Studienseminar Rheine für Lehrämter an Schulen

Schriftliche Hausarbeit im Rahmen der zweiten Staatsprüfung
für das Lehramt für die Sekundarstufe I und II

Experimentelle Untersuchung von dissipativen Strukturen im Rahmen des Oberstufenunterrichts zur Thermodynamik

Erstgutachter: Peter Bracker

Im Mai 2007 vorgelegt von
Malte Renius
Jüdefelder Straße 39
48143 Münster
Tel.: 0251 / 41 40 170
renius@gmx.de

Inhalt

1. Einleitung 1

2. Problemstellung 2

2.1. Das Problem der Anschaulichkeit 2

2.2. Die Natur als Untersuchungsobjekt der Physik 4

2.3. Erweitertes Verständnis des Energiebegriffes 5

3. Dissipative Strukturen und ihr Kontext in der Thermodynamik 7

3.1. Die Hauptsätze der Thermodynamik und die Entropie 7

3.1.1. Vorbereitung des 2. Hauptsatzes durch die kinetische Gastheorie 10

3.2. Nichtlinearität und Chaos 12

3.3. Dissipative Strukturen 13

4. Didaktische Entscheidungen 15

4.1. Anforderungen an eine Unterrichtsreihe 15

4.1.1. Die Obligatorik für den Grund- bzw. Leistungskurs 15

4.1.2. Die konzeptuellen Anregungen der Richtlinien 15

4.1.3. Anforderungen an eine innovative Reihe 16

4.2. Entwurf einer Reihe 16

4.2.1. Einstieg 17

4.2.2. Die kinetische Gastheorie 17

4.2.3. Die Energieerhaltung 18

4.2.4. Strukturzerfall und Entropie 18

4.2.5. Die Irreversibilität und der Zeitpfeil 18

4.2.6. Dissipative Strukturen 19

4.3. Entscheidungen hinsichtlich des Experimentes 19

4.3.1. Hinführende Experimente 19

4.3.2. Anforderung an das zentrale Experiment 20

5. Das Experiment zur Strukturbildung 21

5.1.1. Benötigte Materialien 21

5.1.2. Zum Aufbau 21

5.1.3. Wichtige Hinweise für den Nachbau 23

5.1.4. Durchführung des Versuchs 23

5.1.5. Beobachtungen 24

5.1.6. Schlussfolgerungen 25

6. Integration des Experiments in den Unterricht 26

6.1. Erarbeitung der physikalischen Grundlagen 26

6.1.1. Die Konvektion 27

6.1.2. Die Thermospannung 27

6.1.3. Das Peltier-Element 27
6.2. Durchführung des Experimentes im Unterricht 28
6.3. Anknüpfungspunkte 29
7. Ausblick 30
8. Anhang 31
8.1. Abbildungen 31

1. Einleitung

Die Beschäftigung mit dissipativen Strukturen und der Selbstorganisation von Prozessen in der Natur hat im naturwissenschaftlichen Unterricht lange Zeit wenig Beachtung gefunden. Erst in den letzten Jahren sind sie Bestandteil des Lehrplanes für die Oberstufe geworden, wo sie als Teilgebiet der Thermodynamik behandelt werden.

Ihre Aufnahme ins Curriculum war aus verschiedenen Gründen umstritten. Deshalb werden der fachlichen Darstellung dissipativer Strukturen auch didaktische Implikationen dieses Themengebietes zur Seite gestellt. Dies ist schon deswegen nötig, da ein didaktisch strukturiertes Konzept zur modernen Thermodynamik noch nicht erarbeitet wurde.

Auf der Klärung grundlegender Fragestellungen basierend, soll dann schließlich eine innovative Möglichkeit vorgestellt werden, die experimentelle Untersuchung dissipativer Strukturen mit den Möglichkeiten der Schulphysik im Rahmen des Oberstufenunterrichts durchzuführen. Dabei wurde ein vergleichsweise komplexes Experiment ausgewählt, welches, als Zielpunkt einer Unterrichtssequenz gedacht, den Schwerpunkt der Betrachtung bilden wird.

Abschließend wird exemplarisch aufgezeigt, wie eine unterrichtliche Einbindung des zentralen Experiments methodisch vorgenommen werden könnte. Dabei werden fachdidaktische Überlegungen mit den pädagogischen Zielen der Oberstufe verknüpft. Zudem wird dargestellt, welche Arbeitsmethoden im Rahmen der Unterrichtssequenz eingeübt werden können und welche übergeordneten Lernziele erreicht werden könnten.

2. Problemstellung

2.1. Das Problem der Anschaulichkeit

Physik ist als Wissenschaft trotz aller Modelle nicht intentional auf Anschaulichkeit angelegt, da sie als erkenntnisleitendes Interesse die Beschreibung der Wechselwirkungen in der Natur verfolgt. So kommen meist die Gesetze der Logik und speziell der Mathematik als Verstehenswerkzeuge zur Anwendung. Und die Physik widerspricht in vielen Punkten eindeutig dem, was weitläufig als anschaulich angesehen wird. Trotzdem muss der Physikunterricht, will er erfolgreich vermitteln, nicht nur eine Schulung des Abstraktionsvermögens der Schüler[1] befördern, sondern auch stets eine Veranschaulichung des Unterrichtsstoffes versuchen. Diese Diskrepanz zwischen fachwissenschaftlicher Theorie und dem auf Anschaulichkeit angelegten Verständnis der Schüler ist (neben der oft vernachlässigten Handlungsorientierung) wohl eine der Hauptursachen für die Unbeliebtheit des Faches.
Die Betrachtung von dissipativen Strukturen birgt neben grundlegenden und fachübergreifenden Erkenntnissen über Naturvorgänge eine Chance, Anschaulichkeit im Physikunterricht exemplarisch (zurück)zugewinnen.
Wenn man die drei wesentlichen historischen Entwicklungsstufen in der Modellbildung der Physik betrachtet, so weisen sie alle deutliche Schwierigkeiten bezüglich der Möglichkeiten eines anschaulichen Verstehens auf: So entspricht die Newtonsche Mechanik bereits mit ihrem ersten Axiom von der gleichförmigen Bewegung nur selten den Beobachtungen des Alltags, in dem nahezu jede Bewegung von Reibung gebremst wird. Bereits die Kräfte der Luftreibung sind so komplex, dass eine angemessene Behandlung im schulischen Physikunterricht gezielt umgangen werden muss. Selbst bei der Coulombschen Reibung, deren mathematische Beschreibung deutlich einfacher ist, handelt es sich um eine mehr oder minder grobe Näherung. Das erste Newtonsche Axiom bleibt also in den Augen vieler Schüler oft ein Dogma jenseits der eigenen Erfahrung. Lediglich in der klassischen Astronomie können die Newtonschen Gesetze nahezu ohne Einschränkung angewandt werden, da sich die Himmelskörper im interplanetaren Ultrahochvakuum quasi reibungsfrei, aber auch jenseits aller sinnlichen Konkretion, bewegen.
Die in der Oberstufe behandelte Relativitätstheorie ist ebenfalls im höchsten Maße unanschaulich, so dass, didaktisch gesehen, oft nicht mehr versucht wird, diese anschaulich zu

[1] Aus Gründen der Lesbarkeit werde ich in dieser Arbeit auf die weibliche Form der jeweiligen Bezeichnungen verzichten.

vermitteln, sondern, umgekehrt, ihre Unanschaulichkeit anhand von Paradoxien[2] deutlich zu machen.

Didaktisch bisher wenig reflektiert ist die dritte Entwicklungsstufe der Physik, die Quantentheorie. Abgesehen von Schrödingers Katze, die außerhalb der Fachkreise nur selten richtig gedeutet wird, existieren kaum populäre Vermittlungsmodelle. Wenn man den Umstand vermitteln möchte, dass die quasi-punktförmigen Elektronen am Doppelspalt die Eigenschaft Ort und Weg nicht besitzen, sind didaktische Konzepte der Veranschaulichung unumgänglich. Ein weitgehendes Fehlen solcher Konzepte ist wohl eine der wesentlichen Ursachen dafür, dass die Quantenmechanik als zurzeit vorherrschendes Paradigma der Physik bisher noch kaum über die akademischen Kreise hinaus elementar verstanden wurde.

Im Gegensatz zu den drei großen physikalischen Theorien ergeben sich die angesprochenen Probleme bei der Strukturbildung zunächst nicht, da Strukturen an sich anschaulich sind. Dies ist durch die einfache Tatsache begründet, dass unser Wahrnehmungsapparat auf die Rezeption von Strukturen angelegt ist. Jedem vom Menschen wahrgenommenen Reiz liegt eine Struktur zugrunde, da Strukturlosigkeit ein Fehlen von Information impliziert. Da Strukturbildung jeglicher Art nur durch Dissipation, also Entwertung von Energie, erfolgen kann, liegt es auf der Hand, dass diese dissipativen Strukturen nahezu überall zu finden sind. Sie stehen uns ständig vor Augen und sind somit wie kaum ein anderes physikalisches Phänomen augenscheinlich allgegenwärtig.

Im Zuge der Wahrung der Anschaulichkeit werden diese Strukturen zunächst nur qualitativ betrachtet, zumal eine spätere quantitative Betrachtung nur wenig detaillierte Ergebnisse ermittelt. Dies ist eine Konzession an die Komplexität der physikalischen Sachverhalte. Wichtig wird jedoch sein, dass sich die Beschäftigung mit der Strukturbildung mit der Größe der Entropie auseinandersetzt. Die Entropie ist von den zentralen physikalischen Größen wohlmöglich jene, welche gemeinhin die größten Schwierigkeiten beim grundsätzlichen Verständnis bereitet. Über die Bildung bzw. den Zerfall von Strukturen kann der in der Oberstufe bereits etablierten, rechnerischen Beschreibung der Entropie ein anschauliches, qualitatives Verständnis zur Seite gestellt werden.

[2] Als Beispiel sei hier die bekannte Paradoxie der beiden unterschiedlich alternden Zwillinge genannt.

2.2. Die Natur als Untersuchungsobjekt der Physik

In den Richtlinien heißt es, leitmotivisch, für die Beschreibung der Aufgaben und Ziele des Faches Physik:

> Der Physikunterricht in der Sekundarstufe I vermittelt wichtige grundlegende Kenntnisse und Qualifikationen, indem er Einsichten in Naturvorgänge eröffnet und für ein besseres Verständnis unserer natürlichen und technischen Umwelt sorgt. […]
>
> Der Physikunterricht der gymnasialen Oberstufe baut auf dem Physikunterricht der Sekundarstufe I auf und führt die […] formulierten Aufgaben und Ziele des Faches fort.[3]

Auffällig ist bei dieser Formulierung, dass das Verständnis der Natur gegenüber dem der Technik vorangestellt wird. Damit wird einem bloß auf die Technik fixierten Physikunterricht ein Riegel vorgeschoben, indem die Betrachtung und das Verständnis der Natur als wesentliche und nicht als untergeordnete Ziele dieses Faches ins Auge gefasst werden. Damit bleiben die Richtlinien der Tradition dieser wissenschaftlichen Disziplin treu, da die Reflexion über die Natur historisch den Ursprung der Physik[4] darstellt.

Für das Verständnis vieler Vorgänge in der Natur ist die klassische Schulphysik jedoch nur bedingt förderlich. Neben der geringen Eignung, komplexe Prozesse zu beschreiben, vernachlässigt sie zwei wesentliche Aspekte, welche für das Verständnis natürlicher aber auch unzähliger technischer Prozesse notwendig sind: Zunächst beschreibt die klassische Physik im Kontext der Energieerhaltung alle Prozesse im Prinzip als reversibel, was der Beobachtung fast aller natürlichen Prozesse widerspricht. Steine fallen von alleine nach unten, wie der Lehrplan im didaktischen Kommentar beispielhaft angibt.[5] Die beim Aufprall frei werdende Wärme verteilt sich. Sie kann sich aber unmöglich von alleine sammeln und den Stein wieder hochschleudern. Weniger abstrakte Beispiele sind Altern und Verfall von Lebewesen und Gegenständen. Zerstörung und Zerfall geschehen meist von selbst, eine

---

[3] Ministerium für Schule und Weiterbildung, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.): Richtlinien und Lehrpläne für die Sekundarstufe II – Gymnasium/Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen. Physik, Frechen 1999, S 5. Im Folgenden werden Angaben aus dem Lehrplan mit „Lehrplan Physik“ abgekürzt.

[4] Man denke an die Naturphilosophen (z.B. Parmidenes, Empedokles), die ihre Werke mit dem Titel περί φύσεος (altgriech. „peri physeos“ = „Über die Natur“) versahen und als Namensgeber der Physik angesehen werden. Sie beschäftigten sich nicht nur mit Themen, die heute der Philosophie zugeordnet werden, wie beispielsweise dem Ursprung der Dinge, sondern auch mit der Beobachtung der Vorgänge in der Natur und Versuchen, in diesen Gesetzmäßigkeiten auszumachen, aus welchen sie wiederum philosophische Metakonzepte ableiteten.

[5] Lehrplan Physik, S. 122f.

Herstellung des ursprünglichen Zustandes ist schwierig, wenn nicht gar unmöglich. Das Leben ist sozusagen voller Einbahnstraßen.

Eine weitere Beschränkung erfährt die Schulphysik in ihrem Bestreben, geschlossene Systeme zu beschreiben. Dieses simplifizierende Vorgehen mag didaktisch oft sinnvoll sein, jedoch darf darüber nicht vergessen werden, dass das einzige existierende, (möglicherweise) geschlossene System das Universum ist. Ansonsten finden sich nur offene Systeme. Geschlossene Systeme sind Gedankenkonstrukte, die oft zur Veranschaulichung von physikalischen Gesetzen in unterschiedlich guter Näherung hergestellt werden. Alltäglich sind diese quasi-geschlossenen Systeme selten. Der Umstand, dass es so viele offene Systeme gibt und dass diese mit der Umwelt Materie und Energie austauschen, ist meist kein Störfaktor, sondern Voraussetzung für deren Funktion. Somit ist die Kenntnis von offenen Systemen ganz wesentlich für deren Verständnis. Bei einer Beschränkung auf geschlossene Systeme bleibt das physikalische Denken bruchstückhaft bzw. es bildet sich bei den Schülern parallel zum Physikunterricht ein von dessen Inhalten losgelöstes oder zumindest nur teilweise gebundenes, praxistaugliches Denken.

Dieses ernsthafte physikalische Interesse, welches jedoch von der Schulphysik wegführt, verdeutlicht den konzeptionellen Mangel der herkömmlichen Schulphysik: Ohne ein schultaugliches Modell, welches das Phänomen der Irreversibilität einschließt und offene Systeme als Normalfall ansieht, sind Naturvorgänge und auch unzählige technische Anwendungen nur unzulänglich zu beschreiben.

2.3. Erweitertes Verständnis des Energiebegriffes

Die Energie zieht sich als zentraler Begriff durch das Curriculum des Physikunterrichtes wie kaum eine andere Größe. Gleich welcher Bereich der Physik, ob Mechanik, Optik, Elektrizitätslehre, Magnetismus oder Thermodynamik, gleich welches Paradigma, ob Relativitätstheorie, Quantenmechanik oder statistische Physik: überall wird die Energie als eine zentrale Größe angesehen.

Jede Art von Prozess kann über die Energiebilanz beschrieben werden. Dabei wird jedoch in der Physikdidaktik gerne übersehen, dass die Energie letztlich keine Ursache für einen physikalischen Vorgang ist. Denn die Energie unterliegt dem Erhaltungssatz. Sie fungiert deshalb bei allen Prozessen lediglich als Bilanzierungsgröße. Als Analogie wird in der Mittelstufe gerne der „Verbrauch“ von Wasser eingeführt. Wasser bleibt auch erhalten. Es wird jedoch entwertet.

Für ein Verständnis von Antrieb und selbstständig ablaufenden Prozessen erweist sich der Energiebegriff folglich nur bedingt als hilfreich. Aus diesem Grund ist eine Erweiterung des Energiebegriffes durch die Entropie notwendig. Diese ist nicht nur ein Maß für die Entwertung der Energie, vielmehr erweist sich das Bestreben der Natur nach Entropiemaximierung als Ursache jeglichen Geschehens. Ohne Entropiezunahme gibt es kein Ereignis. Bei allen beobachtbaren Vorgängen spielt die Entropiezunahme eine maßgebliche Rolle, während Energie lediglich übertragen oder umgewandelt wird.

Hiermit kann auch der Widerspruch zwischen der Kenntnis des Energieerhaltungssatzes und der alltäglichen Erfahrung des sog. Energieverbrauches durchbrochen werden: Bei allen Vorgängen in der Natur scheint Energie verloren zu gehen. Statt Erhaltung ist, sofern keine Zufuhr von hochwertiger Energie erfolgt, lediglich ein Verfall zu beobachten. Dem Widerspruch, der sich aus dieser richtigen und wesentlichen Beobachtung ergibt, kann nur mit der Einführung des Entropiebegriffes begegnet werden.

3. Dissipative Strukturen und ihr Kontext in der Thermodynamik

Der Lehrplan erweitert das herkömmliche Verständnis der Thermodynamik als Wärmelehre, indem er die Thermodynamik als „eine allgemeine Strukturtheorie“[6] auffasst. Die Beschäftigung mit der Thermodynamik wird also nicht auf die Beschäftigung mit der Zustandsgröße Temperatur in ihren physikalischen Zusammenhängen beschränkt, sondern auf weitere physikalische Disziplinen ausgeweitet. Die von den Richtlinien vorgenommene Definition, die deutlich weiter gefasst ist als jede der gängigen Lehrwerke, impliziert sogar einen fächerübergreifenden Thermodynamikbegriff.

Im Rahmen der Thermodynamik findet sich die Behandlung von dissipativen Strukturen im Lehrplan an zwei Stellen. Zum ersten wird das physikalische Phänomen zu Beginn der Thermodynamik direkt im Anschluss an die Einführung der Hauptsätze eingefügt. In welcher Weise die dissipativen Strukturen dabei mit der Beschäftigung der Entropie verknüpft werden sollen, lässt der Lehrplan offen. Der didaktische Kommentar zu diesem Abschnitt im Anhang nennt mit dem Aufprall eines fallenden Steines ein etwas bemühtes, aber letztlich doch nachvollziehbares Beispiel für eine Entropiezunahme. Eine Hilfestellung zur Eingliederung der dissipativen Strukturen findet sich jedoch nicht.

Am Ende der Beschäftigung mit der Thermodynamik, im Rahmen des Komplexes „Nichtlinearität und Chaos“, werden dissipative Strukturen im Kontext der Selbstorganisation ein weiteres Mal als Unterrichtsinhalt genannt.

In diesem Kontext spielt nicht mehr der Begriff der Entropie eine tragende Rolle, sondern hier werden die dissipativen Strukturen verwendet, um die Bedingungen für eine Selbstorganisation von Materie in geordneten Strukturen darzustellen und diese von jenen Zuständen abzugrenzen, aus welchen chaotische Zustände resultieren.

Das Experiment, welches im zweiten Teil der Arbeit im Detail vorgestellt wird, lässt sich theoretisch in beiden Themenkomplexen, entsprechend den thematischen Schwerpunkten, einbinden.

3.1. Die Hauptsätze der Thermodynamik und die Entropie

Das erste der fünf Themen der Thermodynamik, die „Energieerhaltung und Energieentwertung“, welches die Behandlung dissipativer Strukturen enthält, ist das einzige, welches Gegenstände benennt, die obligatorisch sind. Die Gastheorie, die Wärmekraftwerke und

[6] Lehrplan Physik, S. 119.

auch die neueren Teilbereiche der Thermodynamik, die Nichtlinearität und das Chaos werden zwar empfohlen, sind aber letztlich fakultativ.[7] Es wird nicht in letzter Konsequenz deutlich, inwiefern eine sinnvolle Aufarbeitung der obligatorischen Teile ohne die empfohlenen gelingen könnte. Es ist zu vermuten, dass dieser Kern der Thermodynamik anhand ausgewählter fakultativer Gegenstände erläutert werden soll. In welcher Weise dies geschieht, ist offenbar der Entscheidung der Lehrkraft bzw. der örtlichen Fachkonferenz überlassen. Festzustellen bleibt, dass sich die Reihenfolge der Themen und Gegenstände nicht zu einer chronologischen Umsetzung eignen, sondern in eine sinnvolle Struktur gebracht werden müssen.

Unter diesem Gesichtspunkt betrachtet, sind die vier letzten Themen als mögliche Hinführung bzw. als Anwendung für die Sätze der Thermodynamik zu verstehen. In der herkömmlichen Physikdidaktik werden die Hauptsätze der Thermodynamik zumeist mittels der Gasgesetze und der kinetischen Gastheorie erläutert, beziehungsweise werden die Gasgesetze herangezogen, um zu den Gesetzen der Thermodynamik hinzuführen.[8]

Die Abb. 1 veranschaulicht eine Möglichkeit, die im Lehrplan empfohlenen Gegenstände umzusetzen.

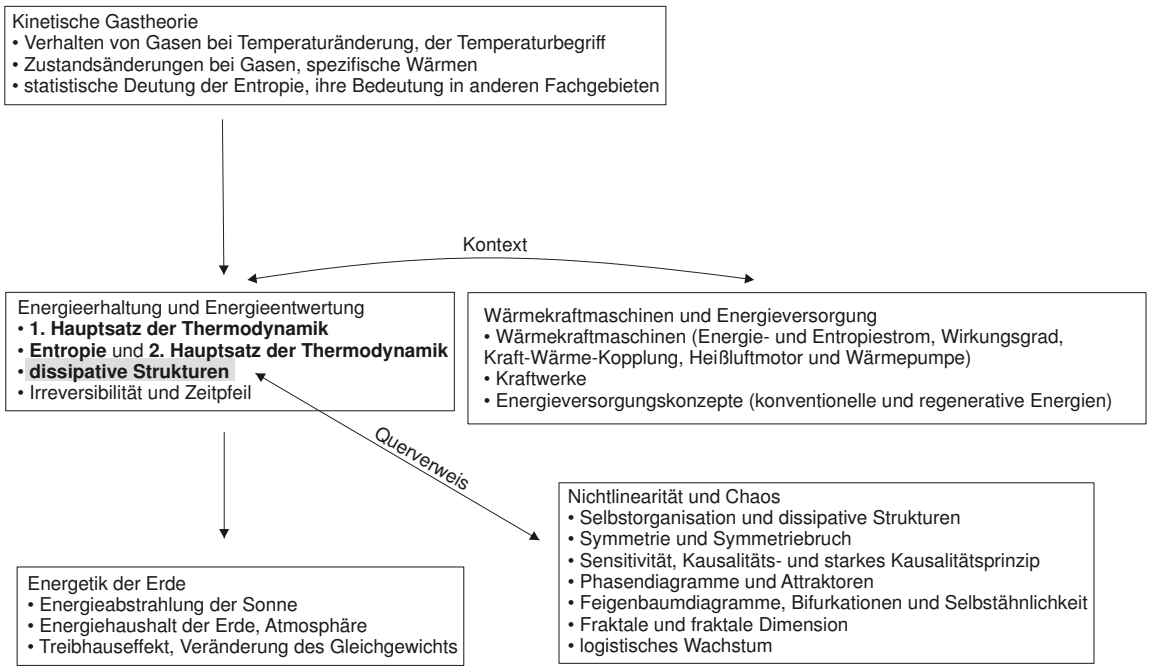

Abb. 1: Strukturentwurf für den Sachbereich Thermodynamik

[7] Lehrplan, S. 12.

[8] Siehe beispielsweise: Grehn, Joachim; Krause, Joachim (Hrsg.): Metzler Physik, Hannover 1998, S. 146ff. Gertsen, Joachim: Physik: Ein Lehrbuch zum Gebrauch neben Vorlesungen, Berlin 1989, S. 193ff. Szallies, Bernhard: Physik 2. kurz & klar, Wolfenbüttel 1993, S. 49f.

Die kinetische Gastheorie ist, wie bereits erwähnt, ein gängiger Einstieg in die Thermodynamik, wobei in diesem Fall die Wärmekraftmaschinen als nahe liegender Kontext des Lernstoffes sich thematisch einfügen. Die Energetik der Erde stellt eine Möglichkeit dar, die erarbeiteten Gesetze auf die Umwelt anzuwenden. Bei den Wärmekraftmaschinen steht die technische Entwicklung Mittelpunkt des Interesses, während bei Gelegenheit der Energetik der Erde hingegen auch die unerwünschten Folgen technischer Entwicklung thematisiert werden können. So gibt es gute Gründe, die Beschäftigung mit der Energetik der Erde als fakultatives Element einer Unterrichtsreihe zur Thermodynamik nachzustellen.

Der Einstieg in die Thermodynamik über die Gastheorie erweist sich aus mehreren Gründen als nahe liegend. Zunächst ist die Abhängigkeit der Zustandsgrößen eines Gases im Vergleich zu Fluiden und Feststoffen deutlich leichter zu beschreiben. Darüber hinaus ist die Untersuchung des Verhaltens von Gasen in Abhängigkeit von den Zustandsgrößen schon seit mehreren Jahrhunderten von großer technischer Bedeutung. Ein weiterer Aspekt, der für eine anfängliche Beschäftigung mit Gasen spricht, ist der Umstand, dass sich Gase experimentell in vielerlei Hinsicht besser untersuchen lassen als Feststoffe. Eine Kompression eines Feststoffes oder Fluides nur um 10% ist experimentell in der Schulphysik nicht zu leisten. Um eine vergleichbare Expansion durch Erwärmung zu erreichen, wäre bei einem Feststoff oder einem Fluid ebenfalls ein viel größerer Aufwand notwendig als bei einem Gas. Volumenänderungen von Gasen lassen sich also im Unterricht viel leichter beobachten und messen.

Die didaktische Entscheidung für den Einstieg mit dem gasförmigen Aggregatszustand begründen die gängigen Lehrwerke nur spärlich. Eine unterrichtliche Beschäftigung mit der Thermodynamik müsste zu Beginn einer Reihe zur Thermodynamik explizit deutlich machen, warum die Gastheorie als Einstieg gewählt wird, um die Schüler angemessen in den Unterrichtsprozess mit einzubeziehen. Eventuell ist es sogar schon beim Einstieg sinnvoll, den Zielpunkt der Strukturbildung, der Irreversibilität und des Zeitpfeils anzudeuten, so dass den Schülern eine nichtimmanente Intention der Beschäftigung mit der Gastheorie gleich zu Beginn deutlich wird. Die Gastheorie dient dann nicht mehr nur zur Untersuchung des Verhaltens von Gasen, sondern bietet die Möglichkeit, exemplarisch einen Zugang zu den Gesetzmäßigkeiten zu erlangen, die der Bildung und dem Zerfall von Strukturen zugrunde liegen.

Unter dieser Voraussetzung könnte eine herkömmliche Einführung der Hauptsätze, die, didaktisch gesehen, durchaus Sinn macht, den Ansprüchen des modernen Unterrichts genügen, Schüler in die den Unterrichtsprozess mit einzubeziehen.

3.1.1. Vorbereitung des 2. Hauptsatzes durch die kinetische Gastheorie

Der Dreh- und Angelpunkt der Thermodynamik und des Verständnisses von irreversiblen Prozessen ist die für Schüler nachvollziehbare Vermittlung des Entropiebegriffes. Dieser wird im Lehrplan sowie in vielen Lehrbüchern bereits im Zuge der Gastheorie als statistische Größe eingeführt, und zwar durch das Gedankenexperiment einer Doppelkammer, bei dem man sich ein zweigeteiltes Gefäß vorstellt. In einer Hälfte befindet sich ein Gas, die andere Hälfte ist evakuiert (siehe Abb. 2). Wird die Trennwand zwischen beiden Hälften geöffnet, so verteilt sich das Gas gleichmäßig auf beide Kammern.

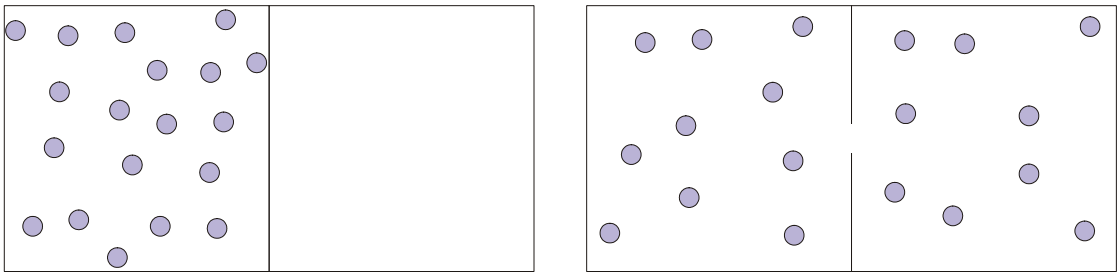

Abb. 2: Das Gedankenexperiment der Doppelkammer

Anhand dieses einfachen, für jeden Schüler nachvollziehbaren Gedankenexperiments lassen sich elementare Eigenschaften der Entropie ohne Formeln und sogar ohne eine Weiterführung des 1. Hauptsatzes, der Energieerhaltung deutlich machen:

- Statistische Deutung: Die Wand verhindert zunächst, dass sich die Gasteilchen gleichmäßig im Raum verteilen. Wäre die Wand nicht vorhanden, wäre es in einem an Unmöglichkeit grenzenden Maß unwahrscheinlich, dass sich alle Gasteilchen auf einer Seite des Systems befänden. Eine „Ordnung“ des Systems ist also viel unwahrscheinlicher als eine zufallsbestimmte Strukturlosigkeit. Die Entropie kann in diesem Rahmen als Maß für die Unordnung eingeführt werden. Die Natur strebt zu wahrscheinlichen, „unordentlichen“ bzw. unstrukturierten Zuständen. In diesem Zusammenhang kann fächerübergreifend eine Parallele zu dem Phänomen der Osmose bzw. der Diffusion gezogen werden.
- Deutung als Zerfall: Deutet man den ersten Zustand als strukturiert, so lässt sich an dem Gedankenexperiment verdeutlichen, dass Strukturen stets in einem kleinen oder

größeren Maße zum Zerfall tendieren. Strukturen werden also gleichsam von der Entropie zerstört.

- Entropiezunahme als Antrieb: Der Verteilungsprozess des Gases läuft ohne Zutun ab, er geschieht selbstständig. Ein umgekehrter Ablauf des Prozesses ist nicht vorstellbar. Würde man in die Öffnung zwischen den beiden Kammern eine Turbine stellen, so wäre sogar eine „Energiegewinnung“ möglich. Die Entropiezunahme kann also als Antrieb des Prozesses gewertet werden. Im weiteren Unterrichtsverlauf kann unter Umständen darauf zurückgegriffen werden.

Neben einem Verständnis für den Entropiebegriff kann dieses Gedankenexperiment zudem bereits ein Verständnis des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik vorbereiten. Dieser Hauptsatz wurde in zahlreichen Varianten formuliert, je nachdem, wie er angewendet wurde.

Naheliegend ist in diesem Fall nämlich die Formulierung nach Helmholz:

> Alle natürlichen Vorgänge laufen so, dass ein Zustand erreicht wird, in dem Materie und Energie möglichst gleichmäßig über den zur Verfügung stehenden Raum verteilt wird.[9]

In dieser Formulierung ist die Analogie zu der Wärmeenergie bereits hergestellt: In gleicher Weise wie das Gas eine gleichmäßige Verteilung anstrebt, so hat auch die thermische Energie die Tendenz zur gleichmäßigen Verteilung.

Da in Abb. 2 eine Beschriftung mit „Vorher“ und „Nachher“ aus nahe liegenden Gründen entfallen kann, ist auch die Irreversibilität anschaulich gegeben. Das einfache Gedankenexperiment steht exemplarisch für alle Prozesse in der Natur, die selbstständig ablaufen. Wie jeglicher durch Entropiezunahme induzierter Prozess ist auch dieser irreversibel. Dieser Aspekt des Experimentes findet sich in folgender Formulierung des 2. Hauptsatzes wieder:

> Alle natürlichen und technischen Prozesse sind irreversibel.[10]

Eine technisch bedeutende Variante des Hauptsatzes, welche besondere Schwierigkeiten bei der Vermittlung mit sich bringt, lautet:

> Es gibt keine periodisch arbeitende Maschine, die Wärmeenergie in mechanische Energie umwandelt, ohne dass ein Teil der zugeführten Wärme wieder abgegeben wird.[11]

---

[9] Zitiert nach Grehn (1998), S. 176.

[10] Zitiert nach Szallies (1993), S. 63.

[11] Zitiert nach Grehn (1998), S. 162.

Beziehungsweise kürzer gefasst:

> Es gibt kein Perpetuum Mobile zweiter Art.[12]

Diese, historisch gesehen, älteste Definition ist als Einstieg in die Thermodynamik bzw. das Phänomen der Entropie wenig geeignet. Sie ist zunächst schwer zu belegen und noch schwieriger zu verstehen. Eine Beschäftigung mit dem Perpetuum Mobile zweiter Art kann jedoch im Rahmen der Wärmekraftmaschinen erfolgen. Da ein Perpetuum Mobile zweiter Art das Gegenteil von einer Wärmekraftmaschine darstellt, kann es gegen Ende der Reihe bei der Behandlung der Irreversibilität von Prozessen und deren Antriebscharakter nochmals aufgegriffen werden.

3.2. Nichtlinearität und Chaos

Die Einordnung des Themas „Nichtlinearität und Chaos“ in die in Abb. 1 dargestellte Struktur ist nicht ohne weiteres zu bewerkstelligen, da die Anknüpfung dieses Themas an die Thermodynamik fachlich sehr anspruchsvoll ist. Darüber hinaus ist eine Beschreibung nichtlinearer bzw. chaotischer Systeme mittels der im Lehrplan angegebenen Gegenstände nur teilweise mit den dissipativen Strukturen verbunden. Dementsprechend ist eine Einordnung der Chaostheorie in den Bereich der dissipativen Strukturen sowohl hinsichtlich ihrer didaktischen Sinnhaftigkeit als auch fachwissenschaftlich kaum zu vertreten.
Im didaktischen Kommentar des Lehrplanes wird diese Problematik des Zusammenhangs zwischen der Thermodynamik und der Untersuchung nicht explizit erwähnt, jedoch sehen die Verfasser ihr Konzept als Vorschlag und verweisen auf die Lücken in der didaktischen Aufbereitung dieses Themas. Dieses Defizit ist im Wesentlichen dadurch begründet, dass nichtlineare Systeme erst in den letzten 30 Jahren ausgiebig untersucht wurden. Der didaktische Kommentar appelliert deshalb in einem hohen Maße an die Planungskompetenz der Lehrkraft:

> Eine unterrichtliche Behandlung entsprechender Fragestellungen kann sich daher nicht auf langfristige Erfahrungen stützen und muss von den Lehrkräften selbstständig erprobt und beurteilt werden.[13]

Die darauf folgend vorgeschlagene Sequenz „Eine Dünenlandschaft unter physikalischen Aspekten“ kann als Überleitung von der Thermodynamik hin zur Untersuchung von nichtlinearen Systemen dienen.[14] Die Beispiele für dissipative Strukturen, also die Sanddünen

[12] Zitiert nach Gerthsen (1989), S. 229.

[13] Lehrplan Physik, S. 127.

[14] Ebd.

und die Konvektionszellen, dienen der exemplarischen Untersuchung von Systemen mit nichtlinearen Wechselwirkungen bzw. der Selbstorganisation von Materie. Sie können somit anhand eines neu erlernten Gegenstandes in ein benachbartes Gebiet der Physik führen. Gleichzeitig wird das Verständnis der dissipativen Strukturen auf diese Weise vertieft.

Es empfiehlt sich also, das Thema „Nichtlinearität und Chaos“ nach den anderen Gegenständen der Thermodynamik zu behandeln. Der Umstand, dass dieser Bereich nur fakultative Gegenstände enthält und zudem auch hinsichtlich der Behandlung dissipativer Strukturen nur eine optionale Vertiefung darstellt, ermöglicht (je nachdem, wie viel Unterrichtszeit zur Verfügung steht) eine starke Straffung dieses Themas.

3.3. Dissipative Strukturen

Das besondere Merkmal dissipativer Strukturen ist, dass sie zunächst dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik zu widersprechen scheinen. Bedenkt man das Gesetz eines stetigen Anwachsens der Entropie, so müssten alle Strukturen zerfallen und jedes System dem thermodynamischen Gleichgewicht entgegenstreben.

Dissipative Strukturen hingegen werden erhalten bzw. angetrieben, indem sie als offenes System Energie aufnehmen und diese dissipieren, also entwerten. Die Entwertung der Energie jener Stoffe, welche das System durchlaufen, ermöglicht also einen Entropieerhalt oder sogar eine Entropieverringerung dieses Systems.

Für die Bildung von dissipativen Strukturen gibt es zahllose Beispiele, so dass eine sinnvolle Auswahl zunächst schwer fällt: Alle Lebewesen, alle technischen Geräte, die Energie „verbrauchen“, und zahllose Objekte in der Natur, von der Sonne bis zur geriffelten Sanddüne, sind von ihrem Wesen her dissipative Strukturen. Dabei sind die Zusammenhänge zwischen dem Antrieb der von selbst ablaufenden Vorgänge und der Dissipation oft sehr komplex.

Ein gut zugänglicher Einstieg für ein grundlegendes Verständnis ist die brennende Kerze. Schon in der Unterstufe lassen sich anhand der Kerze grundlegende Phänomene der Thermodynamik verdeutlichen, beispielsweise die Wärmeleitung, Wärmemitführung und die Wärmestrahlung.[15] Die Kerze lässt sich auch in diesem Kontext als veranschaulichendes Beispiel anführen. Entgegen dem Bestreben nach einem thermodynamischen Gleichgewicht hält sie in Form der Flamme, welche deutlich heißer ist als die Umgebung, ein ther-

[15] Vgl. Udo Backhaus, Elmar Breuer, u.a.: Physik plus, Berlin 1999, S. 36.

modynamisches Ungleichgewicht aufrecht. Dies vermag sie, indem sie hochwertige chemische Energie in Wärme umwandelt. Ihre Struktur verschwindet, sobald der Brennstoff ausgeht und sie keine Energie mehr dissipieren kann. Typisch für dissipative Strukturen ist ebenfalls, dass sie Störungen in einem gewissen Maße kompensieren kann. Bläst man leicht gegen die Kerze, so wird die Flamme abgelenkt, kehrt aber wieder in ihre alte Form zurück. Große Störungen hingegen zerstören die Struktur.

4. Didaktische Entscheidungen

4.1. Anforderungen an eine Unterrichtsreihe

4.1.1. Die Obligatorik für den Grund- bzw. Leistungskurs

Für den Grundkurs bezeichnen die Richtlinien den Bereich der Thermodynamik, speziell die Einführung des Entropiebegriffes, als nicht obligatorisch, jedoch als „möglich“[16]. In der Unterrichtspraxis ist eine Beschäftigung mit nicht-obligatorischen Themenbereichen im Grundkurs aus Zeitmangel zumeist nicht möglich und kann gegebenenfalls nur sehr knapp erfolgen. Aus diesem Grunde ist eine Behandlung dissipativer Strukturen im Kontext der Thermodynamik kaum zu leisten. Eine Beschränkung auf die phänomenologische Beschäftigung mit Strukturbildung und Energieentwertung kann zwar geleistet werden, bliebe aber wohlmöglich von den übrigen Sachbereichen in hohen Maße abgekoppelt.
Hinsichtlich des Leistungskurses wird für die unterrichtliche Umsetzung der obligatorischen Gegenstände der Thermodynamik ein Zeitrahmen von etwa fünf Wochen vorgeschlagen. Verknüpft man die Obligatorik zur Kontextualisierung mit weiteren nicht-obligatorischen Themen, so kann dieser Zeitrahmen ggf. überschritten werden.

4.1.2. Die konzeptuellen Anregungen der Richtlinien

Die Richtlinien schlagen im Rahmen ihrer Kontextvorschläge eine Behandlung der Entropie vor: und damit verbunden der dissipativen Strukturen anhand der drei Kontextbausteine „Strukturbildung und Zerfall“, „Energieentwertung quantitativ“ und „Blick in die historische Entwicklung der Thermodynamik“. Das anhand dieser Bausteine tabellarisch entwickelte Konzept legt Wert auf eine fächerübergreifende Vorgehensweise, welche dem Phänomen zwar angemessen ist, aber nicht weiter erläutert wird. Darüber hinaus ist es auch fraglich, ob das Phänomen der dissipativen Strukturen nicht zunächst im Bereich der Physik behandelt werden sollte. Dafür sprechen im Wesentlichen zwei Gründe: Aus didaktischer Perspektive bietet die Physik einen sehr elementaren Zugang zu dem Phänomen und, organisatorisch gesehen, gestaltet es sich in den meisten Fällen als äußerst schwierig, im Rahmen des Kurssystems fächerübergreifenden Unterricht zu koordinieren, da die Teilnehmer eines Physik Grund- oder Leistungskurses normalerweise an ganz unterschiedlichen naturwissenschaftlichen Kursen teilnehmen. Eine fächerübergreifende Beschäftigung,

[16] Lehrplan Physik, S. 121.

so wünschenswert sie prinzipiell erscheint, könnte sich an dieser Stelle als kompliziert und kontraproduktiv herausstellen.

4.1.3. Anforderungen an eine innovative Reihe

Die größte Herausforderung einer unterrichtlichen Umsetzung ist aus meiner Sicht, den Entropiebegriff und die dissipativen Strukturen als Elemente in eine Reihe zur Thermodynamik einzubinden, so dass die in den Richtlinien angegebenen Themen des Sachbereiches nicht nebeneinander herlaufen, sondern eine didaktische Struktur mit einer erkennbaren Progression aufweisen.

Blickt man unter dieser Perspektive in die vorhandenen Unterrichtswerke, so weisen diese in unterschiedlicher Hinsicht Mängel auf: Die älteren Unterrichtswerke haben zumeist einen stringenten didaktischen Aufbau, beschäftigen sich jedoch nicht oder nur wenig mit der modernen Thermodynamik. Neuere Lehrwerke (wie beispielsweise die Schulbücher von Cornelsen[17]) bedienen sich anschaulicher und motivierender Beispiele aus Natur und Alltag, lassen jedoch oft eine didaktische Struktur vermissen und verlieren sich in detaillierten Einzelheiten. Eine Progression ist darüber hinaus kaum erkennbar.

Eine innovative Unterrichtsreihe sollte bewährte Elemente aus dem bisherigen Unterricht zur Thermodynamik mit Ideen aus der Didaktik zur modernen Thermodynamik sinnvoll und harmonisch verknüpfen.

Da eine fächerübergreifende Gestaltung der Reihe, wie vom Lehrplan angeregt, problematisch ist, sollte zumindest ein Verweis zu weiteren Sachgebieten der Physik hergestellt werden. Dies kann sowohl im Zuge der Behandlung der Teilgebiete der Thermodynamik als auch in der Beschäftigung mit dem Experiment geschehen.

4.2. Entwurf einer Reihe

Ausgehend von den bisherigen Überlegungen könnte die Struktur einer Reihe wie folgt aussehen:

Phase / Thema	Intention	Gegenstände / Methoden
1. Einstieg	Gemeinsam wird als Ziel der Unterrichtsreihe die Untersuchung von Strukturbildung festgelegt.	Bildbetrachtung der Abb. A1. Unterrichtgespräch oder Gruppenarbeit zu der Frage, wie diese Struktur zu erklären ist.

[17] Ein ausführliches Lehrwerk zur modernen Thermodynamik ist: Helmut Dreißig (Hrsg.), u.a.: Oberstufe Physik. Sachsen-Anhalt. Klasse 11, Berlin 2000. Eine konzisere Behandlung findet sich in: Ders.: Oberstufe Physik. Ausgabe D. Band 1, Berlin 1999.

2. Kinetische Gastheorie	Gase werden als Strukturen mit den physikalischen Eigenschaften Temperatur, Druck, Volumen erfasst (Verhalten bei Änderung der Zustandsgrößen).	Experimente und qualitative Berechnungen zum Verhalten von Gasen (evtl. anhand von Wärmekraftmaschinen)
3. Energieerhaltung	Wiederholung und Vertiefung der Bedeutung von Energieerhaltung und Energieumwandlung	Evtl. Referate zum Stirling-Motor, Otto-Motor und Wankel-Motor
4. Strukturzerfall und Entropie	Die Wärmeleitung und Verteilungstendenz von Gasen als Strukturzerfall erkennen. Qualitative und quantitative Einführung der Entropie.	Verteilung von Gasen (vgl. Abb. 2)
5. Irreversibilität und Zeitpfeil	Die Entropiezunahme als Antrieb und Richtung aller physikalischer (und chemischer) Prozesse	Untersuchung physikalischer Prozesse auf Umkehrbarkeit Geschichte und Zukunft des Universums
6. Dissipative Strukturen	Qualitatives Verständnis dissipativer Strukturen als offene Systeme	**Experiment** Exemplarische Untersuchung der Erde als dissipativer Struktur

4.2.1. Einstieg

Gleich zu Beginn der Reihe deren Ziel vorgestellt. Um Strukturbildung schon zu Anfang zu thematisieren, wurde als Medium der angeführte Bildimpuls gewählt. Je nachdem, in welchem Maße der Begriff der Energieentwertung den Richtlinien entsprechend in der Sekundarstufe I thematisiert wurde, kann die Frage nach der Herkunft der Struktur in Abb. A1 im Rahmen eines Lehrervortrages, eines Unterrichtsgespräches bzw. einer Gruppenarbeit mit Hypothesenbildung besprochen werden. Von der unerwarteten Struktur des Strandbildes kann leicht der Bogen zu alltäglicheren Strukturen geschlagen werden. Anhand zahlreicher anderer Beispiele (Schneeflocken, Sandrippel, Säulenbasalt, ect.) wird die Fülle an Strukturen in der Natur aufgezeigt. Dabei kann, nach einer kurzen Klärung des Strukturbegriffs von den Schülern eine Fülle von Strukturen benannt werden. Die Erklärung der Entstehung dieser Strukturen kann dann als Ziel der Reihe angegeben werden.

4.2.2. Die kinetische Gastheorie

Die Gastheorie als gut zugängliche Theorie zur quantitativen Beschreibung ist in diesem Kontext sowohl eine Einführung in die Thermodynamik der Gase als auch eine Beschäftigung mit der Strukturiertheit von Materie. Der didaktische Aufbau der Gastheorie ist in herkömmlichen Lehrwerken gut strukturiert, so dass dieser problemlos übernommen werden kann.

Um den Lernprozess in einen Kontext zu setzen und das selbstständige Arbeiten der Schüler zu fördern, bietet sich in diesem Zuge eine Referatsreihe zum Motor an. Drei Schüler könnten jeweils den Stirling-Motor, den Otto-Motor und den Wankel-Motor vorstellen. Diese Referatssequenz verwirklicht eine Förderung der allgemeinen Fähigkeiten „infor-

mieren, recherchieren, […] referieren“[18] und bietet zudem den referierenden Schülern die Möglichkeit, kooperierend zu arbeiten, indem sie Vorzüge und Problematiken der einzelnen Motorenmodelle gemeinsam erarbeiten.

4.2.3. Die Energieerhaltung

In einem Leistungskurs ist das Prinzip der Energieerhaltung bei den Schülern hinlänglich bekannt. Als Erweiterung kann die Umwandlung von thermischer in mechanische Energie und die dabei auftretende Problematik des geringen Wirkungsgrades, im Kontext der Wärmekraftmaschine, thematisiert werden.

4.2.4. Strukturzerfall und Entropie

Im Rahmen der unterrichtlichen Behandlung von Strukturzerfall und Entropie werden nun die Gesetze der Thermodynamik mit allgemeinen Beobachtungen zu Strukturen verbunden, indem eine Analogie zwischen dem Gedankenexperiment aus Abb. 2 mit alltäglichen Beispielen von Strukturbildung und Zerfall hergestellt wird.[19] Dabei kann durch die Behandlung materieller und thermischer Strukturen der Strukturbegriff erweitert werden.
Um die kognitive Dissonanz bei der Untersuchung dissipativer Strukturen vorzubereiten, wird hierbei besonders die Entropiezunahme eines geschlossenen Systems thematisiert.

4.2.5. Die Irreversibilität und der Zeitpfeil

Die Irreversibilität physikalischer Prozesse ist unmittelbar gekoppelt an das Phänomen der Entropiezunahme.[20] Anhand einer arbeitsteiligen Untersuchung physikalischer Prozesse[21] kann mithilfe des Irreversibilitätsprinzips die Entropiezunahme als Antrieb umgedeutet werden. Neben den zahlreichen physikalischen Prozessen, die als Beispiel dienen, kann auch der Zeitpfeil in den Kontext der Geschichte und Zukunft des Universums gesetzt werden.

---

[18] Lehrplan Physik, S. 5.

[19] Ein ansprechender Einstieg findet sich in Dreißig (2000), S. 60. Das Lehrwerk versäumt jedoch eine geordnete Vor- bzw. Nachbereitung des Strukturbegriffes anhand physikalischer Größen.

[20] Einen erfahrungsbezogenen Unterrichtseinstieg in dieses Thema kann die Abb. A2 unter dem Gesichtspunkt verwendet werden, warum die gezeigte Situation unrealistisch ist, obwohl der Energieerhaltungssatz nicht verletzt wird.

[21] Physikalische Prozesse, welche sich auf gut auf Umkehrbarkeit untersuchen lassen, finden sich beispielsweise hier: Schlichting, H. Joachim: Energieentwertung – ein qualitativer Zugang zur Irreversibilität, Praxis der Naturwissenschaften/ Physik 49/2, 2000, S. 2-6.

4.2.6. Dissipative Strukturen

Mit der Behandlung der dissipativen Strukturen ist jener Punkt in der Unterrichtsreihe erreicht, von dem aus man auf die Überlegungen beim Einstieg in das Thema zurückgreifen kann: Wie kann es möglich sein, dass ungeachtet der Tendenz zum Zerfall von Strukturen ihre Entstehung und der Erhalt selbiger vielfach zu beobachten ist? Die Entwertung von Energie als Antrieb von Strukturbildungsprozessen kann dabei im Rückgriff auf das Einstiegsbild erläutert, aber auch anhand einer Reihe von Experimenten verdeutlicht werden. Eine geeignete Auswahl von Experimenten sowie deren Chronologie werden weiter unten dargestellt.

4.3. Entscheidungen hinsichtlich des Experimentes

Eine Ausstattung der Physiksammlungen der Gymnasien mit Lernmitteln, welche für die Untersuchung von dissipativen Strukturen ausgelegt sind, hat in der Regel noch nicht stattgefunden. Dies liegt im Wesentlichen nicht an den Prioritäten bei der Akquisition von Lernmitteln durch die Schulen, sondern am Sortiment der Lernmittelanbieter.[22]

Sowohl ein umfangreicheres Experiment, dessen Entwicklung und Einordnung Gegenstand dieser Arbeit ist, als auch hinführende Experimente müssen also mit schulischen Mitteln und einem vertretbaren Aufwand zu realisieren sein. Dennoch sollte zumindest das zentrale Experiment eine gewisse Komplexität besitzen und zumindest ansatzweise die Möglichkeit bieten, quantitative Messungen vorzunehmen.

4.3.1. Hinführende Experimente

Als alltägliches Experiment zur Einführung eignet sich die Kerze. Dabei kann im Zuge der Beschäftigung mit einer Kerze nur teilweise im eigentlichen Sinne von einem Experiment gesprochen werden; es handelt sich im gleichen Maße auch um ein Modell, welches ein grundlegendes Verständnis der Bildung von Nichtgleichgewichtsstrukturen befördert. Denn anhand der Kerze kann auf anschauliche Weise die auf der Dissipation von Energie beruhende Strukturbildung erläutert werden (vgl. S. 13). Sie kann als Paradigma für jegliche dissipative Struktur bis hin zu den Lebewesen herangezogen werden.[23]

Ein komplexeres und weiterführendes Experiment ist die Bérnardkonvektion in einer Schale. Mit diesem Begriff wird eine Konvektion bezeichnet, die weder turbulent noch

[22] Bei den beiden größten Lernmittelanbietern Leybold und Phywe war zum Zeitpunkt der Abfassung dieser Arbeit (05/2007) kein für diesen Zweck konzipiertes Lernmittel verfügbar.

[23] Ein auf Anschaulichkeit angelegter Vergleich findet sich in Dreißig (2000), S. 88.

laminar verläuft, sondern eine zellförmige Struktur herausbildet. Dieses Phänomen lässt sich beobachten, wenn man in eine Metallschale Öl und feines Metallpulver gibt und dieses Gemisch gleichmäßig erwärmt.[24] Die zellförmige Struktur ist ebenfalls eine Nichtgleichgewichtsstruktur, welche in diesem Fall im Rahmen der Wärmeleitung und, zwangsläufig damit verbunden, der Entropiemaximierung zu Stande kommt.
Wenn man für die Erwärmung der Metallschale die vorneweg eingeführte Kerze als Antrieb verwendet, lässt sich anhand dieses Experimentes nicht nur die Strukturbildung beim Wärmetransport zeigen, sondern auch verdeutlichen, dass eine dissipative Struktur in der Lage ist, eine weitere Ungleichgewichtsstruktur zu erzeugen.

4.3.2. Anforderung an das zentrale Experiment

Für die Auswahl bzw. Entwicklung eines Experimentes wurden verschiedene Kriterien angesetzt:

a) Ein umfangreicheres Experiment zur Untersuchung dissipativer Strukturen soll das in der Reihe behandelte Wissen aufgreifen und nach Möglichkeit eine weiterführende Auseinandersetzung ermöglichen.
b) Das Experiment sollte ebenfalls die Möglichkeit bieten, innerhalb der Physik interdisziplinär zu arbeiten.
c) In einem gewissen Rahmen sollte ein Alltagsbezug hergestellt werden.
d) Soweit dies mit Schulmitteln möglich ist, sollten es zu einem gewissen Grad quantitative Ergebnisse geliefert werden.
e) Es sollte „etwas zu sehen sein“. Das Experiment sollte zudem für die Vorführung vor einer größeren Gruppe geeignet sein.
f) Wie bereits erwähnt, sollte es mit einem vertretbaren Aufwand umzusetzen sein.

[24] Eine genaue Beschreibung der notwendigen Materialien sowie Bezugsadressen finden sich in: Dennis Pongs, Experimentelle Zugänge zur Strukturbildung in der Sekundarstufe I (unveröffentlichte Examensarbeit am Institut für Didaktik der Physik Münster), Münster, 2002.

5. Das Experiment zur Strukturbildung

Für das Experiment wurde ein vergleichsweise einfacher Aufbau gewählt: Die Konvektion von Wasser zwischen zwei Kupferplatten unterschiedlicher Temperatur. An diesem Aufbau kann dann für unterschiedliche Temperaturen das Verhalten der Konvektion untersucht werden, d.h. inwiefern der Wärmetransport turbulent oder strukturiert verläuft und welche Strukturen zu beobachten sind.

5.1.1. Benötigte Materialien

- zwei Kupferplatten (120mm x 90mm x 3mm [obere Platte] und 120mm x 160mm x 3mm [untere Platte])
- eine Injektionsspritze und zwei Kanülen zum Einfüllen von destilliertem Wasser in den Konvektionsraum
- zwei kleine Plexiglasscheiben (ca. 120mm Länge)
- zwei Plexiglaswürfel mit 3mm Kantenlänge
- Für die Messung der Temperaturdifferenz: Kupfer- und Konstantandraht und Wärmeleitpaste
- Zur Kühlung: Einen Topf aus Aluminium
- Als Heizung: Zwei Peltierelemente
- Zweikomponentenkleber

Zum Betrieb werden weiterhin ein regelbares Netzgerät, ein Mirkovoltmeter sowie eine Halogenlampe benötigt.

5.1.2. Zum Aufbau

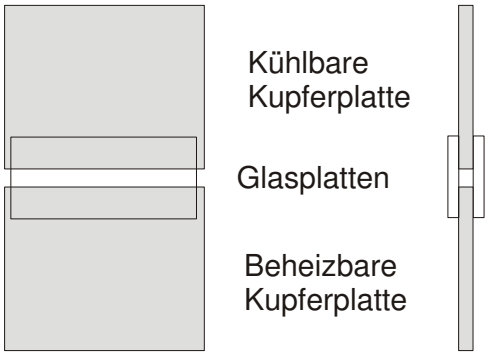

Abb. 3: Aufbau der Konvektionszelle: Die Kupferplatten begrenzen die quaderförmige Konvektionszone oben und unten; zu den Seiten wird sie von Glasplatten begrenzt.

Für den experimentellen Aufbau wurde ein quadratischer Querschnitt des Konvektionsraumes mit 3mm Seitenlänge verwendet. Besonders wichtig ist, dass der Abstand der Kupferplatten voneinander gleichbleibend ist, die Kanten also parallel zueinander verlaufen. Als Verschluss wurde an beiden Seiten ein Plexiglaswürfel eingeklebt, welcher gleichzeitig als Abstandhalter fungierte. Die Plexiglaswürfel wurden mit einem feinen Bohrer durchbohrt und in die Bohrung wurde eine Kanüle eingeklebt.[25] Durch die Kanüle kann das destillierte Wasser in den Konvektionsraum eingeführt, bzw. auf der gegenüberliegenden Seite die Luft herausgelassen werden.

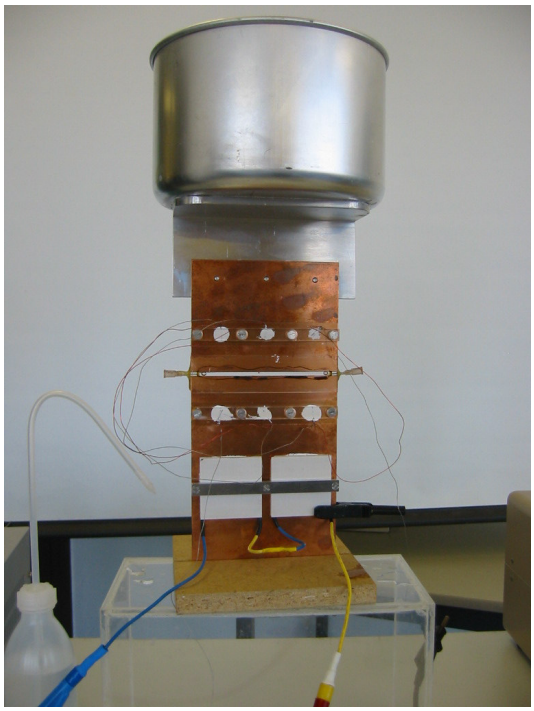

Abb.4: Der endgültige Aufbau des Konvektors

An der oberen Seite wurde ein Topf angebracht, welcher durch Einfüllen von Eis das Kühlen der oberen Kupferplatte ermöglichte. Die untere Seite kann mit Hilfe von Peltier-Elementen beheizt werden, wobei eine gute Wärmeleitfähigkeit durch das Auftragen von Wärmeleitpaste sichergestellt werden sollte.

Der Temperaturunterschied wird mithilfe von drei Paar in Reihe geschalteter Thermoelemente gemessen. Dabei werden die verlöteten Kontaktpunkte der Thermoelemente wechselweise auf die obere und untere Kupferplatte geklebt. Die Verwendung mehrerer Messpunkte erhöht die Spannung und die Genauigkeit der Messung, jedoch müssen die Kontaktpunkte gegen die Kupferplatte abisoliert werden, um einen Kurzschluss zu verhindern.

[25] Siehe Abb. A4.

Die verwendete Verbindung von Kupfer und Konstantan erzeugt eine Thermospannung von etwa 42µV pro Grad Temperaturunterschied zwischen der Kontaktstelle auf der oberen und der auf der unteren Seite. Da an der Apparatur drei Paare angebracht sind, beträgt die gesamte Spannungsentwicklung pro Grad Temperaturdifferenz etwa 125µV.

5.1.3. Wichtige Hinweise für den Nachbau

Beim Bau des Versuches sind verschiedene Dinge zu beachten:

- Der Abstand der Kupferplatten muss, wie bereits erwähnt, exakt gleichbleibend sein, da die entstehende Struktur sonst zur Seite mit dem größeren Abstand hin durchzulaufen beginnt. Wenn die Herstellung durchbohrter Plexiglaswürfel technisch nicht möglich ist, können die Kupferplatten zunächst an den Außenseiten verbunden werden, indem die Kanülen mit einem Kleberpfropfen eingepasst werden. Dabei kann der Spalt mit geeigneten Abstandhaltern (Beilagscheiben, etc.) auf einem gleichmäßigen Abstand gehalten werden. Ist der Kleberpfropfen erhärtet, können die Glasplatten angebracht werden.
- Als Kleber hat sich ein möglichst dickflüssiger Zweikomponentenkleber als Optimum erwiesen.
- Der Abstand der Kupferplatten sollte nicht deutlich größer sein als die verwendeten 3mm. Da die Temperatur für den Beginn der strukturierten Konvektion antiproportional zur dritten Potenz des Plattenabstandes ist,[26] wird die Temperaturdifferenz, bei der diese Form der Konvektion einsetzt, verschwindend klein.

5.1.4. Durchführung des Versuchs

Zunächst muss der Konvektionsraum mit Wasser befüllt werden. Bei diesem Aufbau wird dies mit einer Spritze vorgenommen. Dabei ist besonders darauf zu achten, dass keine größeren Luftbläschen im Konvektionsraum zurückbleiben.

Um eine Wärmezufuhr zu erreichen, müssen die Peltier-Elemente mit Energie versorgt werden. Hierzu empfiehlt sich ein geregeltes Netzgerät, da mittels diesem die Leistungsaufnahme der Elemente unmittelbar berechnet werden kann und somit eine Überlastung ausgeschlossen ist. Die in diesem Aufbau verwendeten beiden Peltier-Elemente wurden maximal mit einer Gesamtleistung von 10W betrieben.

---

[26] Siehe hierzu: Guyon, Etienne; Hulin, Jean-Pierre; Petit, Luc: Hydrodynamik. Braunschweig 1997, S. 412 ff.

In den Topf kann Eiswasser gegeben werden. Nach der Herstellung des Experimentiergerätes stellte sich jedoch heraus, dass dies nicht zwingend notwendig ist. Durch die Peltier-Elemente wird ein hinreichend großer Temperaturunterschied für das Experiment erreicht, so dass die obere Kupferplatte auf Raumtemperatur belassen werden kann.

Strukturen bei den Konvektionsvorgängen werden sichtbar gemacht, indem der Konvektionsraum gegen die Wand projiziert wird. Dabei erzeugen die Temperaturdifferenzen in den jeweiligen Wasserströmungen eine unterschiedliche Brechung, die in der Projektion sichtbar gemacht wird.

Um eine optimale Schärfe zu erreichen, ist eine Lichtquelle mit möglichst kleinem Lichtpunkt erforderlich. Bei Verwendung einer kleinen Niedervolt-Halogenbirne erreicht man meist ausreichende Ergebnisse.

Die Durchführung des Experiments erfordert mindestens eine Viertelstunde, da die Erwärmung trotz guter Wärmeleitung des Kupfers etwas Zeit benötigt. Man kann nun langsam die Leistung des Peltier-Elementes erhöhen. Als Konsequenz steigen, mit einer gewissen Verzögerung, die Werte für die Thermospannung.

5.1.5. Beobachtungen

Nun kann man mittels der Ansteuerung der Peltier-Elemente schrittweise jeweils jene Temperaturspannungen erzeugen, die einer Temperaturdifferenz von einem Grad entsprechen. Parallel kann man das Verhalten des Wassers im Konvektionsraum über die Projektion beobachten.

Gemessene Thermospannung	ΔT	Beobachtung
125mV	1°K	Keine Muster in der Konvektionsbewegung erkennbar.
250mV	2°K	Keine Muster in der Konvektionsbewegung erkennbar.
375mV	3°K	Keine Muster in der Konvektionsbewegung erkennbar.
500mV	4°K	Eine schwache Musterbildung ist erkennbar.
625mV	5°K	Eine Zellenbildung bei der Konvektionsströmung ist deutlich zu erkennen.
750mV	6°K	Die Bildung der Konvektionszellen wird aufgrund größerer Temperaturunterschiede der Strömungen deutlicher.
875mV	7°K	Bei dieser Temperaturdifferenz ist die Strukturbildung am deutlichsten.
1000mV	8°K	Die Zellen an den Rändern des Konvektionsraumes verschwinden: Die Struktur beginnt turbulent zu werden.
1125mV	9°K	Nur noch in der Mitte sind Konvektionszellen zu beobachten.
1250mV	10°K	Die Konvektionszellen verschwinden.

In Abb. A6 ist die Ausbildung der Konvektionszellen fotographisch festgehalten.

5.1.6. Schlussfolgerungen

Am Experiment lassen sich folgende Eigenschaften dissipativer Strukturen erforschen und verdeutlichen:

- Die zwei unterschiedlich temperierten Kupferplatten treiben im Rahmen der Entropiemaximierung den Prozess der Konvektion an. Dieser Konvektionsprozess verläuft jedoch nicht selbst mit maximaler Entropie im Sinne der Durchmischung, sondern in hohem Maße in dynamischer und thermischer Hinsicht strukturiert. Die Herstellung eines thermodynamischen Gleichgewichts, wie sie durch den Wärmeaustausch zwischen der warmen und kalten Platte erfolgt, kann also eine Ungleichgewichtsstruktur erzeugen.
- Die Strukturbildung ist nur unter gewissen Bedingungen möglich, in diesem Fall zwischen einer Temperaturdifferenz von etwa 4 bis 8° Kelvin. Ähnlich wie bei technischen Geräten, Lebewesen oder bei jenen Naturphänomen, die ihren Antrieb aus der Dissipation von Energie beziehen, sind für die Struktur bestimmte „Überlebensbedingungen" erforderlich.
- Befindet sich das System in einem Zustand, indem die Strukturbildung möglich ist, so sind die Größe der Zellen und ihre Grobstruktur nicht von der Größe der Temperaturdifferenz abhängig. Die Anzahl und Form der Konvektionszellen bleibt also überraschenderweise gleich. Die Ungleichgewichtsstruktur weist also eine Stabilität gegenüber Umwelteinflüssen auf.

Darüber hinaus sind im Rahmen dieses Experiments auch quantitative Aussagen möglich. Durch die Messung der Minimaltemperatur für eine strukturierte Konvektion lässt sich die kritische Rayleighzahl bestimmen,[27] welche als Konstante in der Beschreibung von selbstorganisierter Strukturbildung bei Konvektion von Bedeutung ist. Da eine quantitative Auswertung des Versuches fachlich sehr anspruchsvoll ist und von der Beschäftigung dissipativer Strukturen weg zu der mathematischen Beschreibung nichtlinearer Systeme führt, sei hier nur am Rande auf diesen Umstand verwiesen.

[27] Siehe hierzu: Ruhnau, Annika: Physikalische Untersuchungen von Konvektionsvorgängen in Fluiden mit Mitteln der Schulphysik (unveröffentlichte Examensarbeit an dem Institut der Didaktik der Physik Münster), Münster 2003, S. 41ff.

6. Integration des Experiments in den Unterricht

Die Einbindung des Experimentes stellt eine didaktische Herausforderung dar, da es einerseits eine exemplarische Beschäftigung mit dissipativen Strukturen darstellt, ein Verständnis des Experiments andererseits aber auch vertiefte Kenntnisse in anderen Sachbereichen der Physik erfordert. Diese müssen im Kontext des Experiments erarbeitet werden.

Der Lehrplan fordert als Fachmethode für den Unterricht das Planen und Durchführen von Experimenten[28], wobei auch umfangreichere und anspruchsvollere Experimente geplant, durchgeführt und ausgewertet werden sollen. Das beschriebene Experiment kann von den Schülern nur schwerlich im Unterricht entwickelt werden; allerdings können und sollten die Schüler bei der Erarbeitung der fachlichen Grundlagen des Experimentes einbezogen werden.

Wurde das Verständnis von dissipativen Strukturen im Kontext der Thermodynamik also, wie oben konzeptuell beschrieben, unterrichtlich umgesetzt, so kann nun der experimentelle Aufbau kurz vorgestellt werden. Dabei weist die Lehrkraft darauf hin, dass vor der Durchführung des Experiments spezielle Sachverhalte referiert werden müssen, damit ein Verständnis möglich ist.

6.1. Erarbeitung der physikalischen Grundlagen

Zum Verständnis des Experiments können die Konvektion, der Effekt der Thermospannung, Aufbau und Funktion des Peltier-Elementes sowie die Lichtbrechung in inhomogenen Medien erarbeitet werden.

Die Brechung von Licht bei der Transmission thermisch inhomogener Medien wird in diesem Fall zurückgestellt, da es sich um ein sehr anspruchsvolles Thema handelt und vor der Durchführung des Experimentes nicht zwingend erarbeitet werden muss. Zudem ergibt sich die Notwendigkeit, dieses Fachwissen zu erwerben, aus Sicht der Schüler auch nicht unmittelbar beim Betrachten des experimentellen Aufbaus. Dies kann später, im Zuge der Auswertung, in Form eines kurzen Lehrervortrages nachgereicht werden. Somit sind drei Referatsthemen für die Schüler zu vergeben.

Schüler neigen auch noch in der Oberstufe bei Referaten dazu, Frontalunterricht nachzuahmen. Sie gestalten ihre Referate wenig kommunikativ und nehmen sich meistens nicht die notwendige Zeit, um Sachverhalte so darzustellen, dass die zuhörenden Schüler diese

[28] Lehrplan Physik, S. 14.

in ausreichendem Maße nachvollziehen können. Da eine chronologische Abfolge der Referate nicht von Nöten ist, empfiehlt sich in diesem Fall statt einer Referatsreihe die Erarbeitung der physikalischen Grundlagen des Experimentes in einer Expertenrunde. Die drei Referenten bzw. Referatsgruppen stellen also ihr Themengebiet nicht der ganzen Gruppe vor, sondern kleinen Gruppen im rotierenden Verfahren. Dies senkt die Schwelle der Mitschüler, Fragen zu stellen, und das „Lampenfieber" der Referenten.
Die Durchführung der Expertenrunde sollte nach Möglichkeit zügig erfolgen. Veranschlagt man für jeden Referenten gut zehn Minuten, so kann sie in einer Schulstunde abgeschlossen werden. Für die Vorbereitung der Experimente durch die Referenten und die didaktische Beratung wird für die Lehrkraft ein außerplanmäßiges Treffen mit den Referenten unumgänglich sein.

6.1.1. Die Konvektion

Die Konvektion wird als Phänomen in der Regel nur in der Unterstufe ausführlich behandelt, weswegen eine Wiederholung angebracht ist. Dieses Referatsthema eignet sich aufgrund seines geringen Schwierigkeitsgrades besonders, einen schwächeren Schüler zu fördern. Dabei ist sicherzustellen, dass der Schüler die Teilaspekte des Auftriebes und der thermischen Ausdehnung Fall richtig wiedergibt, da diese für das Experiment von essentieller Bedeutung sind.

6.1.2. Die Thermospannung

Die Entstehung der Thermospannung aufgrund des Seebeck-Effektes gestaltet sich deutlich anspruchsvoller. Beim Referieren dieses Themas ist eine Unterstützung des referierenden Schülers durch didaktisches Material ratsam. Zudem lässt sich dieses Referat auch mit einem Demonstrationsexperiment kombinieren, dessen Planung und Durchführung dem referierenden Schüler in größerem Maße übertragen werden kann.

6.1.3. Das Peltier-Element

Für die Darstellung des Peltier-Elementes sollte nur die Form eines Schülerreferates gewählt werden, wenn sich im Kurs ein Schüler befindet, der im Bereich der Elektronik hohes Interesse und Fachwissen besitzt und in der Lage ist, dieses in strukturierter und nachvollziehbarer Form an seine Mitschüler weiterzugeben. Ein Verständnis von Aufbau und Funktionsweise des Peltier-Elementes ist für das Experiment von großem Vorteil, aber nicht bis ins Detail zwingend. Im Prinzip genügt das Wissen um die Heizwirkung des

Peltier-Elementes. Das faszinierende Phänomen, dass eine kleine Platte auf der einen Seite heizen und auf der anderen kühlen kann, also als Wärmepumpe dient, schafft nicht nur eine hohe Lehrmotivation, sondern kann im Zuge einer kognitiven Dissonanz als Rückgriff auf die Sätze der Thermodynamik genutzt werden.

6.2. Durchführung des Experimentes im Unterricht

Während die fachwissenschaftlichen Grundlagen des Experimentes gründlich vorbereitet werden, sollte das bei dem Experiment zu beobachtende Phänomen der Strukturbildung natürlich nicht vorangekündigt werden. Eine kurze einleitende Moderation thematisiert noch einmal den Kern des Experimentes: Zwei unterschiedlich temperierte Platten streben nach Entropiemaximierung, indem sie versuchen, die zwischen ihnen bestehende Temperaturdifferenz auszugleichen. Der Fokus wird dabei darauf gelenkt, wie sich das Konvektionsmediums verhält, während die Entropie des ganzen Systems zunimmt.

Damit in der Projektion für alle Schüler nicht nur die Konvektionszellen an sich gut erkennbar, sondern auch, wie deutlich diese bei der jeweiligen Temperaturdifferenz ausgeprägt sind, muss der Raum nahezu vollständig verdunkelt sein. Die projizierende Lampe muss zudem geschirmt sein, jedoch so, dass möglichst wenig diffuses Licht entsteht, welches den Kontrast der Projektion vermindert.

Parallel zu der Durchführung sollte ein Protokollant tabellarisch Beobachtungen in Zusammenhang mit der gemessenen Thermospannung festhalten (vgl. S. 24). Dieser sollte auch die spätere Auswertung des Versuchs im Unterrichtsgespräch zusammenfassen.

Das an den Versuch geknüpfte Unterrichtsgespräch thematisiert die Hintergründe des Strukturbildungsphänomens. Bei der vorangestellten phänomenologischen Auswertung können, sofern die Fragestellung seitens der Schüler auftaucht, die physikalischen Grundlagen für die Sichtbarkeit der Konvektion in der Projektion nachgereicht werden. Die Erklärung sollte sehr knapp gehalten werden, um den Fokus auf der Strukturbildung zu behalten. Im Prinzip reicht die Parallele zur Projektion einer brennenden Kerze: An den Schlieren der Luft über der Flamme, die wohl jedem Schüler schon aufgefallen sind, kann gezeigt werden, dass durchsichtige Medien im Durchlicht Temperaturdifferenzen abbilden.

Im Hauptteil des Unterrichtsgesprächs zur Auswertung werden dann schrittweise die in 5.1.6. aufgeführten Schlussfolgerungen erarbeitet. Der Schwerpunkt sollte hierbei auf dem Aspekt liegen, dass ein Prozess mit Entropiezunahme in der Lage ist, eine Ungleichgewichtsstruktur herauszubilden. Der Ausgleich der Temperaturverteilungsstruktur kann

dabei in Form eines Rückgriffes auf die Gasstruktur aus 4.2.2 verglichen werden. Ähnlich wie die Gasstruktur mittels einer Turbine eine Energieaufwertung bewirken kann, welche einen irreversiblen Prozess zurückspult, kann die Auflösung der thermischen Struktur durch Wärmeleitung eine zeitweise Entropieabnahme im Konvektionsmedium erzeugen.

6.3. Anknüpfungspunkte

Die Untersuchung von Eigenschaften dissipativer Strukturen mit Hilfe des Experimentes ist intentional auf eine vertiefte Beschäftigung mit Ungleichgewichtsstrukturen ausgerichtet. Eine intensive Beschäftigung mit der Bénardkonvektion im Kontext des Experimentes wäre ebenfalls möglich. Auch wenn die Richtlinien eine Beschäftigung mit diesem Phänomen aus dem Bereich der Nichtlinearität anregen, so ist es doch mit Rücksicht auf den Alltagsbezug und das physikalische Verständnis von möglichst vielen Naturvorgängen geboten, die am Experiment gezeigte Nichtgleichgewichtsstabilität offener Systeme an weiteren Beispielen zu untersuchen.

Ausgehend von dem Phänomen, dass die Entwertung thermischer Energie als Antrieb fungieren kann, ist es das didaktische Ziel, mittels geeigneter Beispiele das Antriebspotential jeglicher Energieentwertung oder, weiter gefasst, Entropievergrößerung empirisch zu untersuchen. In diesem Kontext können die im Rahmen der Wärmekraft behandelten Antriebe anderen Antriebsformen gegenübergestellt werden. Von alltäglichen Antrieben wie der Verbrennung, der Wasserkraft und dem Elektromotor können hier auch Antriebe, welche eine kognitive Dissonanz erzeugen, thematisiert werden. Hier eignet sich beispielsweise die Trinkente als „Verdunstungskraftmaschine“[29].

Wurden die erarbeiteten Eigenschaften dissipativer Strukturen anhand von Antriebsmaschinen überprüft, so lässt daran sich, daran anknüpfend, der Blickwinkel erweitern, indem der Energiehaushalt der Erde als thermodynamisches Systems näher beleuchtet wird. Hierbei können sowohl klimatische als auch geologische oder biologische Prozesse aus der Sicht der modernen Thermodynamik gedeutet werden.

[29] Vgl. Schlichting, H. Joachim: Der trinkende Storch - eine Verdunstungskraftmaschine.
in: Praxis der Naturwissenschaften -Physik 41/2, 22 (1992).

7. Ausblick

Die moderne Thermodynamik hat mit ihren Untersuchungen zur Dissipation von Energie und mit den sich daraus ergebenden Konsequenzen der Irreversibilität und des Zeitpfeils nicht nur einen wesentlichen Beitrag zum Verständnis physikalischer Vorgänge geleistet, sondern schafft auch im Bereich der Chemie und der Biologie eine Grundlage, Prozesse der Energieumwandlung in einer neuen Qualität zu verstehen.

Die Bedeutung dieses neuen Ansatzes führte, wenn auch mit einiger Verzögerung, zu einer Aufnahme in das Curriculum. Dabei wurde jedoch die Tendenz beibehalten, die sich zuvor auch in der akademischen Physikdidaktik abgezeichnet hatte: Statt eines didaktischen Gesamtkonzepts wurde die Thermodynamik über eine Anthologie von Themen behandelt, die nur lose miteinander in Beziehung gesetzt wurden.

Um eine unterrichtliche Behandlung und experimentelle Untersuchung dissipativer Strukturen in einen sinnvollen Rahmen zu setzen, musste in dieser Arbeit ein Entwurf eines Unterrichtskonzeptes zur Thermodynamik entwickelt werden. Der dabei entstandene, innovative Vorschlag kann als heuristisch angesehen werden und erhebt nicht den Anspruch, ein wegweisendes Konzept für die Behandlung der Thermodynamik im Oberstufenunterricht zu liefern. Ein solches Konzept muss in den kommenden Jahren noch ausgearbeitet werden.

8. Anhang

8.1. Abbildungen

Abb. A1: Strukturbildung im Zuge der Entwertung mechanischer Energie der Wellen zu Wärmeenergie

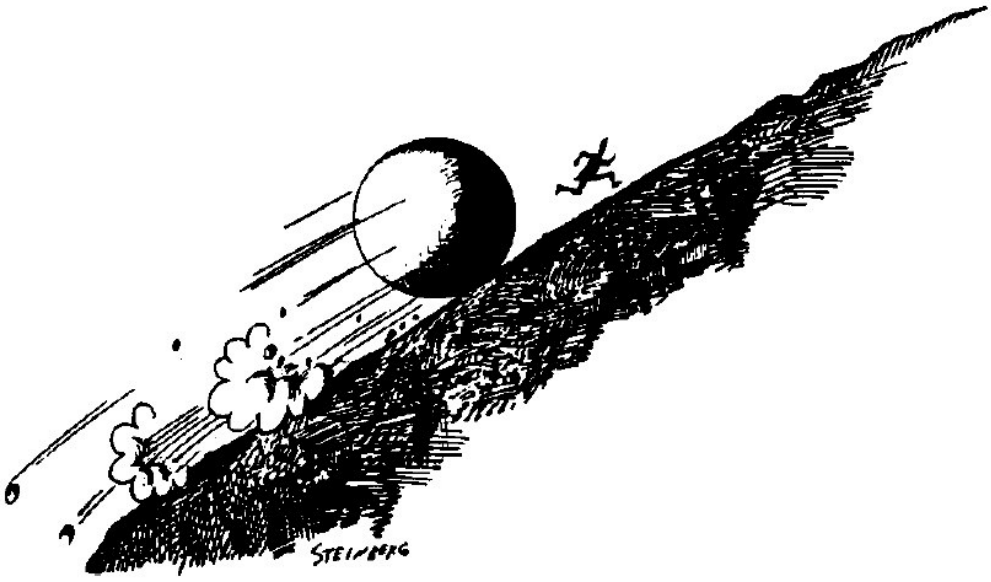

Abb. A2: „Eine realistische Gefahrensituation?“

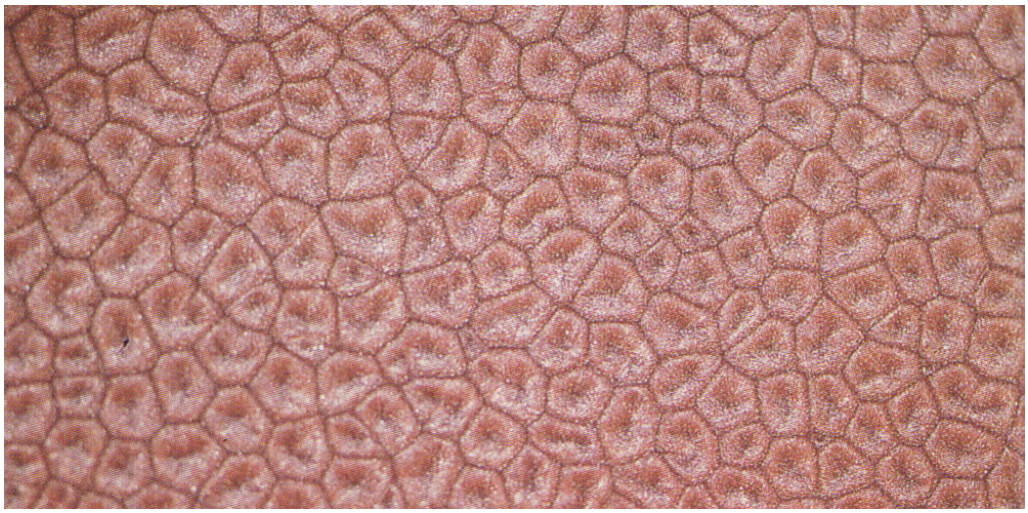

Abb. A3: Bénardkonvektion

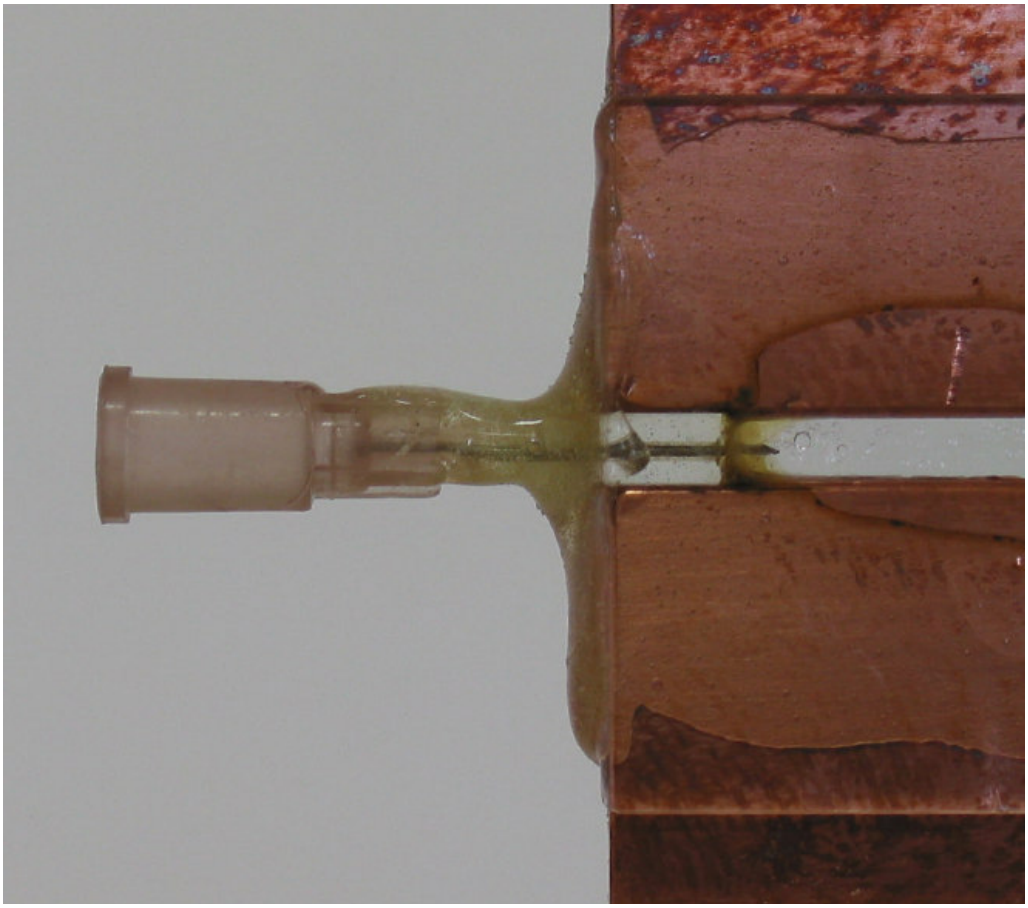

Abb. A4: Die eingeklebte Kanüle in Nahaufnahme.

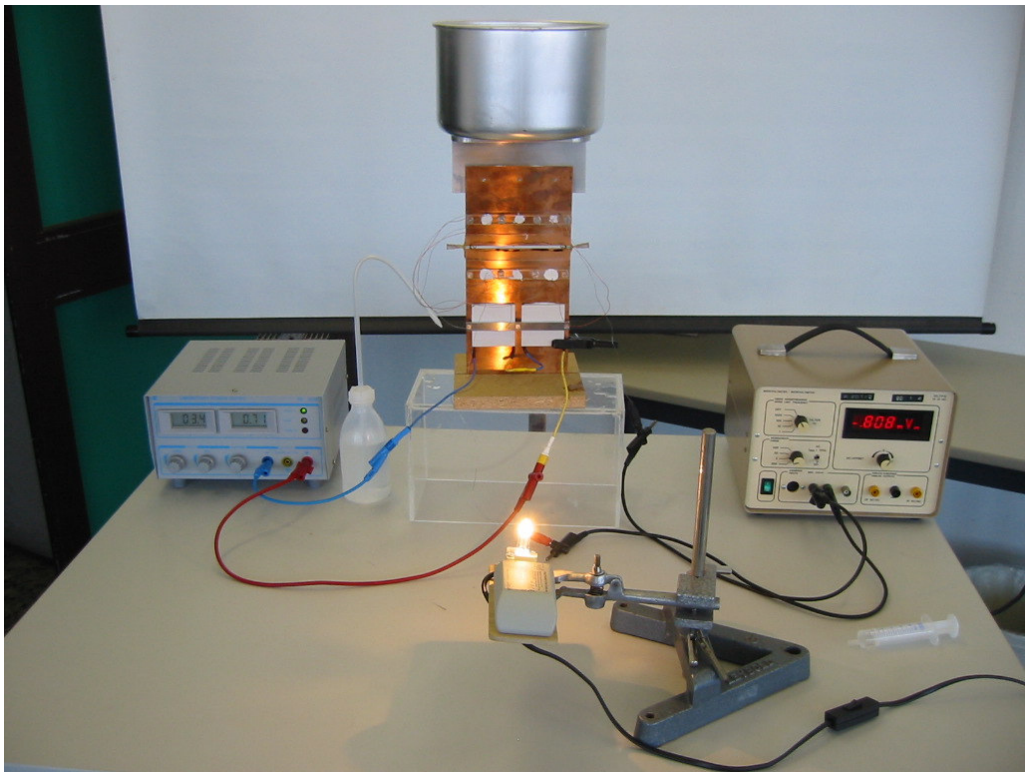

Abb. A5: Versuchsaufbau im Institut für die Didaktik der Physik Münster. Als geregeltes Netzteil wurde das Conrad Electronic 303D verwendet, als Spannungsmessgerät wurde ein Mikrovoltmeter Elwe verwendet. Im Hintergrund sieht man die Projektionswand.

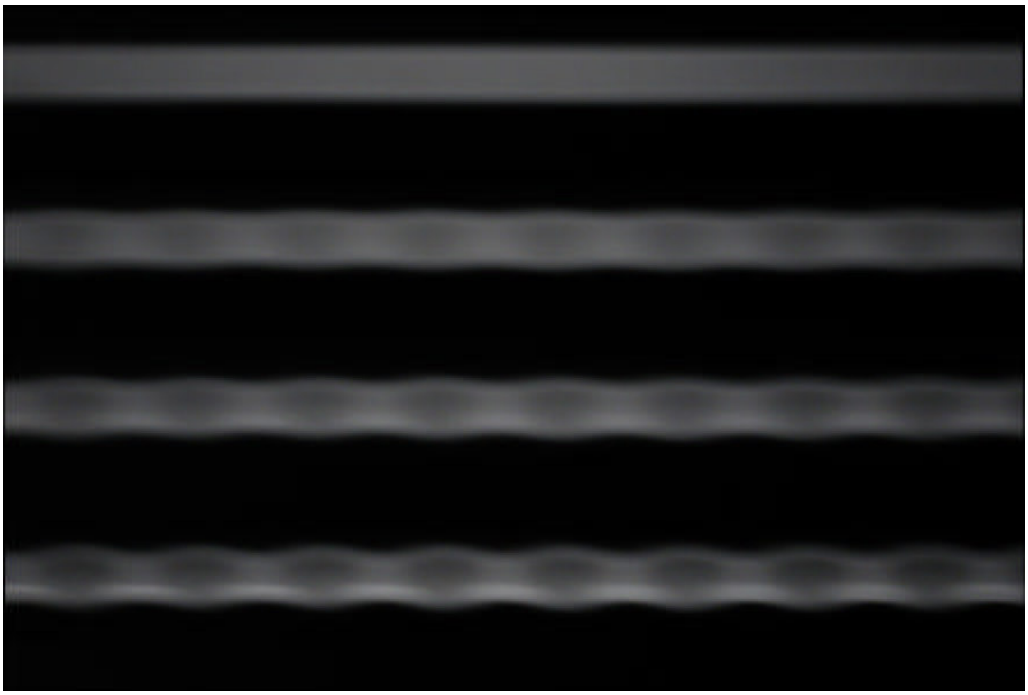

Abb. A6: Die Projektion der Konvektion synoptisch dargestellt. Die oberste Aufnahme zeigt den strukturlosen Zustand unterhalb von 4°K Temperaturdifferenz. Die unteren zeigen die Ausprägung der Konvektionszellen bei ansteigender Temperatur.

Literatur

Backhaus, Udo; Breuer, Elmar; u.a.: Physik plus, Berlin 1999.

Dreißig, Helmut (Hrsg.), u.a.: Oberstufe Physik. Ausgabe D. Band 1, Berlin 1999.

Dreißig, Helmut (Hrsg.), u.a.: Oberstufe Physik. Sachsen-Anhalt. Klasse 11, Berlin 2000.

Gertsen, Joachim: Physik: Ein Lehrbuch zum Gebrauch neben Vorlesungen, Berlin 1989.

Grehn, Joachim; Krause, Joachim (Hrsg.): Metzler Physik, Hannover 1998.

Guyon, Etienne; Hulin, Jean-Pierre; Petit, Luc: Hydrodynamik. Braunschweig 1997.

Ministerium für Schule und Weiterbildung, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.): Richtlinien und Lehrpläne für die Sekundarstufe II – Gymanasium/Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen. Physik, Frechen 1999.

Dennis Pongs, Experimentelle Zugänge zur Strukturbildung in der Sekundarstufe I (unveröffentlichte Examensarbeit am Institut für Didaktik der Physik Münster), Münster, 2002.

Ruhnau, Annika: Physikalische Untersuchungen von Konvektionsvorgängen in Fluiden mit Mitteln der Schulphysik (unveröffentlichte Examensarbeit an dem Institut der Didaktik der Physik Münster), Münster 2003.

Schlichting, H. Joachim: Der trinkende Storch - eine Verdunstungskraftmaschine, in: Praxis der Naturwissenschaften -Physik 41/2, 22 (1992).

Schlichting, H. Joachim: Energieentwertung – ein qualitativer Zugang zur Irreversibilität, Praxis der Naturwissenschaften/ Physik 49/2, (2000).

Szallies, Bernhard: Physik 2. kurz & klar, Wolfenbüttel 1993, S. 49f.

Abbildungsverzeichnis

Alle im Fließtext verwendeten Abbildungen und Fotographien sind vom Autor erstellt.

Nachweis der Bilder im Anhang:

Abb. A1: Fotograf unbekannt.

Abb. A2: Schlichting (2000).

Abb. A3 :Dreißig (2000), S. 90.

Abb. A4 : Fotografiert von Carsten Bruns.

Abb. A5: Fotografiert von Malte Renius.

Abb. A6: Fotografiert und bearbeitet von Carsten Bruns.

Danksagung

Ich danke Dr. Karl Heinrich Hucke, Prof. Hans Joachim Schlichting, Annika Ruhnau und Frau Dr. Sigrid Weber für hilfreiche Anregungen sowie Carsten Bruns für praktische Hilfestellung bei der Durchführung des Experiments.

Hiermit versichere ich, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst, keine anderen Quellen und Hilfsmittel als die angegebenen benutzt und die Stellen der Arbeit, die anderen Werken dem Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, in jedem einzelnen Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht habe.

Münster, den 29.06.2007 .....

Ich bin damit einverstanden, dass diese Hausarbeit nach Abschluss meiner Zweiten Staatsprüfung wissenschaftlich und pädagogisch interessierten Personen oder Institutionen zur Einsichtnahme zur Verfügung gestellt wird und dass zu diesem Zweck Ablichtungen dieser Hausarbeit hergestellt werden, sofern diese keine Korrektur- oder Bewertungsvermerke enthalten.

Münster, den 29.06.2007 .....