁷ vgl. HEMMER, I. et al. (2002): Mit Interesse Lernen.

weiterführende oder empfohlene Inhalte bleibt. Des Weiteren muss häufig ein Teil der frei zur Verfügung stehenden Unterrichtsstunden investiert werden, um ausgefallene Stunden nachzuholen. Feiertage, Krankheitsausfälle und Schülerausflüge schränken die Freiheiten der Lehrer bei der Planung der Unterrichtseinheiten stark ein.

Das letzte bei der Unterrichtsplanung relativ stark einschränkende Kriterium sind die zur Verfügung stehenden materiellen Mittel. Häufig werden in fachdidaktischen Zeitschriften Unterrichtsbeispiele mit vielfältigen Materialien, Modellen, Geräten oder Medien präsentiert. Wie aus den Medien bekannt ist, beklagen viele Schulen jedoch ihre mangelhafte Ausstattung, vor allem im Bereich moderner Geräte und Modelle. Die Neuanschaffung benötigter Medien gestaltet sich aufgrund des außerordentlich knapp bemessenen Budgets der Schulen trotz fachlicher Legitimation und Notwendigkeit schwierig.⁷⁸

Zusammenfassend bilden die Auseinandersetzungen mit den Rahmenbedingungen von Unterricht, den Schülerinteressen und möglichen Vermittlungsmethoden, die grundlegende Einordnung des jeweiligen Themas in den Lehrplan sowie die didaktische Reduktion die notwendigen didaktischen Grundlagen für eine optimale Gestaltung des Unterrichts.

⁷⁸ vgl. HAUBRICH, H. (2006): Geographie unterrichten lernen.

5 DIE CORIOLIS-KRAFT IM GEOGRAPHIEUNTERRICHT

Um zu einem anschaulichen Unterrichtsansatz über die Coriolis-Kraft zu gelangen, sollten möglichst alle zur Verfügung stehenden Beispiele diskutiert werden. Dafür standen verschiedene Schulbücher und diverse geographie- sowie naturwissenschaftlich-didaktische Literatur zur Verfügung.

Bei der Vorstellung der Unterrichtsbeispiele werden die methodischen Bezeichnungen zunächst von den jeweiligen Autoren übernommen. Eine kritische Betrachtung der Begrifflichkeiten erfolgt im nächsten Kapitel im Rahmen der Bewertung.

5.1 Erklärungsansätze in Schulbüchern

Da die Coriolis-Kraft ein obligatorischer Gegenstand im Fach Geographie in der gymnasialen Oberstufe des Landes Nordrhein-Westfalen ist, müsste dieser auch in jedem Schulbuch thematisiert werden. Nach der Sichtung von 13 Schulbüchern für die Oberstufe des Faches Geographie des Landes Nordrhein-Westfalen, zeigte sich, dass die C-K, insofern sie Erwähnung findet, in allen Büchern mit Hilfe von Texten und teilweise mit Abbildungen erarbeitet bzw. erklärt wird. Die untersuchten Bücher wurden in Tabelle 3 (Anhang 1) zusammengestellt. Aus diesem Grund wird auf eine Auflistung der Quellen an dieser Stelle verzichtet. Die jeweiligen Inhalte, der Umfang und die verwendeten Abbildungen der einzelnen Unterrichtsbeispiele wurden in tabellarischer Form zusammengefasst (siehe Tab. 4, 5, 6 im Anhang 2, 3, 4.)

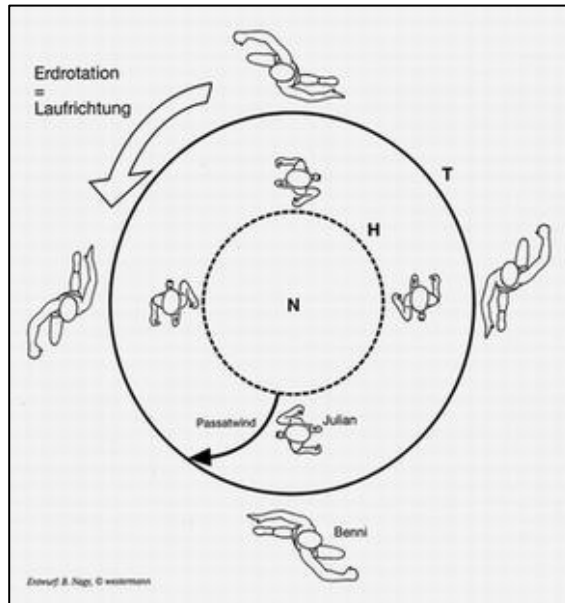
5.2 Erklärungsansätze in der Geographiedidaktik

Im Zuge der Literaturrecherche wurden sämtliche in der Fachdidaktik zur Verfügung stehenden Beiträge zur Coriolis-Kraft gesichtet. Aufgrund ihrer Relevanz für die vorliegende Arbeit wurden diejenigen Artikel selektiert, die Unterrichtsbeispiele beinhalten. Diese werden im Folgenden vorgestellt. Dabei wird darauf verzichtet, die durch die jeweiligen Autoren vorgenommene Einbettung in den Unterricht darzulegen. Lediglich die vorgeschlagenen Methoden sollen auf ihre fachliche und didaktische Korrektheit sowie auf ihre tatsächliche Anwendbarkeit hin überprüft werden.

Die Nummerierung der Unterrichtsansätze entspricht den folgenden Unterpunkten. Eine übersichtliche Auflistung findet sich im Anhang 6.

5.2.1 Schülerversuch: Schüler in Bewegung

Zwei Schüler oder Schülerinnen werden beauftragt, sich zur nächsten Stunde mit Hilfe eines Arbeitsbogens (siehe Abb. 16) auf ihre Rolle als Versuchsleiter vorzubereiten. Um den Versuch durchzuführen, geht die Lerngruppe mit der Lehrkraft auf den Hof.



Die Versuchsleiter sollen nun die Anweisung geben, einen kleinen Kreis mit vier Metern Durchmesser und einen größeren Kreis mit acht bis neun Metern Durchmesser auf den Boden zu zeichnen oder mit Hütchen zu markieren. „Der kleine Kreis stellt den subtropischen Hochdruckgürtel (H) dar, der große Kreis die äquatoriale Tiefdruckrinne (T).“⁷⁹

Abb. 16: Arbeitsbogen zum Schülerversuch⁸⁰

Es werden vier Gruppen gebildet mit je zwei Schülern, die übrigen protokollieren. Aus dem ersten Schülerpaar stellt sich ein Schüler auf den Innenkreis und der zweite in einer Linie mit dem ersten Schüler und dem Mittelpunkt des Kreises auf den Außenkreis (Abb. 16). Die nächsten Schülerpaare stellen sich jeweils eine Viertelumdrehung weiter auf. Jedes Schülerpaar symbolisiert so zunächst zwei Orte auf demselben Längengrad. Die Schüler beginnen sich im Sinne der Erddrehung zu bewegen. Jedes Paar soll durchgehend auf einer Linie verbleiben, die vom Mittelpunkt ausgeht. Dadurch müssen die Schüler auf dem äußeren Kreis deutlich schneller gehen als die auf dem inneren. Die Schüler werden nacheinander aufgefordert, den Hochdruckgürtel zu verlassen und sich unter Beibehaltung ihrer Schrittgeschwindigkeit dem Äquator bzw. der äquatorialen Tiefdruckrinne (T) zu nähern. Die Protokollanten sollen alle Ereignisse festhalten. In der verbleibenden Unterrichtszeit sollen die SuS versuchen, ihre Ergebnisse im Klassenraum graphisch darzustellen.

Im Rahmen der Interpretation können zur Verdeutlichung der Ablenkung die unterschiedlichen Bahngeschwindigkeiten auf den unterschiedlichen Breiten verwendet werden.⁸¹

⁷⁹ NAGY, B. et al. (1999): Die Ablenkung der Winde. S. 43.

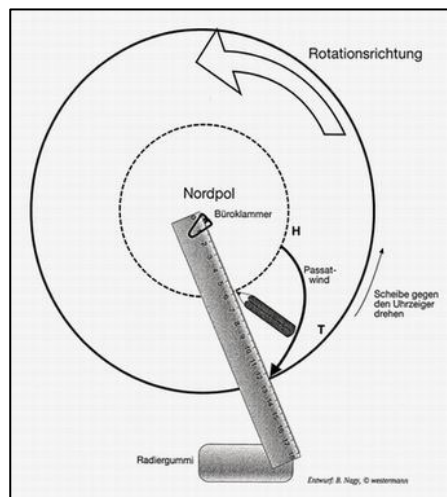
⁸⁰ NAGY, B. et al. (1999): Die Ablenkung der Winde. S. 42.

⁸¹ vgl. NAGY, B. et al. (1999): Die Ablenkung der Winde.

5.2.2 Schülerversuch: Papierscheibe

Gruppen von drei bis vier SuS werden aufgefordert zur nächsten Stunde jeweils einen Karton der Größe DIN A4, eine Büroklammer und eine Papierscheibe mit einem Durchmesser von acht Zentimetern mitzubringen. Auf dieser muss der Mittelpunkt markiert werden, um den herum die SuS einen Kreis von fünf Zentimetern Durchmesser zeichnen.

Die Lehrkraft erklärt, dass die Scheibe, von oben gesehen, die Erde symbolisiert. Der äußere Rand stellt die äquatoriale Tiefdruckrinne (T) dar, der eingezeichnete Kreis den subtropischen Hochdruckgürtel (H). Der Karton wird mit der Büroklammer im Zentrum durchstoßen. Der Mittelpunkt der Papierscheibe wird als Nordpol beschriftet und mit der Klammer auf dem Karton befestigt (Abb. 17). „Die Schüler sollen nun versuchen in Gruppen nachzustellen, wie sich die Passatwinde unter dem Einfluss der sich drehenden Erde verhalten.“⁸² Dafür dürfen sie einen Bleistift und ein Lineal verwenden. Während ein Schüler die Papierscheibe gegen den Uhrzeigersinn dreht, versucht ein



weiterer Schüler den Stift entlang des Lineals vom Kreis H zum Kreis T zu bewegen. Diese Einzeichnung der Passatwinde soll ohne Eingreifen der Lehrkraft geschehen.⁸³ Wie die SuS herausfinden, wofür sie das Lineal verwenden und wo sie es befestigen sollen, wird durch die Autorin nicht erwähnt. Die Anordnung kann lediglich einer Skizze entnommen werden. Ob die SuS diese erhalten, kann nicht beantwortet werden.

Abb. 17: Skizze zum Schülerversuch⁸⁴

5.2.3 Experiment zur Coriolis-Beschleunigung

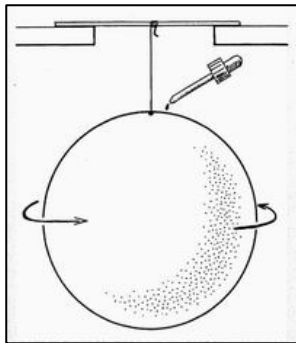
Für das im Folgenden beschriebene Experiment werden ein einfacher, am besten heller und einfarbiger Plastikball benötigt sowie circa 50 cm Schnur, ein Zündholz und eine Tropfpipette. Diese wird mit etwas dünnflüssiger und abwaschbarer Farbe befüllt. In den Ball soll ein Loch gebohrt werden. Nachdem man ihn mit Wasser gefüllt hat,

⁸² NAGY, B. et al. (1999): Die Ablenkung der Winde. S. 43.

⁸³ vgl. NAGY, B. et al. (1999): Die Ablenkung der Winde.

⁸⁴ NAGY, B. et al. (1999): Die Ablenkung der Winde. S. 43.

bindet man das Zündholz an einen Faden und steckt es in das Loch. Zuletzt soll der Ball beispielsweise an einem Lineal so aufgehängt werden, dass er frei beweglich schweben kann (siehe Abb. 18). Nach diesen Vorbereitungen soll man den Ball in eine

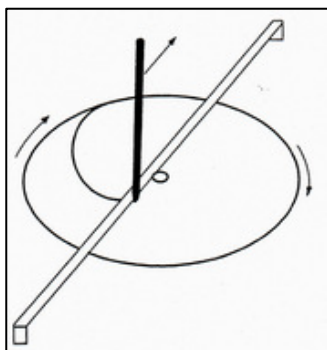


Drehbewegung versetzen und ihn mit etwas Farbe beträufeln. Zuletzt wird man aufgefordert zu beobachten.⁸⁵

Abb. 18: Skizze zur Versuchsanordnung⁸⁶

5.2.4 Einfaches Experiment zur Coriolis-Kraft

Die folgenden beiden Versuche sollen der Veranschaulichung der Wirkung der Coriolis-Kraft dienen. Für den ersten Versuch (Abb. 19) benötigt man eine drehende Kreisscheibe mit konstanter Winkelgeschwindigkeit. Vorgeschlagen wird beispielsweise eine



Pappscheibe auf einem Plattenspielteller. Darüber wird im ruhenden Bezugssystem eine horizontale, gerade Schiene montiert. Dabei soll ein entlang dieser Schiene bewegtes Schreibgerät das Rotationszentrum überstreichen können. Der ruhende Beobachter sieht eine gradlinige Bewegung, während auf der rotierenden Kreisscheibe eine gekrümmte Bahn entsteht.

Abb. 19: Experiment zum Erfassen der Bahnkurve im rotierenden Bezugssystem⁸⁷

Im zweiten Versuch (Abb. 20, S. 47) ersetzt man die Schiene durch eine gering geneigte Laufbahn. Diese soll über dem Zentrum der Scheibe enden. Das Experiment soll wie im zuvor beschriebenen Versuch mit einer Kugel durchgeführt werden. Zur Veranschaulichung wird die Verwendung einer Kamera vorgeschlagen, die einmal außerhalb der Scheibe im ruhenden Bezugssystem und einmal auf dieser im rotierenden Bezugssystem positioniert wird.⁸⁸

⁸⁵ vgl. FRAEDRICH, W. (1997): Lernkartei.

⁸⁶ FRAEDRICH, W. (1997): Lernkartei. S. 13.

⁸⁷ vgl. OEHME, Wolfgang et al. (1996): Besseres Verstehen durch genaueres Sehen.

⁸⁸ OEHME, Wolfgang et al. (1996): Besseres Verstehen durch genaueres Sehen. S. 68.

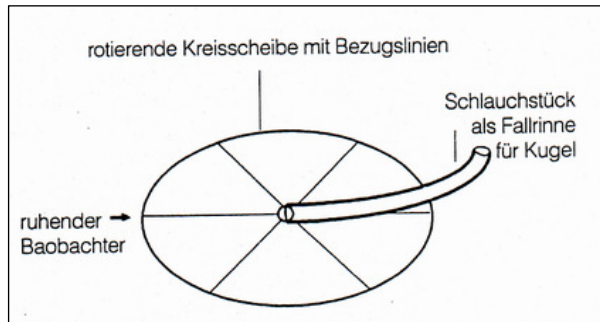


Abb. 20: Einfaches Experiment zur Coriolis-Kraft⁸⁹

5.2.5 Zweidimensionales Modell

Dieses Modell soll einer Reduktion vom dreidimensionalen in den zweidimensionalen Raum dienen. Man verwendet dafür einen kugelförmigen Lampenschirm aus Papier (Abb. 21). „Sie besitzt den Vorteil, dass sie mit einem Handgriff aus der zweidimensionalen Form in den dreidimensionalen (und umgekehrt) überführt werden kann und mit dem Globus vergleichbar ist.“⁹⁰

Mit Hilfe dieses Modells kann man auf die verschiedenen Rotationsgeschwindigkeiten und auf die Hoch- und Tiefdruckgebiete, die sich aufgrund der Einstrahlungsverhältnisse aufbauen, eingehen. Die Pole und der Äquator können eingezeichnet werden, um die Orientierung beim Übergang von drei zu zwei Dimensionen und umgekehrt zu erleichtern. Die ablenkende Wirkung und die Ursachen der C-K müssen durch ein weiteres Modell, Beobachtungen, Abbildungen oder Texte erklärt werden. Das Modell kann wiederum dazu dienen, eine Ablenkung durch die C-K im zweidimensionalen Raum in drei Dimensionen zu übertragen, beispielsweise durch aufgemalte Pfeile auf der Kugellampe.⁹¹

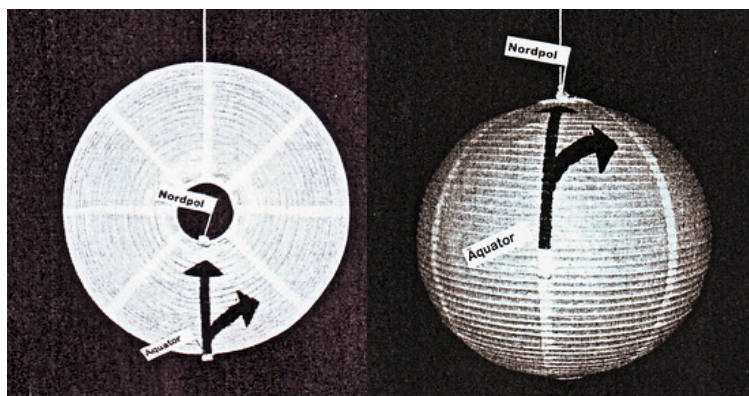


Abb. 21: Modell zur Reduktion einer Dimension bei der Betrachtung der C-K⁹²

⁸⁹ OEHME, Wolfgang et al. (1996): Besseres Verstehen durch genaueres Sehen. S. 68.

⁹⁰ STÖBER, M. (2006): Globale Windsysteme und Corioliskraft. S. 23.

⁹¹ vgl. STÖBER, M. (2006): Globale Windsysteme und Corioliskraft.

⁹² STÖBER, M. (2006): Globale Windsysteme und Corioliskraft. S. 24.

5.2.6 Modell: drehender Kegelmantel

In diesem von der Universität Oldenburg entwickelten Modell wird ein Ausschnitt der Erdoberfläche ungefähr zwischen dem nördlichen Wendekreis und 60° und 70° N durch einen Kegelmantel dargestellt. An der oberen und unteren Kante werden Glasröhrchen anmontiert, die durch einen Schlauch verbunden werden. Auf das obere Röhrchen wird ein Plastikballon befestigt, durch den im Schlauch befindliches Wasser gepumpt werden kann. Das untere Röhrchen ist spitz zulaufend, damit die Flüssigkeit als dünner Strahl austreten kann. Der Kegelmantel besitzt eine raue Oberfläche und besteht aus Metall. Er kann des Weiteren um seine Achse rotieren. Wie die beschriebenen Teile dafür montiert werden müssen, wird nicht erläutert, kann jedoch der beigefügten Skizze entnommen werden (siehe Abbildung 22)

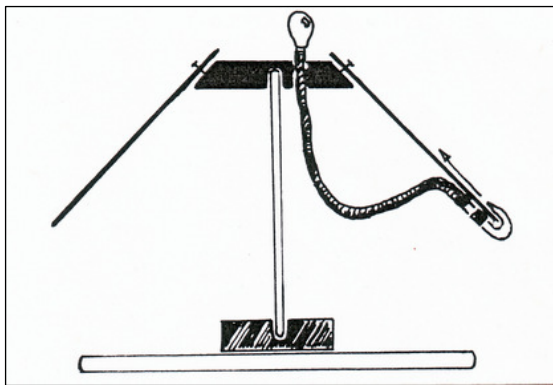


Abb. 22: Skizze des Modells zur Demonstration der Coriolis-Kraft⁹³

Die Autorin betont, dass der optischen Wahrnehmung ein kognitiver Erkenntnisprozess folgen muss. Dies soll mit Hilfe einer Demonstration der Drehgeschwindigkeiten der Erdoberfläche in verschiedenen geographischen Breiten geschehen.⁹⁴

5.2.7 Funktionsmodell zur allgemeinen Zirkulation

In einer Gruppenarbeit sollen eigene Erkenntnisse zur Coriolis-Kraft gewonnen werden. Dafür bekommt jede Gruppe eine Experimentierbox, die aus einer Drehplatte aus Holz, einer Rampe mit Auslösevorrichtung, einem Gummiball und einer Anleitung besteht. Das Modell soll gemäß Abb. 23 (S. 49) aufgebaut werden. Die Auslösevorrichtung soll bei nicht drehender Platte sowie bei rotierender Platte mehrmals betätigt werden. Die Drehung soll der Erdrotation entsprechen. Ferner soll die Rampe vom Mittelpunkt der Scheibe an ihren Rand versetzt werden. Die Kugel soll wiederum bei Drehung und Stillstand der Platte in Bewegung gesetzt werden. Zur Sicherung der Be-

⁹³ KOHFAHL, H. (1994): Die Windablenkung auf der Nordhalbkugel durch den Einfluß der Corioliskraft. S. 44.

⁹⁴ vgl. KOHFAHL, H. (1994): Die Windablenkung auf der Nordhalbkugel durch den Einfluß der Corioliskraft.

obachtungen soll die Kugel vor dem Betätigen der Auslösevorrichtung in Wasser getaucht und ihre Spur, die sie auf der Platte hinterlässt, nachgezeichnet werden.⁹⁵

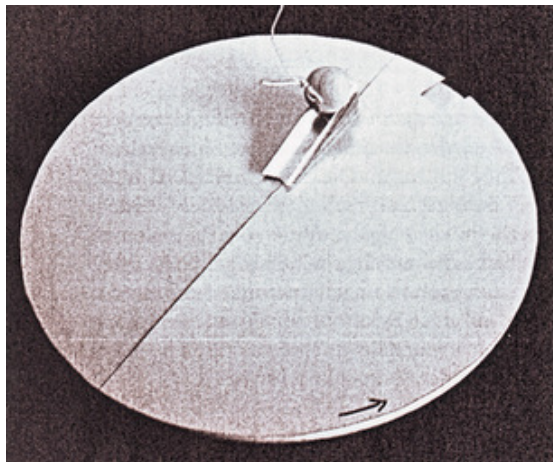


Abb. 23: Funktionsmodell zur allgemeinen Zirkulation⁹⁶

5.2.8 Modell zur Demonstration des Coriolis-Effekts auf dem Overheadprojektor

Viele Demonstrationen zur Coriolis-Kraft sind nur für eine kleine Gruppe von Beobachtern geeignet. Gemäß R. A. Secco müssen dynamische Prozesse auch mit Hilfe dynamischer Illustrationen erklärt werden. Für den Gebrauch im Klassenraum hat der Autor dafür eine günstige Apparatur entwickelt, um den Coriolis-Effekt auf dem Overheadprojektor zu veranschaulichen. Das Gerät besteht daher hauptsächlich aus Plexiglas und kann innerhalb von vier bis fünf Stunden montiert werden. Die Hauptbestandteile sind der Fuß, die runde Plattform und die Abschlussrampe (Abb. 24).

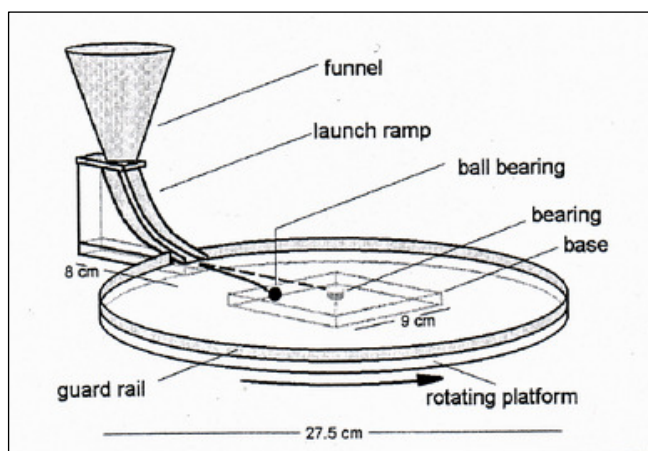


Abb. 24: Skizze zur Demonstrationsapparatur⁹⁷

⁹⁵ vgl. STÖBER, M. (2006): Globale Windsysteme und Corioliskraft.

⁹⁶ STÖBER, M. (2006): Globale Windsysteme und Corioliskraft. S. 26.

⁹⁷ vgl. SECCO, R. A. (1999): Coriolis-Effect Demonstration on an Overhead Projector.

Der Fuß hat eine Breite und Länge von 9 cm und ist 1,2 cm dick. Die runde Plattform besitzt einen Durchmesser von 27,5 cm und ist 0,6 cm dick. Die Rampe sollte ca. 1,5 cm breit sein, damit ein Ball mit 1 cm Durchmesser problemlos hinabrollen kann. Die Seiten der Rampe sollen etwa 1 cm und der Boden 0,2 - 0,4 cm dick sein, sodass der Ball nicht aufspringt, wenn er auf die Plattform rollt.

Montieranleitung: Bohre ein flaches Loch auf der Unterseite der runden Plattform und der Oberseite des Fußes. Klebe ein Kugellager aus Stahl mit etwa einem cm Durchmesser in beide Löcher. Ein Trichter aus Plastik, dessen kleinste Verengung größer einem cm sein muss, wird auf einer Plexiglashalterung befestigt, wie in Abbildung 24 zu sehen ist. In die Halterung muss ein Loch gebohrt werden, das ebenfalls mindestens einen cm Durchmesser haben muss, damit die Kugel später hindurch rollen kann. Direkt unter dem Loch wird die Rampe angebracht. Sie wird mit einer kleinen Schraube von unten außen an der Plattform fixiert. Außerdem wird die Halterung außen an der runden Plexiglasscheibe angebracht, sodass der Ball auf den Mittelpunkt der Scheibe zurollt und die Halterung mit der Scheibe mitgedreht wird (Abb. 24, S. 49). Am Rand der runden Plattform muss darüber hinaus eine Absturzsicherung angebracht werden, damit der Ball nicht nach jedem Versuch aufgefangen werden muss.

Der Ball muss vor der ersten Anwendung mit Sandpapier angeraut werden, damit er besser Farbe aufnehmen kann. Die Plattform sollte ungefähr auf eine Rotation von einer Umdrehung pro Sekunde gebracht werden. Nachdem der Ball in abwaschbare Tinte getaucht wurde kann er in den Trichter geführt werden.⁹⁸

5.2.9 Modellversuch zur Coriolis-Ablenkung

In diesem Modellversuch (Abb. 25, S. 51) wird eine Holzscheibe mit mindestens einem Meter Durchmesser verwendet, um ausreichend lange Beobachtungszeiten und Bewegungstrecken zu gewährleisten. Die Scheibe soll auf einer kugellagerten Achse, beispielsweise einer Töpferscheibe oder einer Fahrradfelge, montiert und mit einer schwarzen, abwaschbaren Folie beklebt werden. Eine kleine Schraubenmutter wird als Halterung für eine Stahlkugel (3 - 5 cm Durchmesser) auf der Scheibe befestigt. Während die Scheibe sich dreht, wird die Kugel in verschiedene Richtungen angestoßen. Vor jedem Beobachtungsdurchgang wird die Stahlkugel in Kreidestaub getaucht, damit ihre Bewegung auf der Scheibe sichtbar wird. Ein Stativstab in der Nähe der Scheibe

⁹⁸ vgl. SECCO, R. A. (1999): Coriolis-Effect Demonstration on an Overhead Projector.

dient zur Orientierung bei der Beobachtung der Kugelbewegung im nicht rotierenden System.⁹⁹

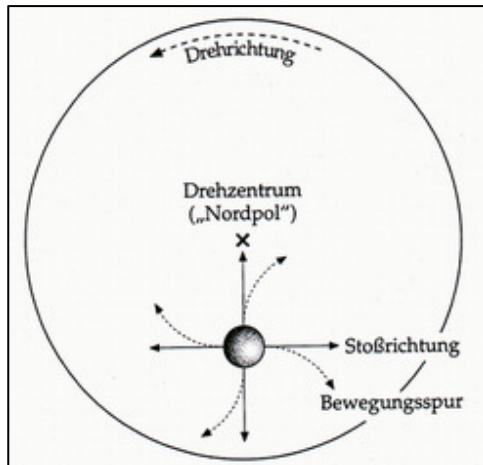


Abb. 25: Skizze zur Versuchsanordnung¹⁰⁰

5.2.10 Lehrvideo zur Coriolis-Kraft

Für die Aufnahme des Lehrvideos wurde der folgende Aufbau realisiert: Mit Hilfe eines Motors und eines Antriebsriemens wird eine Scheibe mit einem Radius von etwa 23,5 cm in eine konstante Rotation versetzt (siehe Abb. 26, S. 52). Auf einer schiefen Führungsschiene, die auf der Scheibe befestigt wird, kann eine Kugel radial nach innen beschleunigt werden. Eine Kamera wird fest am Boden montiert. Sie zeigt die Sichtweise auf dem ruhenden Laborsystem. Eine zweite Kamera wird auf der Scheibe montiert und präsentiert die Sichtweise aus dem beschleunigten System.

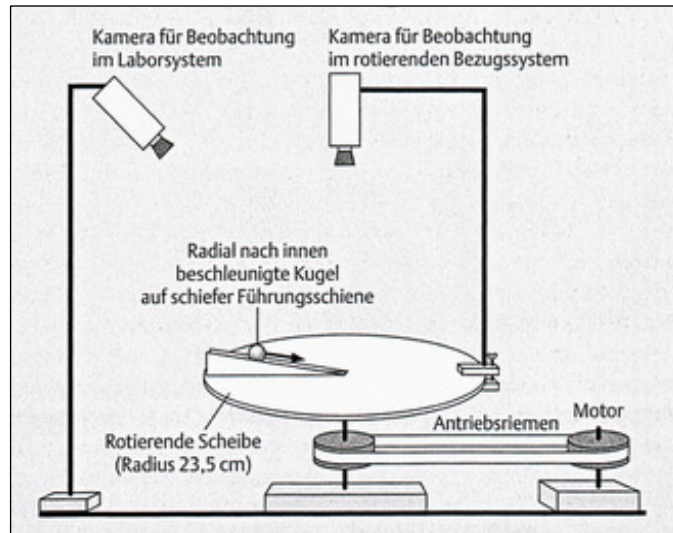
Die Kugel rollt die Rampe hinab und bewegt sich nach Newton anschließend kräftefrei, mit konstanter Radialgeschwindigkeit. Die Bildfrequenz der Kamera beträgt 25 Bilder pro Sekunde. Mit Hilfe der Betrachtung der einzelnen Bilder lassen sich die jeweiligen Bahnkurven durch zeitlich äquidistante Punkte für den Betrachter sichtbar machen. Unter Verwendung zweier Polardiagramme wird die Bewegung im rotierenden und im ruhenden Bezugssystem dargestellt. Des Weiteren wird die Zeit (0,72 s) angegeben, die sich die Kugel ab dem Verlassen der Rampe bis zum Herunterfallen von der Platte auf dieser bewegt. Da der Radius der Scheibe bekannt ist, kann hieraus die Radialgeschwindigkeit ermittelt werden. Die Rotationsgeschwindigkeit der Scheibe beträgt konstant 1 Hz. Aus diesen Werten kann die Coriolis-Beschleunigung unter Verwendung des Betrages von Formel (40) berechnet werden, die die Kugel im rotierenden Bezugssystem erfährt und durch die sie abgelenkt wird:

⁹⁹ vgl. MUCKENFUß, H. (1997): Experimentieren in der Wetterkunde.

¹⁰⁰ MUCKENFUß, H. (1997): Experimentieren in der Wetterkunde. S. 20.

$$a_c = 2 \dot{\varphi} \cdot \omega = 2 \cdot \frac{0,235m}{0,72s} \cdot 1Hz = 2 \cdot 0,326 \frac{m}{s} \cdot 1 \frac{1}{s} = 0,652 \frac{m}{s^2}.$$

Die Kugel erfährt eine Coriolis-Beschleunigung von $0,652 \frac{m}{s^2}$ nach rechts. Diese Rechnung können alle SuS des ersten Oberstufenjahrgangs durchführen. Auf die Richtung



der C-K kann nur qualitativ eingegangen werden, da die SuS die Vektorrechnung erst im zweiten Oberstufenjahr kennen lernen.

Abb. 26: Schema zum Versuchsaufbau¹⁰¹

Einführend werden im Video darüber hinaus Informationen zu den Drehrichtungen in Tiefdruckgebieten auf der Nord- und Südhalbkugel gegeben. Im weiteren Verlauf wird auf die Ungenauigkeit der Markierung aufgrund der geringen Aufnahmerate der Kamera eingegangen. Des Weiteren wird die Polarkoordinatendarstellung erläutert. Der Autor beschreibt, dass die Kugel im rotierenden Bezugssystem eine Beschleunigung erfährt, während sie sich im ruhenden System gradlinig gleichförmig bewegt. Zur Beschreibung der Bewegung im rotierenden System mit Hilfe des zweiten Newton'schen Axioms ist daher die Erläuterung der Trägheitskräfte notwendig. Es werden die Transformationsgleichungen für die Ortsvektoren, die Geschwindigkeitsvektoren und die Beschleunigungsvektoren in beiden Systemen angegeben. Zuletzt wird noch auf die Richtungen der Coriolis- und Zentrifugalkraft eingegangen.¹⁰²

Das Video kann in mittlerer Qualität (ca. 20 MB) kostenlos heruntergeladen werden.¹⁰³ In höherer Qualität ist es direkt bei den Autoren auf CD-ROM anzufordern. Zum Abspielen ist der Real Player erforderlich.

¹⁰¹ WAGNER, A. et al. (2007): Multimedien zur Physikausbildung. Lehrvideo zur Corioliskraft. S. 39.

¹⁰² vgl. WAGNER, A. et al. (2007): Multimedien zur Physikausbildung. Lehrvideo zur Corioliskraft.

¹⁰³ vgl. WAGNER, A. et al. (2007): Multimedien zur Physikausbildung. Coriolis- und Zentrifugalkraft im rotierenden Bezugssystem.

5.2.11 Physik auf einem rotierenden Bezugssystem

Bewegung ist relativ. Alles was wir sehen, hängt vom Bezugssystem ab. Diese Erkenntnisse können die SuS gemäß Johns am besten durch eigene Erlebnisse anstatt durch die Betrachtung eines Modells oder eines Videos gewinnen.

Benötigt wird ein fünf Meter langes Brett, zusammengesetzt aus zwei zweieinhalb Meter langen Brettern, die durch Metallplatten miteinander verbunden werden. Insgesamt werden 12 Rollen unter dem gesamten Brett positioniert, jeweils vier im gleichen Abstand vom Rotationszentrum des Gesamtbrettes bzw. mit dem gleichen Radius, davon jeweils zwei unter jedem Brett. Des Weiteren werden zwei Stangen mit zwei U-Profilen auf den beiden Brettern befestigt, vom Rotationszentrum aus betrachtet beide auf der linken Seite und im gleichen Abstand zum Zentrum. Bevor man die Apparatur zusammenstellt, sollte geklärt werden, wo sie zum Einsatz kommen kann, beispielsweise im Klassenraum, im Labor oder in der Cafeteria und wo sie gelagert werden kann.

Zwei Schüler haben die Aufgabe das Brett in eine konstante Rotation zu versetzen. Zwei weitere Schüler stehen dabei jeweils auf einem Ende des Brettes und sollen sich einen Ball zuwerfen (siehe Abb.27). Werfen sich die Schüler den Ball auf gerader Linie zu, so wird der Fänger den Ball nicht fangen. Vom Werfer und vom Fänger aus betrachtet, findet eine Ablenkung statt. Alle SuS außerhalb sehen eine gerade Wurfbahn. Ferner sollen die SuS versuchen, den Ball während des Wurfs einmal auf dem Boden aufzutippen zu lassen und von einem Ende zum anderen zu gehen. Dabei können sie zwischendurch stehen bleiben. Im optimalen Fall können die SuS eine Abhängigkeit der C-K vom Abstand zum Rotationszentrum feststellen sowie von der radialen Geschwindigkeit bzw. ihrer Schrittgeschwindigkeit¹⁰⁴



Abb. 27: Ein rotierendes Bezugssystem¹⁰⁵

¹⁰⁴ vgl. JOHNS, R. H. (1998): Physics on a Rotating Reference Frame. S. 178 ff.

¹⁰⁵ JOHNS, R. H. (1998): Physics on a Rotating Reference Frame. S. 178.

6 BEWERTUNG DER UNTERRICHTSANSÄTZE

Viele Fachdidaktiker wollen den Schulalltag mit verschiedenen entwickelten Modellen, Experimenten und kreativen Ideen bereichern. Doch ob diese Unterrichtsvorschläge tatsächlich eine Bereicherung darstellen, soll hier diskutiert werden.

Die Bewertungen der Schulbücher finden vor allem auf inhaltlicher Ebene statt, während es sich bei den fachdidaktischen Unterrichtsansätzen eher um eine Methodenkritik handelt.

6.1 Bewertung der Schulbücher

In 10 von 13 untersuchten Büchern wird die Coriolis-Kraft thematisiert. Vier Autoren gehen dabei mit 12 bis 13 Sätzen etwas ausführlicher vor als die Übrigen. In drei Büchern werden dem Gegenstand 9 bis 10 Sätze gewidmet, während die C-K in den verbleibenden drei Werken mit nur 4 bis 6 Sätzen berücksichtigt wird. Sind die SuS in der Lage die Ursachen und Wirkungen der Coriolis-Kraft mit den wenigen zur Verfügung stehenden Sätzen zu verstehen? Dafür muss der Inhalt der Sätze genauer betrachtet werden.

In jedem Buch wird die Rotation der Erde als Ursache für die Ablenkung der Winde genannt. Ferner wird in 70 % der Bücher versucht, die Ablenkung mit Hilfe der verschiedenen Bahngeschwindigkeiten und/oder mit Hilfe der Massenträgheit zu erklären. Keiner der Autoren erwähnt als Ursache der C-K die Betrachtung einer Bewegung aus verschiedenen Bezugssystemen. Des Weiteren wird in nur 50 % der betrachteten Fälle die Abhängigkeit der C-K von der geographischen Breite benannt. Ebenso erachtet etwa die Hälfte der genannten Autoren es für wichtig, zu erwähnen nach wem die C-K benannt wurde. Die Auswirkungen der Reibung auf den Einfluss der C-K werden von sieben Autoren beschrieben.

In 80 % der Bücher wird thematisiert, dass auf der Nordhalbkugel eine Ablenkung nach rechts stattfindet. Sieben von den acht Autoren erwähnen auch die Ablenkung nach links auf der Südhalbkugel. Jedoch beschreiben nur 4 Autoren (Buch 1, 2, 3 und 8) korrekt, dass es sich um die Ablenkung meridionaler Winde handelt. Andere sprechen von Ablenkungen aller oder horizontaler Winde. Nur ein Autor thematisiert weder West- noch Ostwinde als reale Auswirkung der C-K. In der Hälfte der Bücher werden isobarenparallele Winde in der Höhe angesprochen sowie die Tatsache, dass aufgrund der Coriolis-Ablenkung kein rascher Druckausgleich stattfindet. Nur jeweils ein Autor geht auf Hoch- und Tiefdruckgebiete und den Jetstream ein. Darüber hinaus werden in drei

Büchern keine Abbildungen zur Veranschaulichung der komplexen Kraft und ihren Auswirkungen verwendet.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Ausführungen zur C-K in den Schulbüchern zum größten Teil sehr knapp gehalten werden, viele wichtige Eigenschaften und Erklärungen in mehreren Werken nicht thematisiert werden, einige Texte sogar fachliche Mängel aufweisen und die Inhalte nicht immer durch Abbildungen visualisiert werden.

Insgesamt korreliert die Anzahl der verwendeten Sätze mit der Informationsarmut des jeweiligen Textes. Besonders negativ fallen dabei die Werke 11 bis 13 auf, in denen die C-K keine Erwähnung gefunden hat, ebenso wie die Bücher 5 und 6, in denen die 4 bis 6 Sätze zum Thema diverse wichtige Inhalte zu den Eigenschaften und Auswirkungen der C-K sowie den komplexen Gegenstand visualisierende Abbildungen vermissen lassen. Darüber hinaus haben sich fachliche Mängel eingeschlichen.

Positiv hervorzuheben sind dagegen die Ausführungen in Buch 7. In 13 Sätzen und einer Abbildung wird die C-K hier am ausführlichsten und fachlich korrekt in ihren Ursachen und Wirkungen erläutert. Auch der Autor von Buch 1 bleibt inhaltlich vollständig, verzichtet jedoch auf Abbildungen. Bei allen übrigen Werken bleiben wichtige Eigenschaften unerwähnt, oder aber die C-K wird fachlich nicht überzeugend dargestellt.

Abschließend muss kritisiert werden, dass alle Autoren, die Erklärungen verwenden, dafür nur sehr wenige Worte verwenden, obwohl es sich um einen äußerst komplexen Gegenstand handelt. Des Weiteren werden diese Erklärungen unter der Voraussetzung gegeben, dass dem Lesenden bzw. den SuS die Rotations- bzw. Winkelgeschwindigkeiten und Bahngeschwindigkeiten bekannt sind. Dies ist zu Beginn des ersten Oberstufenjahres jedoch nicht der Fall. SuS, die ab der Oberstufe keinen Physikunterricht mehr gewählt haben, werden diese Geschwindigkeiten bis zum Abitur in der Schule nicht mehr thematisieren. An dieser Stelle ist die didaktische Reduktion nicht gelungen. So bleibt zweifelhaft, ob die Erklärungen tatsächlich etwas zum Verständnis der C-K bei den SuS beitragen können.

6.2 Bewertung der fachdidaktischen Unterrichtsansätze

Im Folgenden werden keine Erklärungsansätze, sondern Methoden bewertet. Alle im Folgenden vorgestellten Methoden entsprechen dem Interesse der SuS, da bei Ihnen die Anschaulichkeit im Vordergrund steht. Außerdem ist die Durchführung aller Unterrichtsansätze in einer Schulstunde möglich. Die Arbeit im Klassenraum ist nur bei zwei

Beispielen nicht möglich. Dies wird an den entsprechenden Stellen noch einmal vermerkt. Des Weiteren ist bei keinem Modell bzw. Untersuchungsgegenstand eine Berechnung der C-K beabsichtigt bzw. möglich. Lediglich bei dem Video werden spezielle Aufnahmetechniken verwendet, die eine Berechnung erlauben (siehe 5.2.10).

Bei der Bewertung gilt die didaktische Reduktion dann als gelungen, wenn die Autoren die Realität in ihrem Modell oder Untersuchungsgegenstand fachlich korrekt darstellen und ein Parallelisieren zwischen Realität und Gegenstand möglich ist. Für die fachliche Korrektheit ist von Bedeutung, ob ein Gegenstand gleichzeitig mit einer konstanten Winkelgeschwindigkeit rotiert und sich radial bewegt. Sind diese Bedingungen erfüllt, so wird der Gegenstand korrekterweise aufgrund der Coriolis-Kraft abgelenkt.

Alle Unterrichtsbeispiele werden nacheinander dahingehend untersucht, inwiefern in ihnen die C-K mathematisch-physikalisch korrekt dargestellt wird. Es bietet sich an, zunächst eine Methodenkritik durchzuführen, da während dieser in vielen Fällen bereits deutlich wird, ob das geowissenschaftliche Phänomen durch den vorgestellten Ansatz richtig veranschaulicht wird.

6.2.1 Schülerversuch: Schüler in Bewegung

Die SuS bewegen sich mit einer möglichst konstanten Geschwindigkeit auf zwei Kreisen mit unterschiedlichem Radius um deren Mittelpunkt. Entweder verlassen die SuS auf dem Innenkreis ihre Bahn und bewegen sich unter Beibehaltung ihrer Geschwindigkeit auf den Außenkreis zu oder die SuS auf dem Außenkreis bewegen sich nach innen (siehe S. 44). Fachlich sind damit die Voraussetzungen zur Veranschaulichung der Coriolis-Ablenkung gegeben. Da man jedoch nicht davon ausgehen kann, dass die SuS ihr Tempo gleichmäßig beibehalten können, bleiben die Ergebnisse nicht reproduzierbar und dienen bestenfalls der Anschauung.

Methodisch handelt es sich bei diesem Unterrichtsansatz um eine Untersuchung, das heißt, um eine Beobachtung unter zu Hilfenahme einiger SuS. Würde es sich um einen Versuch handeln, müsste es eine Variable geben, die isoliert, variiert und kontrolliert werden kann. Außerdem ergeben sich bei dem Versuch, zwischen der Untersuchung und der Realität zu parallelisieren, einige Schwierigkeiten.

Die rotierenden Winde werden durch die SuS symbolisiert. Die Erde, die in der Realität ein rotierendes Bezugssystem darstellt, an dem man sich orientieren kann, fällt bei dieser Untersuchung weg. Die SuS selbst stellen das rotierende Bezugssystem dar, da der Boden unter ihnen stillsteht. Sowohl bei den polwärts gerichteten Bewegungen als auch bei den äquatorwärts gerichteten Bewegungen wird das Ergebnis der Coriolis-

Ablenkung deutlich sichtbar. Die SuS des Innenkreises bleiben beim Wechsel auf die Außenbahn hinter ihren Partnern auf dem Außenkreis zurück. Die SuS des Außenkreises überholen beim Wechsel auf die Innenbahn ihren Partner auf dem Innenkreis. Die tatsächliche Ablenkung kann jedoch nicht sichtbar gemacht werden, da sie nur im Bezug auf das rotierende Bezugssystem darstellbar ist. So müsste der Schüler, der seine Bahn nach Außen wechselt, bemerken, dass er sich in Bezug auf seine Mitschüler auf einer nach rechts geneigten Kurve bewegt, während die beobachtenden SuS erkennen müssten, dass er sich auf einer geraden Bahn nach Außen bewegt. Dies erscheint unter den gegebenen Bedingungen nicht umsetzbar.

Obwohl die tatsächliche Ablenkung nicht beobachtet werden kann, ist jedoch ihr Ergebnis gut sichtbar. Diese Untersuchung eignet sich daher nicht zur Veranschaulichung, sondern zur Erklärung der Coriolis-Ablenkung mit Hilfe der unterschiedlichen Bahngeschwindigkeiten, auf verschiedenen Kreisbahnen, mit gleichen Winkelgeschwindigkeiten. Der Unterrichtsansatz erscheint höchst praktikabel, da keine Beschaffungs- und Montagezeit sowie Kosten anfallen. Des Weiteren werden die SuS ein besonderes Interesse daran haben, den Klassenraum für eine praktische Untersuchung zu verlassen.

6.2.2 Schülerversuch: Papierscheibe

Eine Papierscheibe wird gegen den Uhrzeigersinn gedreht. Ein Stift wird entlang eines Lineals geführt, das am Rotationszentrum befestigt ist (siehe S. 45). Eine Ablenkung, die scheinbar einer Coriolis-Ablenkung gleicht, ergibt sich nur, wenn der Strich radial nach außen gezogen wird. Bewegt man den Stift auf das Rotationszentrum hin, während sich die Scheibe dreht, erhält man keine Bewegung oder Ablenkung, die mit der Ablenkung durch die C-K vergleichbar wäre. Begründet wird diese Diskrepanz durch die Tatsache, dass dieses Modell keine Veranschaulichung der C-K darstellt. Der Gegenstand, der eine radiale Geschwindigkeit besitzt, besitzt keine Rotationsgeschwindigkeit. Somit sind die Voraussetzungen der C-K nicht erfüllt. Mit diesem Modell wird demonstriert, welche Muster man beim Malen auf einer rotierenden Scheibe erhält.

Aus diesem Grund ist auch das Parallelisieren für einzelne Bestandteile unmöglich. Die Papierscheibe entspricht der Erde. Doch die Winde, die in der Realität eine Rotationsgeschwindigkeit besitzen, werden im Modell durch einen stillstehenden Stift symbolisiert. Dies kann nicht einfach als didaktische Reduktion legitimiert werden, da gerade dieser Aspekt eine entscheidende Bedeutung hat. Zwar kann mit dem Modell eine Be-

wegung vom Pol in Richtung des Äquators nachgestellt werden, doch hat diese nichts mit der Realität oder der Coriolis-Ablenkung zu tun.

Darüber hinaus wurde der Methodenbegriff durch den Autor nicht korrekt verwendet. Es handelt sich bei dieser Methode aus den gleichen Gründen wie im zuvor beschriebenen Beispiel nicht um einen Versuch, sondern um eine Untersuchung, die an einem Modell durchgeführt wird. Zwar fallen bei diesem Modell keine Beschaffungskosten an und der Aufbau ist schülergerecht gestaltet, dennoch lässt es sich weder aus fachlicher, noch aus didaktischer Sicht legitimieren.

6.2.3 Experiment zur Coriolis-Beschleunigung

Dieses vom Autor betitelte Experiment beinhaltet keinen auf der Coriolis-Kraft basierenden Effekt. Ein Ball hängt an einer Schur und rotiert. Etwas Farbe wird von der Aufhängung an abwärts auf den Ball getropft (siehe S. 45). Wegen geringer Reibung kann man ungefähr von einer konstanten Rotationsgeschwindigkeit des Balls ausgehen. Entscheidend ist, dass der Gegenstand, dessen Abstand zur Rotationsachse verändert wird, in diesem Fall die Tinte, nicht rotiert. Somit kann auf diesen Gegenstand keine Coriolis-Beschleunigung wirken. Die Grundvoraussetzungen dafür sind nicht gegeben. Deutlich machen kann man sich diesen fachlichen Fehler, indem man versucht, die Ablenkung für die entgegengesetzte Bewegung durchzuführen. Bei allen Untersuchungen oder Modellen, die tatsächlich die C-K veranschaulichen, ist dies theoretisch möglich, aber in einigen Fällen wegen der Montierung der Einzelteile nicht praktikabel. Im Fall dieses Unterrichtsbeispiels ist es hingegen bereits theoretisch unmöglich. Des Weiteren hängt die radiale Geschwindigkeit stark vom Durchführenden ab, wodurch jeder Durchgang ein unterschiedliches Ergebnis liefern wird.

Ferner handelt es sich bei diesem Unterrichtsansatz nicht um ein Experiment. Es gibt keinen Einflussfaktor der isoliert, systematisch variiert und kontrolliert wird. Die Apparatur liefert keine reproduzierbaren Ergebnisse. Des Weiteren taucht die fachliche Ungenauigkeit beim Vergleich mit dem geowissenschaftlichen Phänomen wieder auf. Der Ball kann zwar mit der Erde verglichen werden, doch was symbolisiert die Tinte? Alle Luftteilchen in der Atmosphäre rotieren mit der Erde mit.

Man kann diesen Fehler auch nicht mit der didaktischen Reduktion legitimieren. Es handelt sich hier keineswegs um eine bloße Vereinfachung. Trotz relativ hoher Praktikabilität empfiehlt es sich nicht, dieses Modell anzuwenden, da es bei den SuS falsche Vorstellungen hervorruft und nicht zum Verständnis der C-K beiträgt. Eine einfache

Ablenkung könnte die Lehrkraft ebenfalls an der Tafel darstellen, anstatt eine Apparatur zu verwenden, die die Grundvoraussetzungen nicht erfüllt.

6.2.4 Einfaches Experiment zur Coriolis-Kraft

Bei diesem Unterrichtsansatz wird eine Bahnkurve durch einen Stift auf einer rotierenden Scheibe erfasst. Des Weiteren wird das Schreibgerät durch eine Fallrinne ersetzt und eine Kugel wird auf die rotierende Scheibe gerollt (siehe S. 46). Aus fachlicher Sicht sind beide Ansätze falsch. In beiden Fällen rotiert der Gegenstand nicht, der seinen Abstand zur Rotationsachse verändert. Im ersten Fall ist es der Stift, der an einer im ruhenden Bezugssystem montierten Schiene entlang gleitet. Im zweiten Fall sind es die Fallrinne und damit auch der Ball, die nicht rotieren.

Wie im zuvor beschriebenen Unterrichtsansatz handelt es sich auch hier nicht um Experimente, sondern um Untersuchungen an einem Modell. Es gibt keinen isolierten Einflussfaktor, der variiert und kontrolliert wird. Aus diesem Grund können keine reproduzierbaren Ergebnisse ermittelt werden. Die Bahnkurve hängt z.B. im ersten Fall stark von der Geschwindigkeit bei der Stiftführung ab.

Da das Modell fachlich nicht einwandfrei ist, ist die Parallelisierung wiederum erschwert. Die Erde wird zwar durch die Scheibe symbolisiert, aber welche Entsprechung finden der Stift bzw. die Kugel. Die Winde kommen hierfür nicht in Frage, da sie mit der Erde mitrotieren und daher zu jeder Zeit und an jedem Ort (mit Ausnahme der Pole) eine Bahngeschwindigkeit besitzen. Aufgrund dieses Mangels ist es unmöglich, eine Bewegung vom Pol in Richtung Äquator zu veranschaulichen. Somit wird der Coriolis-Effekt durch dieses Modell falsch dargestellt, da Grundvoraussetzungen des Phänomens nicht berücksichtigt werden.

Von geringen Beschaffungskosten kann ausgegangen werden, insofern ein Plattenspieler oder eine Töpferscheibe vorab vorhanden sind, die die Scheibe in konstante Rotation versetzen kann. Bei jüngeren Lehrergenerationen werden diese in der Regel nicht mehr zur Verfügung stehen, sodass sich die Beschaffung aller Einzelteile je nach individuellem Fall sehr unterschiedlich gestalten kann, während ihre Montage in beiden Fällen wenig aufwendig erscheint. Eine genaue Angabe der Preise, der Herkunft und ihrer Montage fehlt.

6.2.5 Zweidimensionales Modell

Viele SuS haben Schwierigkeiten, die Erde auf ein zweidimensionales Modell zu projizieren, bei dem die Erde entlang des Äquators aufgeschnitten wird. Um den SuS den Dimensionswechsel zu erleichtern, wird ein Modell bestehend aus einer Papierlampe vorgeschlagen. Mit einem Griff kann hier zwischen den Dimensionen hin und her gesprungen werden (siehe S. 47). Bereits im Unterrichtsansatz 1, 2 und 4 sowie in den folgenden Beispielen 7 bis 11 findet die Veranschaulichung in zwei Dimensionen statt. Um den SuS das Parallelisieren zwischen einem Modell bzw. einem Untersuchungsgegenstand und der Realität zu erleichtern, erscheint eine Papierlampe geeignet.

Ebenso häufig findet die Erklärung der Coriolis-Kraft mit Hilfe der verschiedenen Bahngeschwindigkeiten auf Kreisbahnen zunächst in zwei Dimensionen statt. Um den SuS das Verständnis zu erleichtern, kann eine zweidimensionale Erklärung am Beispiel eines Sportplatzes stattfinden. Hier können die SuS ihre Alltagserfahrungen zu Bahn- und Winkelgeschwindigkeiten einbringen. Versucht man die Ergebnisse auf die Erde zu übertragen, kann das Modell der Papierlampe wiederum den Dimensionswechsel erleichtern.

Der Aufwand und die Kosten für das Modell sind relativ überschaubar. Um mehrmalige Anwendungen zu gewährleisten, sollten die Pfeile und Beschriftungen auf die Lampe geklebt und nicht gemalt werden. Die Beschreibung durch den Autor erscheint einwandfrei.

6.2.6 Modell: drehender Kegelmantel

Bei diesem Modell wird Wasser von unten auf einen Kegelmantel gespritzt. Beide Gegenstände drehen sich zuvor mit der gleichen Geschwindigkeit (siehe S. 48). Unter der Annahme, dass das Modell eine konstante Rotationsgeschwindigkeit besitzt, ist es fachlich einwandfrei. Der Kegelmantel und das Wasser rotieren, womit eine wichtige Voraussetzung zur Demonstration der Coriolis-Kraft erfüllt ist. Des Weiteren ist von großer Bedeutung, dass das Wasser beim Herausspritzen eine radiale Geschwindigkeit besitzt, da sich der Abstand des Wassers zur Rotationsachse verändert.

In der Modellbeschreibung wird nicht erklärt, wie das Modell montiert werden muss, damit es um seine eigene Achse rotieren kann. Würde man es tatsächlich wie in Abbildung 22 dargestellt montieren, kann nicht von einer konstanten Rotationsgeschwindigkeit ausgegangen werden. Die Reibung zwischen dem Stab und der Aushöhlung, in der dieser steckt, wäre zu groß. In Abbildung 28 ist das originale Modell der Universität Oldenburg zu sehen. Dort scheint der Stab anders montiert worden zu sein. Es können

jedoch nur Vermutungen darüber geäußert werden, dass eine konstante Rotationsgeschwindigkeit angenommen werden darf, da eine Beschreibung durch die Autorin fehlt.

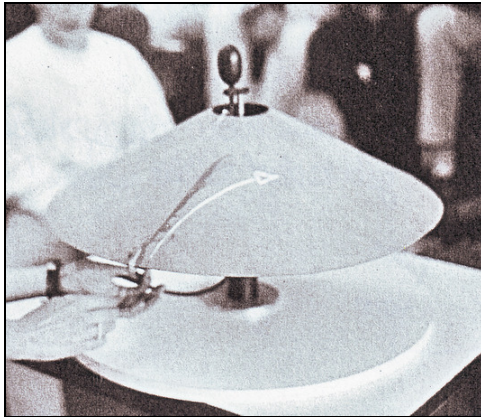


Abb. 28: Modell: drehender Kegelmantel¹⁰⁶

Bei der Apparatur handelt es sich um ein konkretes Modell, bei dem der Kegelmantel einen Ausschnitt der Erdoberfläche zwischen dem 60° und 70° nördlichen Breitengrad darstellt. Dabei umgeht die Autorin eine Vereinfachung von einer kugelförmigen Erde zu einer flachen Scheibe. Das herausspritzende Wasser symbolisiert eine Luftmasse, die sich in nördliche Richtung bewegt. Die Reduktion auf eine nordwärts gerichtete Strömung ist aufgrund der aufwendigen Montierung des Modells gerechtfertigt. Alle übrigen Einzelteile dienen entweder dem Zweck, den Kegelmantel bzw. den Erdausschnitt in Rotation oder das Wasser in Bewegung zu versetzen. Der Luftballon, der Schlauch und die Glasröhrchen entsprechen daher in der Realität einem Druckgefälle. Dies erfordert ein größeres Maß an Abstraktionsfähigkeit.

Welche Winde werden durch das Modell veranschaulicht? Zwischen 60° und 70° nördlicher Breite findet man in der Realität keine bodennahe nordwärts gerichtete Strömung vor. Versucht man das Modell auf die globale planetarische Zirkulation anzuwenden, so müssen die abgelenkten Wassermassen im Modell entweder in der Realität mit einem Höhenwind verglichen werden, oder es muss von einer anderen geographischen Breite ausgegangen werden, in der bodennah ein Druckgradient von Süd nach Nord besteht. Darüber hinaus muss erwähnt werden, dass der Effekt, wie in Abbildung 28 zu sehen, insgesamt nur mäßig durch das Modell veranschaulicht werden kann. Die Geschwindigkeit des Wassers hängt jedes Mal von der Schnelligkeit beim Zusammendrücken des Ballons ab, was bedeutet, dass die Wasserspur bei jedem Durchgang anders aussehen kann. Die Ergebnisse sind daher nicht reproduzierbar.

¹⁰⁶ KOHFAHL, H. (1994): Die Windablenkung auf der Nordhalbkugel durch den Einfluß der Corioliskraft. S. 44.

Ferner ist das Modell insgesamt sehr aufwendig gestaltet. Aufgrund der lückenhaften Beschreibung durch die Autorin ergeben sich vor allem Schwierigkeiten bei der Befestigung der Einzelteile. Auch die Beschaffung aller Bestandteile könnte sich relativ schwierig gestalten. Einen Kegelmantel aus rauem Metall oder ein spitz zulaufendes um 180° gebogenes Glasröhrchen (Abb. 22, S. 48) ist kaum im Standardsortiment eines Baumarktes zu finden. So ist ihr Erwerb vermutlich mit einem gewissen Aufwand und Preis verbunden. Die Autorin gibt letztendlich keine unterstützenden Hinweise im Hinblick auf die Beschaffung der oben genannten Materialien.¹⁰⁷

6.2.7 Funktionsmodell zur allgemeinen Zirkulation

In diesem Unterrichtsansatz rotieren ein Ball, eine Rampe und eine Scheibe mit der gleichen Winkelgeschwindigkeit. Sobald die Auslösevorrichtung gezogen wird, behält der Ball seine Rotationsgeschwindigkeit bei, wird jedoch zudem mit Hilfe der Rampe radial beschleunigt (siehe S. 48). So wirkt die C-K auf den Ball, sodass dieser abgelenkt wird. Das Unterrichtsbeispiel ist fachlich einwandfrei und wird methodisch korrekt bezeichnet. Das Parallelisieren bereitet keine Schwierigkeiten. Das Brett entspricht der Erde, die Kugel den Winden und die Rampe einem Druckgradienten.

Da das Brett mit zugeschnittenem Papier ausgelegt ist und die Kugel zuvor in Wasser getaucht wird, wird der Coriolis-Effekt bei diesem Modell sehr gut sichtbar gemacht. Die Scheibe wird jedoch jedes Mal von Neuem in Rotationen versetzt. Die Winkelgeschwindigkeit ist somit bei jedem Durchgang unterschiedlich und damit auch die Stärke der Coriolis-Ablenkung. Die Ergebnisse sind nicht reproduzierbar.

Dieser Unterrichtsansatz ist der Einzige, für den der Autor die Beschaffungskosten abschätzt, die Herkunft der Materialien beschreibt sowie die Einzelteile genau benennt. Es wird folgende Bastelanleitung geliefert:

- | | |
|---|--------------------------------|
| - Drehplatte Snudda (Ikea) | 5,99 € |
| - Holzkeil (Baumarkt) | ca. 3 € (Packung mit 10 Stück) |
| - Hohlkehlleiste 20 x 20 mm (Baumarkt) | 2,50 € |
| - Gummiball (Durchmesser ca. 20 mm) | 0,50 € |
| - Klebeknete UHU Tac | ca. 2 € |
| - Dünne Schnur, Büroklammern, Holzleim, Holzbohrer 2 mm (ggf. auch anderer) | |

Die Herstellung eines Modells beträgt laut Schätzung etwa 14 Euro. Da die Durchführung in Gruppen gestaltet werden soll, hängen die Beschaffungskosten stark von der

¹⁰⁷ vgl. KOHFAHL, H. (1994): Die Windablenkung auf der Nordhalbkugel durch den Einfluß der Corioliskraft.

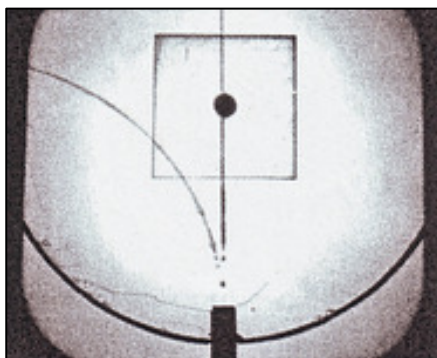
jeweiligen Anzahl der Gruppen ab. Die Beschaffung der Einzelteile ist wiederum von der Erreichbarkeit eines Ikea-Geschäftes und eines Baumarktes abhängig. Alle übrigen Teile sollten im Bastelhandel oder im Schreibwarenladen erhältlich sein. Die Montage erscheint wenig aufwendig, da der Aufbau dieses Modells sehr detailliert beschrieben ist.

Positiv ist bei diesem Unterrichtsansatz anzumerken, dass den SuS die Möglichkeit gegeben wird, eigene Erfahrungen mit dem Modell zu machen. Es findet keine Demonstration oder Steuerung durch die Lehrkraft statt.

6.2.8 Modell zur Demonstration des Coriolis-Effekts auf dem Overheadprojektor

Bei diesem aus Plexiglas bestehenden Modell rotieren eine Scheibe und eine außen an dieser befestigte Rampe mit einer beinahe konstanten Geschwindigkeit. Eine Kugel wird über die Rampe auf die Scheibe gerollt (siehe S. 49). Bevor die Kugel auf die Scheibe trifft, nimmt sie die Winkelgeschwindigkeit dieser an. Die Kugel wird durch die Rampe radial beschleunigt, sodass sie nach dem Auftreffen auf der Platte eine radiale Geschwindigkeit besitzt. Die beiden Voraussetzungen für die Beobachtung einer Coriolis-Ablenkung sind somit durch das Modell erfüllt. Es ist fachlich einwandfrei.

Der Methodenbegriff wird vom Autor korrekt eingesetzt. Es handelt sich um ein konkretes Modell (siehe 4.3.2). Die rotierende Scheibe entspricht der Erde und der Ball den Winden. Die Rampe symbolisiert die Beschleunigung des Windes aufgrund des Druckgradienten. Aufgrund der fest montierten Rampe können mit diesem Modell nur die Winde vom Äquator in Richtung Pol veranschaulicht werden. Diese didaktische Reduktion ist legitim. Der Coriolis-Effekt kann aufgrund der farbigen Spur, die die Kugel bei der Verwendung von Tinte auf der rotierenden Scheibe hinterlässt, sehr eindrucksvoll



visualisiert werden (siehe Abb. 29). Da jedoch die Rotationsgeschwindigkeit der Scheibe bei jedem Durchgang unterschiedlich sein kann, sind die Ergebnisse nicht reproduzierbar.

Abb. 29: Coriolis-Effekt auf dem Overhead-Projektor¹⁰⁸

¹⁰⁸ SECCO, R. A. (1999): Coriolis-Effect Demonstration on an Overhead Projector. S. 245.

Die Anschaffungskosten werden durch den Autor nicht kalkuliert. Man benötigt jedoch mehrere speziell zugeschnittene Einzelteile aus Plexiglas, dessen Anfertigung mit erhöhtem Aufwand und Kosten verbunden sein könnte. Die Anschaffung der übrigen Teile, wie Trichter, Kugellager, Kleber und Schrauben sollte keine größeren Probleme bereiten. Die Montage der Einzelteile gestaltet sich wiederum komplexer. Sie bedarf laut Autor etwa vier bis fünf Stunden. Da es sich um eine Demonstration auf dem Overheadprojektor handelt, benötigt man nur ein Modell, damit alle SuS die Geschehnisse beobachten können. Der Beschreibung des Modells durch den Autor ist nichts hinzuzufügen.

6.2.9 Modellversuch zur Coriolis-Ablenkung

In diesem Unterrichtsbeispiel wird die Erde durch eine große Metallscheibe und die Winde durch eine Stahlkugel symbolisiert. Beide rotieren aufgrund der Verwendung eines Kugellagers relativ konstant. Durch das Anstoßen der Kugel in eine beliebige Richtung verändert sich bei jeder Durchführung der Abstand der Kugel zur Rotationsachse, sodass insgesamt stets eine Rotationsgeschwindigkeit und eine radiale Geschwindigkeit vorhanden sind (siehe S. 50). Fachlich sind somit alle Voraussetzungen für die Demonstration der C-K gegeben.

Der Methodenbegriff wird durch den Autor nur teilweise richtig angewendet. Es handelt sich zwar um ein konkretes Modell, die Versuchskriterien der Isolation, Variation und Kontrolle einer Variablen sind hier jedoch nicht gegeben, da ausschließlich beobachtet wird. Das Parallelisieren ist in Bezug auf die Platte und die Kugel ohne weiteres möglich. Unklar bleibt die Entsprechung zur Schraubenmutter im Modell. Sie hält die Kugel auf ihrer Bahn. In der Realität rotiert die Atmosphäre von Natur aus mit derselben Winkelgeschwindigkeit wie die Erde. Außerdem wird die Kugel im Modell von außen durch ein Anstoßen beschleunigt. Die Beschleunigung des Windes aufgrund eines Druckgradienten wird dadurch nicht anschaulich dargestellt. Da die Kugel in alle Richtungen angestoßen werden kann, können sowohl polwärts als auch äquatorwärts gerichtete Strömungen durch das Modell dargestellt werden. Problematisch gestaltet sich dabei, dass die Scheibe sich während des Anstoßens der Kugel dreht und der Untersuchungsleiter nicht genau steuern kann, in welche Richtung die Kugel beschleunigt wird. Die Ergebnisse sind dadurch schwer reproduzierbar.

Da die drehende Platte mit schwarzer Folie beklebt ist und die Kugel zuvor in Kreidestaub getaucht wird, wird der Coriolis-Effekt mit diesem Modell gut sichtbar gemacht. Die Beschaffungskosten hängen stark davon ab, ob eine Töpferscheibe oder eine

Fahrradfelge zur Verfügung stehen. Die übrigen Einzelteile sollten leicht zu erwerben oder in der Physiksammlung zu finden und auszuleihen sein. Die Montage gestaltet sich wenig aufwendig. Die Beschreibung durch den Autor ist tadellos.

6.2.10 Lehrvideo zur Coriolis-Kraft

Das Lehrvideo zur Coriolis-Kraft (siehe S. 51) hat eine Länge von 6 Minuten und 11 Sekunden. Tabelle 1 zeigt, wie viel Zeit für die einzelnen Abschnitte verwendet wurde:

Tabelle 1: Die Länge und Inhalte der Abschnitte im Lehrvideo zur Coriolis-Kraft

0 - 34 s	1. <u>Einführung</u> : Drehrichtung eines Sturmtiefs auf der Nord- und Südhalbkugel
35 - 86 s	2. <u>Beschreibung des Aufbaus</u> : Benennung der Einzelteile und Größen; Skizze zum Aufbau
87 - 136 s	3. <u>Durchführung und Beobachtung</u> : Beobachtung der gleichen Bewegung mit zwei Kameras. Die Bilder der Kamera im rotierenden und ruhenden System werden nebeneinander gestellt.
137 - 219 s	4. <u>Messvideo zur Beobachtung der Bahnkurve im Laborsystem</u> : Die Position der Kugel wird markiert und im Polarkoordinatensystem dargestellt.
220 - 260 s	5. <u>Messvideo zur Beobachtung der Bahnkurve im rotierenden System</u> : Die Position der Kugel wird markiert und im Polarkoordinatensystem dargestellt.
261 - 371 s	6. <u>Messvideo zur Bestimmung der Theoriewerte der Bewegung</u> : Da im rotierenden System eine Beschleunigung auf eine Kugel wirkt, werden die Trägheitskräfte eingeführt, um die Bewegung mit Hilfe des 2. Newtonschen Axioms zu beschreiben. Anhand von Transformationsformeln werden die Umrechnung des Ortes, der Geschwindigkeit und der Beschleunigung mit Hilfe von Transformationsformeln erläutert. Die Richtung der C-K wird angegeben.

Die Struktur des Videos geht eindeutig aus Tabelle 1 hervor. So könnte der Film auch abschnittsweise abgespielt und zu jedem Abschnitt kleine Beobachtungsaufgaben gestellt werden. Der Kommentar verläuft parallel zum Bild und geht an jeder Stelle auf die Aussage des Bildes ein, wodurch diese verstärkt wird. In der Einleitung werden zum Beispiel Anmerkungen zu Sturmtiefs gemacht, bei der Beschreibung des Modells werden die einzelnen Bestandteile in ihrer Funktion erläutert und verschiedene Größen genannt. Die Aussage des Films ist insgesamt sachlich. Der genaue Inhalt wurde bereits in Abschnitt 5.2.10 dargestellt.

Bei den gezeigten Bildern handelt es sich in mehreren Fällen um statische Bilder, beispielsweise bei den Sturmtiefs, der Versuchsskizze und dem Polarkoordinatensystem.

Dynamische Bilder werden zum Beispiel bei den Kameraaufnahmen der rotierenden Scheibe gezeigt. Insgesamt sind die Bilder mit hartem Schnitt aneinandergereiht. Abschnitt 4, 5 und 6 werden jeweils mit Zwischentiteln eingeleitet. Die Bilder sind insgesamt nah am Objekt der Betonung, dem Modell, und klammern so die Umgebung und andere Aktionen idealerweise vollkommen aus.

Der Kommentar besteht aus kleinen Blöcken. Er wird insgesamt relativ langsam gesprochen, wobei nach jedem Satz eine kleine Pause eingefügt wird. Jeder Abschnitt beginnt mit einem neuen Textblock, in dem die gezeigten Bilder vorgestellt und erklärt werden. Bevor der nächste Abschnitt oder die nächsten Bilder folgen, wird eine kleine Textpause eingefügt, damit der Zuschauer die Informationen kurz wirken lassen und das Gesagte in den Bildern nachvollziehen kann.

Darüber hinaus werden aufmerksamkeitslenkende Mittel eingesetzt. Bei der Beschreibung des Modells werden beispielsweise die Einzelteile, die gerade kommentiert werden, gelb umrahmt und eine Schrift wird eingeblendet. Ferner ist der Bildausschnitt durchgehend sehr eng gewählt. Insgesamt wurde das Video anschaulich gestaltet. Die Bilder und der Kommentar sind auf wichtige Informationen und Prozesse reduziert. Dem Zuschauer wird dadurch ermöglicht, seine Aufmerksamkeit gänzlich dem komplexen Gegenstand zu widmet.

Das Darbietungstempo ist für Geographieschüler des Jahrgangs 11 bis einschließlich Kapitel 3 des Films geeignet. Ab dem vierten Teil des Videos wird mit Polarkoordinatensystemen gearbeitet, die jedem Schüler, unabhängig davon welche Fächer er wählt, bis zum Abitur unbekannt bleiben. Entscheidet die Lehrkraft, den vierten und fünften Abschnitt dennoch zu zeigen, weil dort der Unterschied zwischen den beiden Kurven veranschaulicht wird, müsste das Tempo hierbei gesenkt werden. Der sechste Abschnitt erscheint für den Geographieunterricht (GU) nicht mehr angemessen. Hier werden bei den SuS Kenntnisse über Newton'sche Axiome, Geschwindigkeit und Beschleunigung sowie über Trägheitskräfte vorausgesetzt. Die Beschleunigung sowie die Newton'schen Axiome lernen jedoch nur diejenigen SuS kennen, die in der Jahrgangsstufe 11 das Fach Physik gewählt haben. Da diese Gegenstände erst im fortgeschrittenen Halbjahr behandelt werden, während die atmosphärische Zirkulation in der Regel eines der ersten Themen im GU des Jahrgangs 11 darstellt, können diese Kenntnisse somit bei keinem Schüler und keiner Schülerin vorausgesetzt werden.

Abschließend sei noch angemerkt, dass der Film keine motivierende Einleitung beinhaltet. Die Problematik wird den SuS nicht deutlich gemacht. Ein Beispiel für eine Motivation in Bezug auf das Thema ist Abschnitt 6.4 zu entnehmen.

6.2.11 Physik auf einem rotierenden Bezugssystem

An den Enden eines fünf Meter langen gleichmäßig durch die SuS in Rotationen versetzten Brettes stehen zwei SuS und werfen sich den Ball zu. Des Weiteren versuchen die SuS über das Brett zu gehen, während es sich dreht (siehe S. 53). Fachlich ist dieses Modell einwandfrei, sofern die Rotationsgeschwindigkeit im kurzen Augenblick des Ballwurfs oder des Überschreitens des Brettes als konstant angenommen werden kann. Die radiale Geschwindigkeit ist durch die Bewegung der SuS oder des Balls in Richtung der Rotationsachse gegeben.

Methodisch handelt es sich bei diesem Unterrichtsansatz um ein konkretes Modell, was vom Autor unerwähnt bleibt. Bei der Anwendung des Modells auf die Realität ergibt sich folgendes Problem. Zwar kann die Erde durch das rotierende Brett symbolisiert werden, doch fehlt die Entsprechung für die in der Realität vorherrschenden Winde.

Die Luftteilchen werden durch Hoch- und Tiefdruckgebiete meridional beschleunigt, legen jedoch aufgrund der Coriolis-Ablenkung etwa 30° südlicher oder nördlicher Breite zurück. Der Ball bzw. die SuS legen jedoch eine Strecke vom einen bis zum anderen Ende des Brettes zurück. Das würde einer Bewegung vom Äquator über die Pole hinweg zurück zum Äquator entsprechen. Dieses Modell kann die zuvor beschriebene Luftzirkulation daher nicht optimal symbolisieren. Polwärts und äquatorwärts gerichtete Bewegungen werden durch die Ballwürfe und Bewegungen auf dem Brett gleichzeitig thematisiert, während in der Realität eine Bewegung vom Äquator zum Pol, jedoch nicht darüber hinaus zurück zum Äquator, erwartet wird. Das Parallelisieren zwischen Ball und Luftströmungen könnte sich daher problematisch gestalten. Unabhängig davon wird die Beschleunigung der Luftteilchen aufgrund bestehender Druckgradienten im Rahmen dieses Modells nicht aufgegriffen.

Die didaktische Reduktion der Realität auf das Modell erscheint trotz des Mangels beim Parallelisieren geeignet, da der Coriolis-Effekt hervorragend veranschaulicht werden kann und das Modell den SuS eine ausgezeichnete Möglichkeit bietet, die C-K selbst zu erfahren. Wenn sie beim Überschreiten des Brettes selbst gegen eine Kraft arbeiten müssen, werden sie keinen Zweifel an ihrer Existenz haben. Da sich jedoch jeder Schüler bzw. jede Schülerin individuell bewegt und den Ball unterschiedlich wirft, ist eine Reproduktion der Ergebnisse nicht möglich.

Die Beschaffungskosten werden durch den Autor nicht geschätzt. Da man laut der Beschreibung jedoch davon ausgehen kann, dass alle Einzelteile im Baumarkt erhältlich sind, bleibt der Aufwand für ihre Beschaffung gering. Während eine problemlose und zügige Montage möglich scheint, sind die Bedingungen für die Durchführung des Mo-

dells erschwert, da eine Realisierung im Klassenraum nicht möglich ist. Darüber hinaus ist die Lagerung am Durchführungsort zwingend notwendig, da ein Transport wegen der Länge des Modells problematisch ist.

6.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Vor- und Nachteile der einzelnen Unterrichtsansätze aus fachdidaktischen Zeitschriften wurden in den vorangehenden Kapiteln herausgestellt. Um eine übersichtliche Beurteilung der Ansätze zu ermöglichen, werden die Ergebnisse im Folgenden tabellarisch zusammengefasst.

Tabelle 2: Zusammenfassende Bewertung der Unterrichtsansätze

Unterrichtsansatz Nummer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Merkmale:											
fachlich korrekt	x	-	-	-	x	x	x	x	x	x	x
Rotationsgeschwindigkeit annähernd konstant	x	-	-	-	-	x	x	x	x	x	x
radiale Geschwindigkeit vorliegend	x	x	x	x	-	x	x	x	x	x	x
Methodenbegriff korrekt verwendet	-	-	-	-	x	x	x	x	-	x	-
Parallelisieren möglich	-	-	-	-	x	x	x	x	x	x	x
Rotation der Erde und der Winde beachtet	-	-	-	-	-	x	x	x	x	x	x
Beschleunigung des Windes aufgrund des Druckgradienten anschaulich dargestellt	-	-	-	-	-	-	x	x	-	x	-
Bewegung vom Äquator in Richtung Pol darstellbar	x	-	-	-	x	x	x	x	x	x	x
Bewegung vom Pol in Richtung Äquator darstellbar	x	x	x	x	x	-	x	-	x	x	x
didaktische Reduktion einwandfrei	x	-	-	-	x	x	x	x	x	-	x
Coriolis-Effekt einwandfrei sichtbar	-	-	-	-	x	-	x	x	x	x	x
Ergebnisse reproduzierbar	-	-	-	-	x	-	-	-	-	x	-
Coriolis-Beschleunigung berechenbar	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-

geringe Beschaffungskosten	x	x	x	x	x	-	-	-	-	x	-
Beschaffung der Einzelteile wenig aufwendig	x	x	x	-	x	-	x	-	-	x	x
Montage der Apparatur kaum aufwendig	x	x	x	x	x	-	x	-	x	x	x
Durchführung im Klassenraum möglich	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	-
Durchführung in einer Unterrichtsstunde möglich	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Schülerinteresse beachtet	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Beschreibung durch den Autor einwandfrei		-	-	-	x	-	x	x	x	x	-

Ansatz 2, 3 und 4 sind weder fachlich korrekt, noch lassen sie sich mit der Realität vergleichen. Die Autoren haben zwar auf geringe Beschaffungskosten und eine wenig aufwendige Montage geachtet, dabei jedoch eine korrekte didaktische Reduktion der Realität und eine korrekte methodische Bezeichnung vernachlässigt. Diese drei Ansätze sind somit ungeeignet für die Demonstration der Coriolis-Ablenkung und sollten keine Verwendung im Unterricht finden.

Die übrigen Modelle eignen sich aus fachlicher und didaktischer Perspektive für den Einsatz im Unterricht. Für einen tiefergehenden Vergleich werden die Ziele und Potenziale dieser Unterrichtsansätze in drei Gruppen betrachtet:

- Gruppe 1: Die Modelle dienen der Veranschaulichung des Coriolis-Effekts: 6, 7, 8, 9, 10, 11
- Gruppe 2: Dient als Hilfe beim Transfer von zwei auf drei Dimensionen: 5
- Gruppe 3: Dient der Erklärung des Coriolis-Effekts: 1, 10

Zunächst wird die Gruppe 1 genauer betrachtet:

Der Unterrichtsansatz 6 (drehender Kegelmantel) besitzt gegenüber den anderen Modellen den entscheidenden Nachteil, dass der Coriolis-Effekt trotz der aufwendigen Apparatur kaum sichtbar ist (Abb. 28). Er kann daher im Vergleich zu den anderen Modellen nicht empfohlen werden.

Der siebte Ansatz (Funktionsmodell zur allgemeinen Zirkulation) besitzt den herausragenden Vorteil, dass die Einzelteile inklusive ihrer Herkunft aufgelistet sind und die Beschaffung dadurch bedeutend erleichtert wird. Diese Informationen fehlen bei allen anderen Unterrichtsansätzen. Vergleicht man das siebte und achte Unterrichtsbeispiel (Demonstration auf dem Overheadprojektor), so fällt auf, dass sie sehr ähnlich aufge-

baut sind. Beim Plexiglasmodell ist von Vorteil, dass nur ein Modell benötigt wird, damit alle SuS etwas sehen können. Die Montage und Beschaffung könnte sich jedoch recht schwierig gestalten. Beim Funktionsmodell hingegen müssen mehrere Modelle montiert werden, dafür können die SuS selbst tätig werden. Beide Modelle machen den Effekt sehr gut sichtbar. Je nach gewünschter Sozialform oder Klassengröße, kann sich die Lehrkraft zwischen diesen beiden Modellen entscheiden. Je größer die Klasse, desto mehr Gruppen müssten beim siebten Ansatz gebildet werden und desto kostspieliger ist dessen Umsetzung.

Vergleicht man das neunte Beispiel (Modellversuch zur Coriolis-Ablenkung) mit dem siebten und achten Ansatz, so ist es weniger geeignet für den Einsatz im Unterricht. Die drei Modelle ähneln sich zwar sehr, doch sowohl das Parallelisieren als auch die Beschaffung der Einzelteile sind bei den zuletzt genannten Ansätzen unkomplizierter. Des Weiteren wird der Effekt an einer Apparatur durch den Lehrer vorgeführt, sodass weder die SuS tätig werden können, noch eine gleichzeitige Beobachtung durch alle SuS möglich ist.

Das Modell im Lehrvideo (Ansatz Nummer 10) gleicht dem Funktionsmodell des siebten Ansatzes. Es besitzt demgegenüber noch einige Vorteile. Alle SuS können die Geschehnisse in dem rotierenden sowie dem ruhenden Bezugssystem gleichzeitig von ihrem Platz aus beobachten. Außerdem bietet das Video die einmalige Möglichkeit, die C-K zu berechnen. Zuletzt entfallen die Beschaffungskosten. Zur Veranschaulichung des Coriolis-Effekts kann das Lehrvideo empfohlen werden.

Das letzte Unterrichtsbeispiel (Physik auf einem rotierenden Bezugssystem) unterscheidet sich im Aufbau und der Durchführung stark von den zuvor genannten. Zwar ist die Anwendung auf das Windsystem nicht ohne weitere Erklärung möglich, doch können die SuS hier selbst erfahren, wie die C-K auf den Körper wirkt. Dieses Modell wird bleibenden Eindruck hinterlassen. Sofern ein Ort für die Durchführung vorhanden und eine Lagerung in dessen Nähe möglich ist, kann die Anwendung dieses Modells befürwortet werden.

Gruppe 2:

Dieser Gruppe konnte nur ein Unterrichtsansatz (Zweidimensionales Modell) zugeordnet werden, der im Hinblick auf sein Ziel uneingeschränkt für den Einsatz im Unterricht geeignet ist. Es hilft den Schülern beim Transfer von einem zweidimensionalen Modell auf die dreidimensionale Realität.

Gruppe 3:

Um die Coriolis-Kraft zu erklären, stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung. Entweder können die SuS selbst auf dem Schulhof aktiv werden (Schülerversuch: Schüler in Bewegung) und sich die Coriolis-Ablenkung aufgrund der verschiedenen Geschwindigkeiten auf verschiedenen Kreisbahnen verdeutlichen, oder sie schauen ein Video und stellen fest, dass eine Ablenkung eine Beschleunigung voraussetzt und thematisieren Trägheitskräfte und Newton'sche Axiome. Da es sich bei der C-K um einen sehr komplexen Gegenstand handelt, kann hier eher die praktische Arbeit mit den SuS und die anschauliche Erklärung mit Hilfe des Ansatzes 1 empfohlen werden.

6.4 Eigene Erfahrungen zur C-K im Unterricht

Im Rahmen eines Schulpraktikums an einem Gymnasium bot sich mir die Möglichkeit, eigene Erfahrungen bei der Vermittlung der C-K im GU zu sammeln. Hierfür war eine Doppelstunde vorgesehen, die inhaltlich einer Erläuterung der thermischen Zirkulation am Beispiel des Land- und Seewindes folgte.

Ablauf der Doppelstunde:

Theoretische Hinführung: Als Einstieg hat nach einer kurzen Wiederholung der Erkenntnisse der letzten Stunde ein Transfer der thermischen Zirkulation von Land und See auf den globalen Maßstab stattgefunden. Die SuS zeichneten und erklärten an der Tafel die Zirkulation zwischen dem Äquator und den Polen. Es wurde festgehalten, dass die SuS aufgrund ihres Kenntnisstands Nord- und Südwinde zwischen dem Äquator und den Polen erwarten. Mit Hilfe einer Karte mit bodennahen Luftströmungen aus dem Schulatlas wurde diese Erwartung überprüft. Die SuS stellten fest, dass solche Luftströmungen in der Realität nicht beobachtet werden können. Was lenkt die Winde ab? Die SuS konnten ihre Vermutungen äußern.

Integration des Modells: Es wurde das Modell aus dem siebten Ansatz verwirklicht (siehe Abb. 30, S. 72), da dies gemäß der Ausführungen in den Kapiteln 5.2.7 und 6.2.7 und der Zusammenfassung auf Seite 68 der inhaltlich und didaktisch gelungendste Ansatz zur Vermittlung der C-K bzw. zur Veranschaulichung der Ablenkung der Winde zu sein scheint.

Aus Zeit- und Kostengründen entschied ich mich, den Prozess selbst an einem Modell vorzuführen, anstatt die SuS in Gruppen arbeiten zu lassen. Die geringe Klassengröße ließ diese Variante zu. In zwei Gruppen kamen die SuS nach vorne und beobachteten, wie sich die Kugel ab dem Verlassen der Rampe verhält. Dabei sollte die Drehung der

Platte möglichst nicht weiter beachtet werden. Die SuS sollten eine gerade Bewegung beobachten.

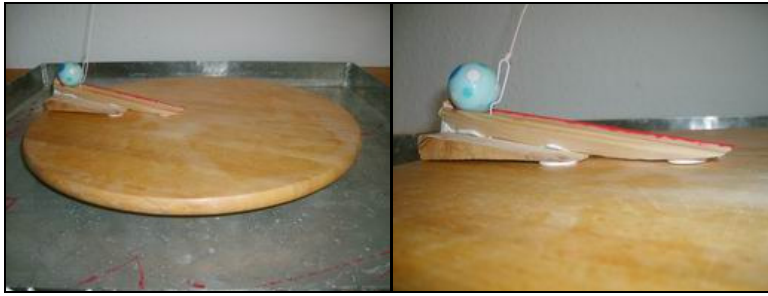


Abb. 30: Nachgebautes Funktionsmodell

Parallelisieren: Mit Hilfe des Papierlampenmodells wurde den SuS das Parallelisieren zwischen dem Modell und der Realität erleichtert. Das zu lösende Problem der Ablenkung der Winde kann durch die bloße Beobachtung jedoch nicht gelöst werden. Daher folgte eine weitere Vorführung des Modells mit der Änderung, dass die Kugel zuvor in Farbe getaucht wird. Auf der Platte bewegte sich die Kugel auf einer Kurve und wurde nach rechts abgelenkt (siehe Abb. 31). In einer Arbeitsphase wurden die SuS aufgefordert, den Versuchsaufbau, die Durchführung und ihre Beobachtungen festzuhalten.

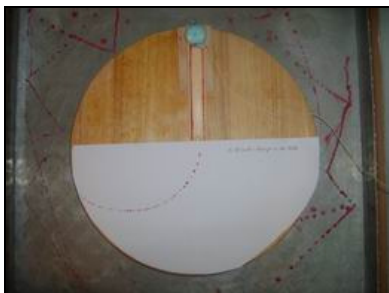


Abb. 31: Ablenkung der Kugel bei der Bewegung vom Mittelpunkt der Scheibe zum Rand

Theoretische Begründung: In einer zweiten Unterrichtsphase folgte die Erklärung des Beobachteten. Um an die Alltagserfahrungen der SuS anzuknüpfen, wurde hierzu das Beispiel des Sportplatzes aufgegriffen. Folgende Fragen wurden thematisiert:

Auf welcher Bahn auf dem Sportplatz würdet ihr am liebsten laufen? Warum? Wenn ihr gleichzeitig auf verschiedenen Bahnen losläuft und gleichzeitig im Ziel ankommen sollt, welcher Läufer auf welcher Bahn müsste am schnellsten laufen?

Transfer: Dieser Ansatz wurde bewusst gewählt, da die SuS den Begriff der Rotations- bzw. Winkelgeschwindigkeit bislang nicht aus dem Physikunterricht kennen. Mit Hilfe von Abbildung 32 (S. 73) sollten die SuS versuchen, ihre Erkenntnisse auf die Erde zu übertragen. Sie sollten die Bewegung eines Luftteilchens beschreiben, dass sich vom Äquator in nördliche Richtung bewegen will. Die Vermutung konnte mit Hilfe des Mo-

dells verifiziert oder falsifiziert werden (siehe Abb. 33). In einer zweiten Arbeitsphase sollten die SuS in Partnerarbeit die Bewegung einer Luftströmung vom Pol zum Äquator und die polwärts sowie äquatorwärts gerichteten Bewegungen auf der Südhalbkugel beschreiben und erklären.

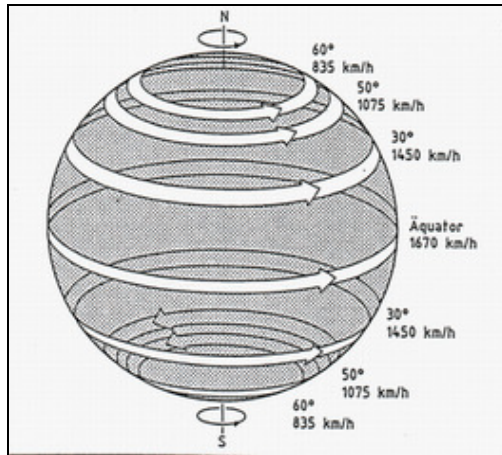


Abb. 32: Die verschiedenen Bahngeschwindigkeiten der Erde¹⁰⁹

Auf einem Arbeitsblatt, das zur Unterstützung ausgeteilt wurde, befanden sich zusätzliche Informationen zur C-K, z.B. über die Abhängigkeit der Stärke vom Breitenkreis und den Einfluss der Reibung. Des Weiteren wurden Abbildung 32 und zwei Bilder der Papierlampe in zwei und drei Dimensionen beigelegt. Nach der Möglichkeit Fragen zu stellen, wurden die wichtigsten Aspekte in knappen Sätzen an der Tafel festgehalten.

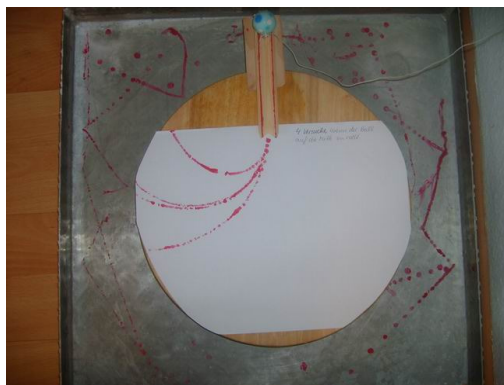


Abb. 33: Ablenkung der Kugel bei der Bewegung von außen zum Mittelpunkt der Scheibe

Fazit: Die Anschaffung und Montage der Einzelteile des verwendete Modell gestaltete sich dank der ausführlichen Beschreibung wie vermutet unkompliziert. Die Kosten entsprachen in etwa der Schätzung durch den Autor. Das Parallelisieren ist aufgrund der fachlichen Korrektheit und der methodisch gelungenen Umsetzung problemlos gelungen.

¹⁰⁹KOHFAHL, H. (1994): Die Windablenkung auf der Nordhalbkugel durch den Einfluß der Corioliskraft. S. 45

gen. Der Coriolis-Effekt war deutlich sichtbar. Das Modell wurde insgesamt seinen Erwartungen aufgrund der Bewertung unter 6.2.7 gerecht.

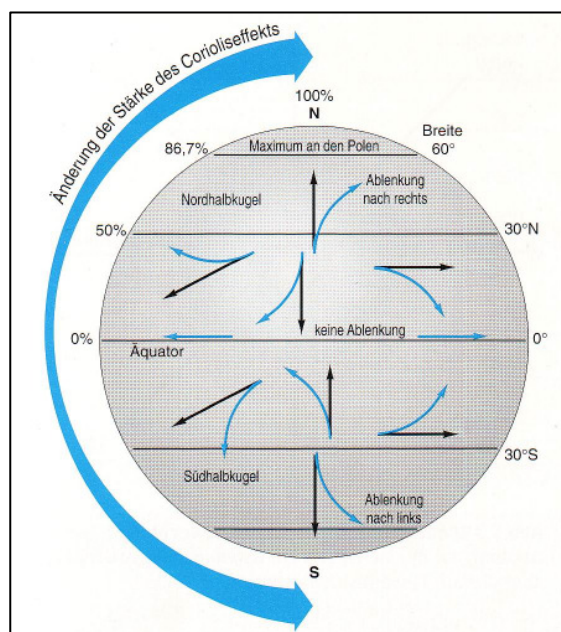
Ein Problem ergab sich jedoch bei der methodisch-didaktischen Integration des Modells in den Unterrichtsverlauf. Während der theoretischen Hinführung hatten die SuS vermutet, dass die Ablenkung der Winde mit der Erdrotation zu tun hat. Da sie eine Ablenkung erwarteten, sahen sie eine Ablenkung, obwohl sie sich im ruhenden Bezugssystem befanden und eine gradlinige Bewegung der Kugel hätten sehen müssen. Nach einem klärenden Gespräch und einer erneuten Beobachtung erkannten die SuS das Gegenteil. Der sichtbare Effekt der Ablenkung im rotierenden Bezugssystem war im Folgenden umso eindrucksvoller. Die angesprochene Problematik konnte im Rahmen mehrerer unabhängig von der Unterrichtseinheit durchgeführter Untersuchungen bestätigt werden. Die Beobachtungen im Hinblick auf die Bewegungsrichtung der Kugel hängen stark von den Erwartungen und Vorstellungen des jeweiligen Beobachters aufgrund seiner Vorkenntnisse ab. Dieses Problem konnte jedoch erst durch den praktischen Einsatz des Modells im Geographieunterricht aufgedeckt werden. Eine entsprechende Modifikation der theoretischen Hinführung zur Thematik erscheint daher sinnvoll.

Insgesamt haben sich sehr viele SuS am Unterricht beteiligt. Des Weiteren ist der Transfer auf die Südhalbkugel den SuS ohne weitere Hilfe durch die Lehrkraft gelungen. Die Arbeit mit dem Modell hat den SuS sichtlich Freude bereitet, insbesondere da Modelle und andere experimentelle Lehrformen im GU rar sind.

7 FAZIT

Die vorliegende Arbeit beleuchtete die Problematik der fachlich korrekten und methodisch sinnvollen Integration des geowissenschaftlichen Phänomens der C-K in den Geographieunterricht. Hierzu wurden 13 Schulbücher und 11 Unterrichtsansätze in Bezug auf die C-K auf ihre Anwendbarkeit im Geographieunterricht des ersten Jahrgangs der Oberstufe hin untersucht. Während einige Unterrichtsansätze aus diversen Gründen als mangelhaft einzustufen sind, sodass von deren Anwendung im Unterricht abgeraten wird, eignen sich andere wiederum sehr gut zur Veranschaulichung bzw. zur Erklärung der Coriolis-Kraft. Unter Verwendung eines der vorgeschlagenen Ansätze in der realen Unterrichtssituation in einer Klasse 11 eines Gymnasiums (siehe 6.3) erscheint der Gegenstand nicht zu anspruchsvoll für den GU zu sein und sollte daher auch Bestandteil des Lehrplans bleiben. Die eigenen Erfahrungen stützen diese These.

Die Fachkompetenz der Lehrer ist von herausragender Bedeutung für die Auswahl fachlich und methodisch korrekter Ansätze für den Unterricht. Die Aneignung fachlicher Kompetenzen basiert auf Fachliteratur. Im Rahmen dieser Arbeit musste festgestellt werden, dass diese nicht kritiklos als Basis für die Einarbeitung in die Thematik ‚Coriolis-Kraft‘ verwendet werden kann. Ein Beispiel liefert Abbildung 34. Hier werden Luft-



teilchen, die sich parallel zu den Breitenkreisen bewegen, durch die C-K abgelenkt. Bei dieser Bewegung sind jedoch die Voraussetzungen für die C-K nicht erfüllt (siehe 2.5 und 3.5). Es muss daher immer eine kritische Hinterfragung von Inhalten stattfinden, egal ob diese aus Fachzeitschriften, Schulbüchern oder aus der Fachliteratur stammen.

Abb. 34: Die ablenkende Wirkung der Erddrehung¹¹⁰

Die untersuchten Unterrichtsansätze konnten theoretisch im Hinblick auf einen fachlich und methodisch sinnvollen Einsatz im GU hin bewertet werden. Eigene Erfahrungen zeigen, dass bei der Integration eines Ansatzes in den Unterricht weitere methodisch-

¹¹⁰ STRAHLER, A. et al. (2002): Physische Geographie. S.100.

didaktische Probleme entstehen können. Diese können jedoch nur im Rahmen einer praktischen Umsetzung der Unterrichtsansätze herausgearbeitet werden.

Unabhängig davon könnte eine Optimierung der Lehre zum Thema C-K im GU durch eine parallele Behandlung des Gegenstandes im Physikunterricht erreicht werden. Derzeit wird der Gegenstand im Fach Physik jedoch erst gegen Ende des ersten Oberstufenjahrgangs erarbeitet, da er auf den zuvor im Schuljahr vermittelten Inhalten aufbaut. Es erscheint daher sinnvoll, im Rahmen der Fachkonferenzen der Geographie eine andere Anordnung der großen Inhaltsfelder im ersten Oberstufenjahr in Erwägung zu ziehen. So wären geeignetere Voraussetzungen für eine interdisziplinäre Verknüpfung der Lehrinhalte der Fächer Physik und Geographie und damit auch zur Vermittlung der C-K gegeben.

8 LITERATURVERZEICHNIS

- ARNING, Heike und LETHMATE, Jürgen (2003): Experimentelles Arbeiten im Geographieunterricht. In: Geographie und Schule. Heft 2003, Nr. 145, Jg. 25. S. 35 -39.
- BAUER, Jürgen, ENGLERT, Wolfgang, MEIER, Uwe, MORGENEYER, Frank und WALDECK, Winfried (Hrsg.) (2005): Materialien für den Sekundarbereich II - Geographie. Physische Geographie. Schroedel: Hannover.
- BAUER, Jürgen, KONOPKA, Hans-Peter, MACK, Wolfgang, MITTAG, Wolfgang, NEUMANN, Jürgen, NÜBLER, Wilfried und THEIßEN, Ulrich (Hrsg.) (1998): Mensch und Raum. Geographie 11. Gymnasium, Oberstufe, Nordrhein-Westfalen. Cornelsen: Berlin.
- BAUER, Jürgen, MACK, Wolfgang, NÜBLER, Wilfried und RENTZMANN, Klaus (Hrsg.) (1993): Mensch und Raum, Seydlitz. Physische Geographie. Cornelsen und Schroedel: Berlin.
- BEHR, Artur, FISCHER, Peter, FREGIEN, Wolfgang, KUNZ, Winfried, PETER, Andreas und RICHTER, Dieter (Hrsg.) (1996): Mensch und Raum, Seydlitz. Gymnasium, Oberstufe. Cornelsen und Schroedel: Berlin.
- BENDER; Hans-Ulrich, FETTKÖTER, Wolfgang, HIRT, Hartmut, KÜMMERLE, Ulrich und von der RUHREN, Norbert (2006): Fundamente. Geographisches Grundbuch für die Sekundarstufe II. Justus Perthes: Gotha.
- BENDER; Hans-Ulrich, KORBY, Wilfried, KÜMMERLE, Ulrich, von der RUHREN, Norbert, STEIN, Christoph und VIEHOF, Waldemar (2000): Terra Erdkunde Sekundarstufe II. Landschaftszonen und Stadtökologie. Justus Perthes: Gotha.
- BIRKHAUER, Josef (1997): Modelle im Geographieunterricht. In: Praxis Geographie. Heft 1/1997, Jg. 27. S. 4 - 8.
- BRAMEIER, Ulrich (Hrsg.) (2003): Terra Erdkunde Sekundarstufe II. Räume und Strukturen. Klett-Perthes: Gotha.
- BRANDT, Siegmund und DAHMEN, Dieter (2005): Mechanik. Eine Einführung in Experiment und Theorie. Springer-Verlag: Berlin, Heidelberg. 4. Auflage.
- BÜTOW, Martin, GRABOWSKI, Henning, MÜLLER, Cornelia, SCHNEIDER, Wolfgang, WALDECK, Winfried, WEHRS, Klaus und WINTER, Wolfgang (2005): Seydlitz, Geographie. Sekundarstufe II, Gesamtband, Nordrhein-Westfalen. Schroedel Verlag: Hannover.

- Cité des Sciences et de l'Industrie: The inertial merry-go-round. Online unter: http://www.cite-sciences.fr/english/ala_cite/expo/explora/mathematiques/math_15.htm. (abgerufen am 08.07.2009).
- CLAAßEN, Klaus (1997): Gruppen von Modellen. In: Praxis Geographie. Heft 1/1997, Jg. 27. S. 9 - 11.
- DEMTRÖDER, Wolfgang (2008): Experimentalphysik I. Mechanik und Wärme. Springer-Verlag: Berlin, Heidelberg. 5. Auflage.
- DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOGRAPHIE (2007) (Hrsg.): Bildungsstandards im Fach Geographie für den Mittleren Bildungsabschluss – mit Aufgabenbeispielen. 3. Auflage. Online unter: http://www.geographie.de/docs/geographie_bildungsstandards_aufg.pdf (abgerufen am 05.07.2009).
- DRIELING, Kerstin (2006): Der experimentelle Algorithmus. Das Beispiel Bodenversalzung. In: Praxis Geographie. Heft 11/2006, Jg. 36. S. 18 - 22.
- FALK, Gregor C., HUBER, Max, LEHMANN, Dirk und SCHNEIDER, Thomas (2005): Fundamente Kursthemen. Physische Geographie. Justus Perthes: Gotha.
- FLIEßBACH, Torsten (2007): Mechanik. Lehrbuch zur Theoretischen Physik I. Spektrum Akademischer Verlag: München. 5. Auflage.
- FRAEDRICH, Wolfgang (1997): Lernkartei. Atmosphäre – Klima - Coriolisbeschleunigung. In: Geographie heute. Heft 1997, Nr. 147, Jg. 18. S. 13.
- FRIESE, Heinz, W., KAULFUß, Wolfgang, RICHTER, Dieter und SAUPE, Gabriele (Hrsg.) (1996): GEOS. Lehrbuch Geographie, Sekundarstufe II. Band Landschaften und Ressourcen. Volk und Wissen Verlag: Berlin.
- GERBER, Wolfgang, KAMMERER, Dieter, KONOPKA, Hans-Dieter, KÜHNEN, Frank, MITTAG, Wolfgang, NEUMANN, Jürgen, THEIßEN, Ulrich und WIMMERS, Ralf (Hrsg.) (2003): Mensch und Raum. Geographie 11. Gymnasium, Oberstufe. Cornelsen: Berlin.
- GOLAY, David (2000): Das Interesse der Schüler/-innen am Schulfach Geographie in der Sekundarstufe I in der Region Basel. In: Geographie und ihre Didaktik. Heft 3/2000, Jg. 28. S. 131 – 147.
- HÄCKEL, Hans (1999): Meteorologie. Verlag Eugen Ulmer: Stuttgart. 4. Auflage.
- HALLIDAY, David (2003): Physik. Wiley-Verlag. Weinheim.
- HÄNSEL, Horst und NEUMANN, Werner (1993): Physik. Mechanik und Wärmelehre. Spektrum Akademischer Verlag: Heidelberg, Berlin.

- HAUBRICH, Hartwig (Hrsg.) (2006): Geographie unterrichten lernen. Die neue Didaktik der Geographie konkret. Oldenburger Schulbuchverlag: München, Düsseldorf, Stuttgart. 2. Auflage.
- HAUBRICH, Hartwig, KIRCHBERG, Günter, BRUCKER, Ambros, ENGELHARD, Karl, HAUSMANN Wolfram und RICHTER, Dieter (1997): Didaktik der Geographie konkret. Oldenbourg Verlag: München.
- HEMMER, Ingrid und HEMMER, Michael (2002): Mit Interesse Lernen. Schülerinteresse und Geographieunterricht. In: Geographie heute. Heft 2002, Nr. 202, Jg. 23. S. 2 - 7.
- HUPFER, Peter (Hrsg.) (2005): Witterung und Klima. Eine Einführung in die Meteorologie und Klimatologie. Teubner: Stuttgart. 11. Auflage.
- JOHNS, Robert H. (1998): Physics on a Rotating Reference Frame. In: The physics teacher. Heft 3/1998, Jg. 36. S. 178 - 180.
- KLOSE, Brigitte (2008): Meteorologie. Eine interdisziplinäre Einführung in die Physik der Atmosphäre. Springer-Verlag: Berlin, Heidelberg.
- KOHFAHL, Hilke (1994): Die Windablenkung auf der Nordhalbkugel durch den Einfluß der Corioliskraft. Ein anschauliches Modell für den Unterricht. In: Praxis Geographie. Heft 2/1994, Jg. 24. S. 44 - 45.
- KOWALKA, Hartmut (Hrsg.) (2006): Heimat und Welt. Oberstufe. Westermann: Braunschweig. 2. Auflage.
- KRAUS, Helmut (2004): Die Atmosphäre der Erde. Eine Einführung in die Meteorologie. Springer-Verlag: Berlin, Heidelberg. 3. Auflage.
- KUYPERS, Friedhelm (2008): Klassische Mechanik. WILEY-VCH Verlag: Weinheim. 8. Auflage.
- LATZ, Wolfgang (Hrsg.) (2007): Diercke Geographie. Bildungshaus Schulbuchverlage: Braunschweig.
- LAUER, Wilhelm und BENDIX, Jörg (2004): Klimatologie. Westermann: Braunschweig. 2. Auflage.
- LETHMATE, Jürgen (2006): Experimentelle Lehrformen und Scientific Literacy. In: Praxis Geographie, Heft 11/2006, Jg. 36. S. 4 - 10.
- LETHMATE, Jürgen (2005): „Geomethoden“. Kritische Anmerkungen zum fachdidaktischen Verständnis geographischer Arbeitsweisen. In: Geoöko, Heft 2005, Nr. 3-4, Jg. 26. S. 252 - 282.

- LETHMATE, Jürgen (2003): Sind „geographische Experimente“ Experimente? In: Praxis Geographie. Heft 3/2003, Jg. 23. S. 42 - 43.
- LITTMANN, Thomas (1994): Physikalische Grundlagen und Übungen zur Klimatologie. Brockmeyer: Bochum. 2. Auflage.
- LÜDERS, Klaus und von OPPEN, Gebhard (2008): Lehrbuch der Experimentalphysik Band I. Mechanik, Akustik, Wärme. Walter de Gruyter: Berlin. 12. Auflage.
- MALBERG, Horst (2007): Meteorologie und Klimatologie. Eine Einführung. Springer-Verlag: Berlin, Heidelberg. 5. Auflage.
- MITTELSTAEDT, Peter (1995): Klassische Mechanik. BI-Wiss-Verlag: Mannheim, Leipzig. 2. Auflage.
- MINISTERIUM FÜR SCHULE UND WEITERBILDUNG, WISSENSCHAFT UND FORSCHUNG (2008): Kernlehrplan für das Gymnasium - Sekundarstufe I in Nordrhein-Westfalen. Physik. Ritterbach Verlag: Frechen.
- MINISTERIUM FÜR SCHULE UND WEITERBILDUNG, WISSENSCHAFT UND FORSCHUNG (2007): Kernlehrplan für das Gymnasium - Sekundarstufe I (G8) in Nordrhein-Westfalen. Erdkunde. Ritterbach Verlag: Frechen.
- MINISTERIUM FÜR SCHULE UND WEITERBILDUNG, WISSENSCHAFT UND FORSCHUNG (2007): Kernlehrplan für das Gymnasium - Sekundarstufe I (G8) in Nordrhein-Westfalen. Mathematik. Ritterbach Verlag: Frechen.
- MINISTERIUM FÜR SCHULE UND WEITERBILDUNG, WISSENSCHAFT UND FORSCHUNG (1999): Richtlinien und Lehrpläne für die Sekundarstufe II - Gymnasium / Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen. Erdkunde. Ritterbach Verlag: Frechen.
- MINISTERIUM FÜR SCHULE UND WEITERBILDUNG, WISSENSCHAFT UND FORSCHUNG (1999): Richtlinien und Lehrpläne für die Sekundarstufe II - Gymnasium / Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen. Mathematik. Ritterbach Verlag: Frechen.
- MINISTERIUM FÜR SCHULE UND WEITERBILDUNG, WISSENSCHAFT UND FORSCHUNG (1999): Richtlinien und Lehrpläne für die Sekundarstufe II - Gymnasium / Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen. Physik. Ritterbach Verlag: Frechen.
- MUCKENFUß, Heinz (1997): Experimentieren in der Wetterkunde. In: Naturwissenschaften im Unterricht. Physik. Heft 8/1997, Nr. 42. S. 13 - 21.
- NAGY, Birgit und WIECKERT, Roland (1999): Die Ablenkung der Winde. Zwei Schülerversuche. In: Praxis Geographie. Heft 11/1999, Jg. 29. S. 42 - 43.

- NOLTING, Wolfgang (2005): Grundkurs - Theoretische Physik 1. Klassische Mechanik. Springer-Verlag: Berlin, Heidelberg. 7. Auflage.
- OBERMAIER, Gabriele (1997): Strukturen und Entwicklung des geographischen Interesses von Gymnasialschülern in der Unterstufe - eine bayernweite Untersuchung. Münchener Universitätsschriften: München. Band 9.
- OEHME, Wolfgang und RIEGER, Peter (1996): Besseres Verstehen durch genaueres Sehen. Anregungen zum Einsatz der Videotechnik im Physikunterricht (Teil 3). In: Physik in der Schule. Heft 2/1996, Jg. 34. S. 67 - 69.
- OTTO, Karl-Heinz (2003): Experimentieren im Geographieunterricht. In: Geographie heute. Heft 2003, Nr. 208, Jg. 24. S. 2 - 7.
- SCHIRRA, Norbert (o. A.): Coriolis-Kraft. Eine Kraft in fünf Phänomenen. (o. A.).
- SCHÖNWIESE, Christian-Dietrich (2008): Klimatologie. Ulmer: Stuttgart. 3. Auflage.
- SECCO, Richard Andrew (1999): Coriolis-Effect Demonstration on an Overhead Projector. In: The physics teacher. Heft 4/1999, Jg. 37. S. 244 - 245.
- STEPHANI, Hans und KLUGE, Gerhard (1995): Theoretische Mechanik. Punkt- und Kontinuumsmechanik. Spektrum Akademischer Verlag: Berlin, Heidelberg.
- STOBER, Matthias (2006): Globale Windsysteme und Corioliskraft. Ein Unterrichtsentwurf zur Herleitung komplexer Zusammenhänge mithilfe einfacher Funktionsmodelle. In: Praxis Geographie. Heft 11/2006, Jg. 36. S. 23 - 27.
- STRAHLER, Alan und STRAHLER, Arthur (2002): Physische Geographie. Verlag Eugen Ulmer: Stuttgart. 2. Auflage.
- VOGEL, Peter (1986): Didaktische Reduktion. In: HALLER, Hans-Dieter und MEYER, Hilbert (Hrsg.): Enzyklopädie Erziehungswissenschaft. Band 3: Ziele und Inhalte der Erziehung und des Unterrichts. Klett-Cotta: Stuttgart. S. 567 -571.
- WAGNER, Andreas, ALTHERR, Stefan, ECKERT, Bodo und JODL, Hans-Jörg (2007): Multimedien zur Physikausbildung. Coriolis- und Zentrifugalkraft im rotierenden Bezugssystem. Online unter: http://pen.physik.uni-kl.de/medien/MM_Videos/index.html (abgerufen am 12.08.2009).
- WAGNER, Andreas, ALTHERR, Stefan, ECKERT, Bodo und JODL, Hans-Jörg (2007): Multimedien zur Physikausbildung. Lehrvideo zur Corioliskraft. In: Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule. Heft 3/2007, Jg. 56. S. 39 - 41.
- WESS, Julius (2008): Theoretische Mechanik. Springer-Verlag: Berlin, Heidelberg.

- WIECZOREK, Ulrich (1992): Geographie als Systemanalyse - Konzeptionelle Überlegung für die Erdkunde in der gymnasialen Oberstufe. In: Geographie und ihre Didaktik. 2/1992. Jg. 20. S. 65 - 90.



ANHANG

ANHANG

Anhang 1:	Tabelle 3.....	85
Anhang 2:	Tabelle 4.....	86
Anhang 3:	Tabelle 5.....	87
Anhang 4:	Tabelle 6.....	89
Anhang 5:	Abbildungen I bis V zur C-K aus Schulbüchern.....	90
Anhang 6:	Tabelle 7.....	91
Anhang 7:	Abbildungen zum Video.....	92

Anhang 1

Tabelle 3: Geographiebücher des Landes Nordrhein-Westfalen für die Oberstufe

	Autor	Jahr	Titel
1	BÜTOW, M.	2005	Seydlitz, Geographie. Sekundarstufe II, Gesamtband, Nordrhein-Westfalen.
2	BAUER, J.	1993	Mensch und Raum, Seydlitz. Physische Geographie.
3	BAUER, J.	1998	Mensch und Raum. Geographie 11. Gymnasium, Oberstufe, Nordrhein-Westfalen.
4	GERBER, W.	2003	Mensch und Raum. Geographie 11. Gymnasium, Oberstufe.
5	KOWALKA, H.	1006	Heimat und Welt. Oberstufe.
6	FRIESE, H. W.	2001	GEOS. Lehrbuch Geographie, Sekundarstufe II. Band Landschaften und Ressourcen.
7	BAUER, J.	2005	Materialien für den Sekundarbereich II - Geographie. Physische Geographie.
8	FALK, G. C.	2005	Fundamente Kursthemen. Physische Geographie.
9	BENDER, H.-U.	2006	Geographisches Grundbuch für die Sekundarstufe II.
10	BENDER, H.-U.	2000	Terra Erdkunde Sekundarstufe II. Landschaftszonen und Stadtökologie.
11	BRAMEIER, U.	2003	Terra Erdkunde Sekundarstufe II. Räume und Strukturen.
12	BEHR, A.	1996	Mensch und Raum, Seydlitz. Gymnasium, Oberstufe.
13	LATZ, W.	2007	Diercke Geographie.

Anhang 2

Tabelle 4: Umfang der Inhalte zur Coriolis-Kraft in den Geographiebüchern

Anzahl der Sätze	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Buch 1													x	
Buch 2										x				
Buch 3										x				
Buch 4														x
Buch 5					x									
Buch 6							x							
Buch 7														x
Buch 8							x							
Buch 9											x			
Buch 10													x	
Buch 11	x													
Buch 12	x													
Buch 13	x													

Anhang 3

Tabelle 5: Inhalte der Unterrichtsbeispiele aus den 10 Geographiebüchern, in denen die Coriolis-Kraft erwähnt wird, sortiert nach Ursachen und Erklärungen, weiteren Eigenschaften sowie Wirkungen und Folgen

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ursachen und Erklärung:										
Rotation der Erde	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Breitenkreisradius wird zu Polen hin geringer		x	x				x	x	x	
Rotationsgeschwindigkeit hängt vom Breitenkreis ab	x	x	x	x			x	x	x	
Geschwindigkeitsüberlagerung		x	x				x			
Massenträgheit	x	x	x	x		x	x		x	
Bezugssystem										
Eigenschaften:										
Abhängigkeit der Stärke der C-K von der geographischen Breite	x				x	x	x			x
am Äquator Null					x	x	x			x
Reibung	x	x	x	x			x		x	x
nimmt mit der Geschwindigkeit zu					x		x			
benannt nach dem Physiker de Coriolis		x	x			x	x			x
Ablenkung eines Flugzeuges/ einer Kanonenkugel								x		x

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Folgen und Wirkungen:										
Ablenkung auf der Nordhalbkugel nach rechts	x			x	x	x	x	x	x	x
Ablenkung auf der Südhalbkugel nach links	x			x	x	x	x	x		x
Ablenkung meridionaler Bewegungen	x	x	x				x			
Ablenkung horizontaler Winde					x					
Ablenkung aller Winde				x		x		x	x	x
wirkt im rechten Winkel zur Bewegungsrichtung							x			
Westwinde	x	x	x	x		x	x		x	x
Ostwinde	x							x		
isobarenparallele Winde in der Höhe		x	x	x					x	x
kein rascher Druckausgleich / Luftmassenaustausch		x	x		x				x	x
Hoch- und Tiefdruckgebiete				x						
Höhenstrahlstrom/ Jetstream							x			

Anhang 4

Tabelle 6: Abbildungen zur Coriolis-Kraft

	Abbildung I	Abbildung II	Abbildung III	Abbildung IV	Abbildung V
1	-	-	-	-	-
2	x	-	x	-	-
3	x	-	-	-	-
4	-	x	-	-	-
5	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-
7	x	-	-	-	-
8	-	x	-	x	-
9	-	-	-	-	x
10	-	-	x	-	x

Erläuterung:

Abbildung I: Der geostrophische Wind wird unter Berücksichtigung der Gradient- und der Coriolis-Kraft dargestellt (siehe Anhang 5).

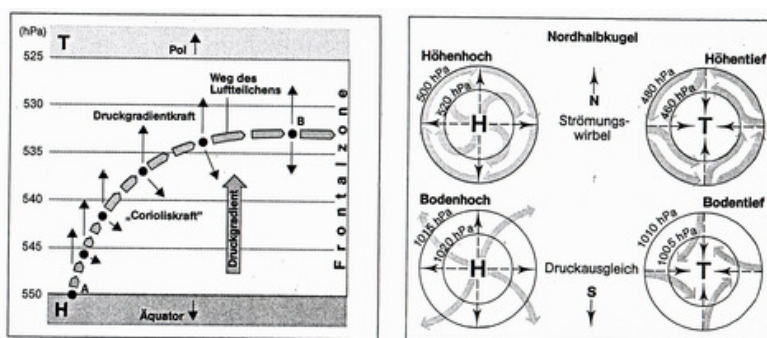
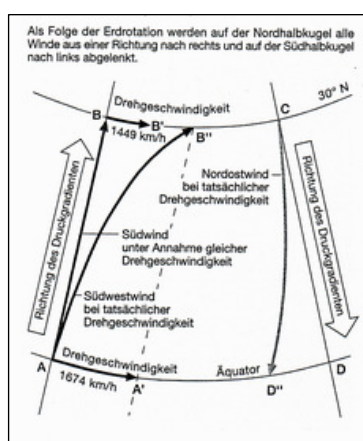
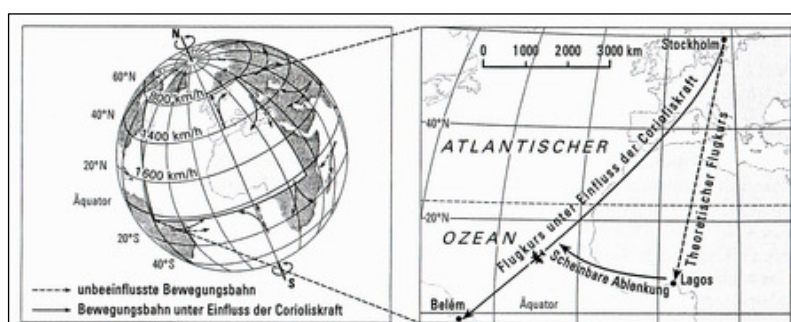
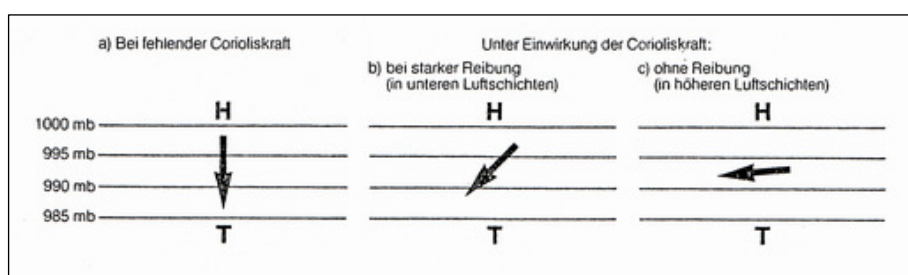
Abbildung II: Auf einem Erdausschnitt oder der ganzen Erdkugel werden verschiedene Flugbahnen mit und ohne Coriolis-Kraft illustriert (Anhang 5).

Abbildung III: Die Windrichtungen in Hoch- und Tiefdruckgebieten werden veranschaulicht (Anhang 5).

Abbildung IV: Diese Abbildung zeigt die Ablenkung eines Flugzeuges durch die Coriolis-Kraft (Anhang 5).

Abbildung V: Es werden einige Isobaren und der Wind unter Vernachlässigung und Berücksichtigung der Coriolis-Kraft sowie unter Beachtung der Reibung dargestellt (Anhang 5).

Anhang 5:

Abb. 35: Abbildung I und Abbildung III¹¹¹Abb. 36: Abbildung II¹¹²Abb. 37: Abbildung II und Abbildung IV¹¹³Abb. 38: Abbildung V¹¹⁴¹¹¹ BAUER, J. et al. (Hrsg.) (1993): Mensch und Raum, Seydlitz. S. 83.¹¹² GERBER, W. et al. (Hrsg.) (2003): Mensch und Raum. S. 188.¹¹³ FALK, G. C. et al. (2005): Fundamente Kursthemen. S. 54.¹¹⁴ BENDER, H.-U. et al. (2006): Fundamente. S. 27.

Anhang 6

Tabelle 7: Nummerierung der Unterrichtsansätze aus den fachdidaktischen Zeitschriften

Nummer	Unterrichtsansatz
1	Schülerversuch: Schüler in Bewegung
2	Schülerversuch: Papierscheibe
3	Experiment zur Coriolis-Beschleunigung
4	Einfaches Experiment zur Coriolis-Kraft
5	Zweidimensionales Modell
6	Modell: drehender Kegelmantel
7	Funktionsmodell zur allgemeinen Zirkulation
8	Modell zur Demonstration des Coriolis-Effekts auf dem Overheadprojektor
9	Modellversuch zur Coriolis-Ablenkung
10	Lehrvideo zur Coriolis-Kraft
11	Physik auf einem rotierenden Bezugssystem

Anhang 7

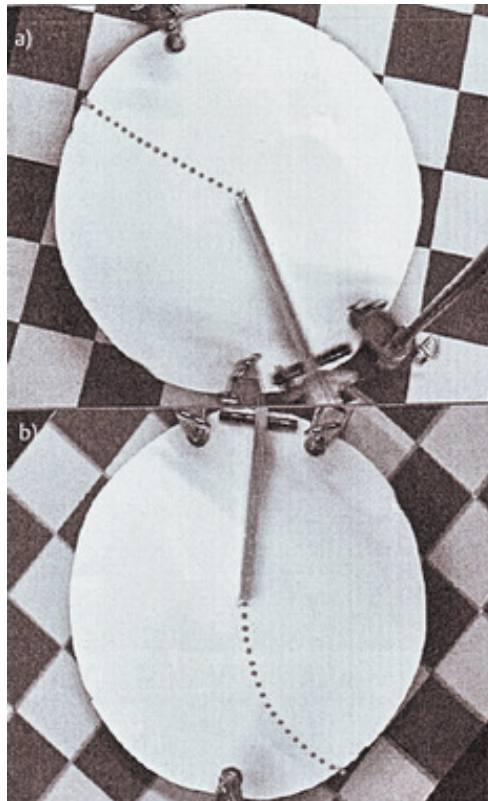


Abb. 39: Versuchsergebnis ein und derselben Bewegung mit markierter Trajektorie¹¹⁵

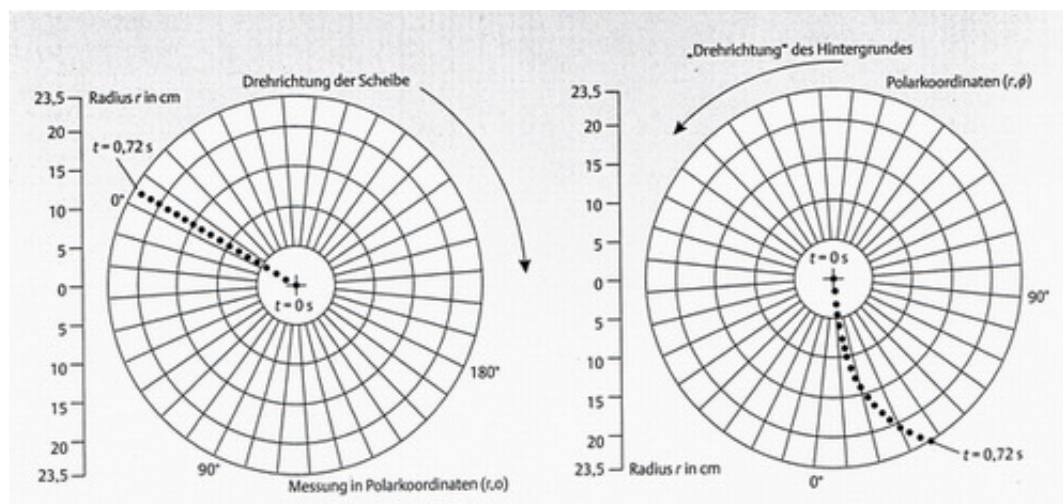


Abb. 40: Polardiagramm der in Abb. 39 dargestellten Bewegung¹¹⁶

¹¹⁵ WAGNER, A. et al. (2007): Multimedien zur Physikausbildung. S. 40.

¹¹⁶ WAGNER, A. et al. (2007): Multimedien zur Physikausbildung. S. 40.

Eigenständigkeitserklärung

Ich versichere, dass die schriftliche Hausarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Alle Stellen der Arbeit, die anderen Werken dem Wortlaut oder Sinn nach entnommen wurden, habe ich in jedem Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht. Das Gleiche gilt auch für die beigegebenen Zeichnungen, Kartenskizzen und Darstellungen.

(Datum, Unterschrift)