

LESEPROBE

Entropie als Elchtest

Objektivistische Physik in Schleudergefahr

1. Zum Objektivismus in den Naturwissenschaften	1
a) Das nicht-objektivistische Wissenschaftsverständnis	1
b) Die Krise des Objektivismus	4
2. Entropie in der phänomenologischen Thermodynamik	7
a) Entropie und Wärmekraftmaschine	7
b) Entropie als Ding	11

... usw. usw.

1. Zum Objektivismus in den Naturwissenschaften

Entropie ist ein schicker Begriff, der in vielen Diskussionszusammenhängen ins Spiel gebracht wird und vielen Leuten leicht über die Lippen geht. In Wahrheit verbirgt sich dahinter aber ein extrem sperriges physikalisches Konzept. Um seine eigentliche Bedeutung erfassen und ausloten zu können, muss unser Denken die Strategie, die es im Zuge der Entwicklung der neuzeitlichen Naturwissenschaft ersonnen und perfektioniert hat, bis zum Äußersten ausreizen. Am Beispiel der Bemühungen um eine korrekte Interpretation des Begriffs der Entropie ist daher nicht nur zu beobachten, wie diese Strategie funktioniert, sondern auch zu erkennen, wo ihre Grenzen liegen, und wo ein Denken, das zu wenig über diese Grenzen reflektiert, immer wieder **ins Schleudern** gerät.

Will man die erwähnte Strategie mit einem einzigen Wort charakterisieren, kann man sie als **Objektivismus** bezeichnen. Objektivistisch dachte und denkt das Gros der Naturwissenschaftler insofern, als man lange Zeit alle Aufmerksamkeit auf die jeweils zu analysierenden Objekte konzentrierte, während gleichzeitig deren Bezüge zum Wissenschaft betreibenden **Subjekt** und dessen **Handeln** ausgeblendet wurden. Seit man mit großer Verspätung endlich dieses Subjekt in den Blick fasst, will man in ihm nur eine Sonderform des Objekts sehen. Man verfährt bis heute auf diese Weise, weil sich die Strategie des Objektivismus jahrhundertlang bestens bewährte, indem sie eine klare Stellung und Abgrenzung von Forschungsthemen ermöglichte und dadurch schon im Vorfeld des eigentlichen Forschungsprozesses für eine radikale Vereinfachung höchst komplexer Problemlagen sorgte. Aus mehreren Gründen geriet der Objektivismus jedoch im Verlauf des zwanzigsten Jahrhunderts in eine **tiefe Krise**, die sich aktuell eher zu verschärfen als zu entschärfen scheint.

a) Das nicht-objektivistische Wissenschaftsverständnis

Bevor ich auf die Krise des Objektivismus etwas näher eingehe, möchte ich ganz kurz die Umrisse eines **nicht-objektivistischen** Wissenschaftsverständnisses skizzieren, das die Rolle des Subjekts im Erkenntnisprozess berücksichtigt. Dieser unter anderem an die Transzendentalphilosophie, den Pragmatismus und die kritische Theorie anknüpfende Zugang zur Naturwissenschaft geht von den drei folgenden Annahmen aus¹:

- (1) Sinn und Wahrheitsgehalt aller wissenschaftlichen Aussagen über ein bestimmtes Objekt lassen sich nur vor dem Hintergrund ihres Beitrags zur **Orientierung** und **Erfolgssicherung** des mit dem betreffenden Gegenstand befassten Handelns klären.
- (2) Der eigentliche **Sinn** einer wissenschaftlichen Aussage über ein bestimmtes Objekt liegt in den auf den betreffenden Gegenstand bezogenen Aktionsmöglichkeiten, die aus jener Aussage ableitbar sind.
- (3) Ihr **Wahrheitsgehalt** bemisst sich dagegen an den Erfolgchancen des Handelns, das sich an den aus ihr ableitbaren Aktionsmöglichkeiten orientiert. Wahr sind also nur je-

1 Ausführliche Erläuterungen zum genannten Wissenschaftsverständnis samt Begründung der ihm zugrunde liegenden Ausgangsannahmen gibt meine dreibändige Studienreihe über *"Erkenntnistheoretische Grundlagen der Physik"*; vgl. (2), (3) und (4). Eine Kurzfassung der in diesen Erläuterungen zum Ausdruck kommenden philosophischen Position findet sich in Abschnitt 1.b von *"Tatbestand Leben"*.

ne Aussagen, die sich in diesem Handeln bewähren, während alle Urteile als widerlegt zu gelten haben, die zum Scheitern der an ihnen ausgerichteten Praxis führen.

Im Gegensatz zum Mainstream des Forschungsbetriebs, in dem man sich zu wenig mit der aller Empirie vorgeordneten Frage beschäftigt, was denn eigentlich unter einem Objekt zu verstehen ist, stellt die von den eben skizzierten Annahmen ausgehende nicht-objektivistische Erkenntniskritik besagte Frage ins Zentrum ihrer Reflexionen. Letztere führen zu einem Blick **hinter** die Objektfassade der Forschungsgegenstände, der Erstaunliches offenbart. Die diesbezüglichen Analysen der Methodik naturwissenschaftlicher Begriffs- und Theoriebildung zeigen nämlich, dass naturwissenschaftliche Aussagen das Geschehen im jeweils zu beschreibenden Gegenstandsbereich stets **nach dem Vorbild menschlicher Interaktionen** modellieren. In diesem Sinne wird jedes Objekt von vornherein als ein **virtueller Akteur** betrachtet. Und in weiterer Folge sind dann sämtliche das Verhalten dieses virtuellen Akteurs bestimmenden Kräfte und Gesetze als **Analogien** zu menschlichen Handlungsmotiven und den sie steuernden gesellschaftlichen Gesetzen begreifbar.

Ferner machen jene Untersuchungen deutlich, dass die Physik bei ihrer analogisierenden Begriffsbildung auch wichtige Wandlungen der als Vorbild dienenden Gesellschaftsstruktur nachvollzieht.² Man darf sich das natürlich nicht so vorstellen, dass entsprechende Veränderungen im begrifflichen Rahmen der Forschungstätigkeit in voller Absicht und ganz gezielt vorgenommen werden. Der Übergang zu neuen Begriffen und Paradigmen ist in der Physik wie in jeder anderen Naturwissenschaft durch interne sachlogische Problemstellungen motiviert und muss sich auch in diesem Kontext bewähren. Andererseits ist es alles andere als zufällig, wenn man bei der Bewältigung bestimmter empirischer und theoretischer Probleme aus einer ganzen Vielzahl denkbarer Konzepte gerade solche auswählt, welche mit dem jeweiligen gesellschaftlichen Umfeld kompatibel sind.

In diesem Sinn war das Objekt der klassischen Mechanik noch ein als 'Körper' bezeichnetes isoliertes **Ding**, das als solches dem ebenso isolierten Warenproduzenten nachgebildet war, der in den Anfangsphasen des Kapitalismus das Geschehen auf den Märkten bestimmte. Als der Kapitalismus dann mit der Bildung von gelenkten und machtstrukturierter Märkten sowie dem Aufbau staatlicher Interventions- und Absicherungssysteme immer komplexer vernetzte Gesellschaftsstrukturen hervorbringt, zieht die Physik mit einem entsprechenden Begriffswandel nach. Ihr auf die Natur projiziertes virtuelles Subjekt ist nun nicht mehr der isolierte Körper, sondern das '**System**', das mit anderen Systemen vernetzt ist, und innerhalb dessen der einzelne Körper nur noch als eines von vielen Elementen fungiert. Trotz dieser schon im neunzehnten Jahrhundert einsetzenden begrifflichen Weiterentwicklung bestimmt jedoch die Tendenz, alle Untersuchungsobjekte nach dem Muster dinglicher Gegenstände zu verstehen, das Denken der Physiker bis weit ins zwanzigste Jahrhundert hinein. Dieser Hang zur **Verdinglichung**, als die gleichsam 'roheste' Form des Objektivismus, lässt die Physiker oft auch dort Dinge sehen, wo man mit anderen Modellbildungen besser fahren würde.

Vor dem Hintergrund des zuvor festgestellten Praxisbezugs sämtlicher wissenschaftlicher Aussagen ist leicht zu verstehen, **warum** die Naturwissenschaft derartige Analogiebildun-

2 Vgl. zum Folgenden (4) S. 129 f.

gen betreiben **muss**, und warum sie genötigt ist, tiefgreifenden gesellschaftlichen Wandel auch in der Begriffsbildung nachzuvollziehen: Man stilisiert die Objekte als virtuelle Akteure, **damit** der an den naturwissenschaftlichen Aussagen orientierte Handelnde seine innerhalb der Gesellschaft eingeübten Interaktionsmuster auch bei seinen Kontakten mit der ihn umgebenden Natur praktizieren kann. Wandeln sich daher jene sozialen Interaktionsmuster, dann ist es von großem Vorteil, wenn sich auch die auf die Natur projizierten Muster des Verhaltens der virtuellen Subjekte entsprechend ändern. Ein zweiter Grund für die unleugbaren Übereinstimmungen zwischen Gesellschaftsstrukturen und den in ihrem Kontext entstehenden Naturbildern liegt im Grundmuster alles Erkennens: Erkennen ist nie etwas anderes als die Rückführung des Unbekannten auf das Bekannte. Und das uns am besten Bekannte sind immer unsere eigenen Interaktionen.

Das objektivistische Denken übersieht die eben skizzierten konstitutiven Bezüge aller naturwissenschaftlichen Paradigmen und Axiome auf das soziale Handeln und wiegt sich in der **Illusion**, dass sie **unmittelbare Abbilder** von entsprechenden physikalischen bzw. logisch-mathematischen Strukturen des Objektbereichs sind. Die der transzendentalphilosophischen Tradition verpflichtete nicht-objektivistische Wissenschaftstheorie hat demgegenüber eingesehen, dass sich bei der Konstitution unseres Naturbilds die von uns unabhängigen Gegebenheiten des Objektbereichs mit den unserer erkenntniskritischen Selbstreflexion zugänglichen Mustern sozialen Handelns **unauflösbar verbinden**, weshalb prinzipiell nicht zu erkennen ist, wie sie an sich (also unabhängig von unseren Erkenntnisaktivitäten) gestaltet sein mögen. Im Kern aktualisiert die nicht-objektivistische Position nur die uralte **sokratische Kritik** am Selbst- und Weltverständnis des Alltagsbewusstseins: Dessen Vertreter glauben zu wissen, ihr Kritiker weiß aber, dass sie nur glauben.

Die eben angesprochene Illusion des unmittelbaren Abbildens ist gleichermaßen zentral wie auch schwer zu durchschauen für die in der objektivistischen Weltsicht befangene Wissenschaft. Ich möchte deshalb hier noch einen weiteren Aspekt dieser Selbsttäuschung etwas detaillierter darstellen: Wer besagter Illusion aufsitzt, unterliegt dem Irrtum, dass das Erkennen nur sehr lose mit dem Handeln verknüpft ist. Er denkt nämlich, dass letzteres sich immer erst dann an bestimmten Erkenntnissen orientieren kann, wenn diese bereits fertig vorliegen. Tatsächlich aber ist das Handeln viel enger mit dem Erkennen verquickt. Denn es schiebt sich bereits beim Vollzug jeder Wahrnehmung **zwischen** das Subjekt und sein jeweiliges Objekt - und zwar **nicht nur** in Gestalt der bereits erwähnten Analogien zwischen all unseren Naturmodellen und den Mustern der zwischenmenschlichen Interaktion. Um anhand eines Beispiels verstehbar zu machen, worum es hier geht, lade ich die LeserInnen zur Durchführung des folgenden Gedankenexperiments ein:

Man stelle sich eine Person vor, welche ihre Hände an die Seitenfläche eines Gegenstands gelegt hat und nun an ihren Handflächen einen Druck verspürt. Die betreffende Person wird dieses Druckerlebnis nur dann sinnvoll interpretieren können, wenn sie nicht bloß auf den betreffenden Gegenstand achtet, sondern **zugleich** auch darauf, wie sie selbst sich ihm annähert: Presst sie mit ihrer Hand **aktiv** gegen jenes Objekts, wird sie den an ihrer Handfläche empfundenen Druck als Resultat des Widerstands seiner trägen **Masse** gegen die selbst ausgeübte **Kraft** interpretieren. Berührt dagegen ihre Hand den Gegenstand

bloß auf eine **passiv** fühlende Weise, dann wird sie den erlebten Druck als Resultat einer von ihm ausgehenden Kraft interpretieren und demzufolge vermuten, dass er sich langsam auf sie zubewegt. Das vorliegende Beispiel verweist auf eine grundlegende **Komplementarität** des Erfahrungsprozesses.³ Diese zwingt das Subjekt dazu, bei all seinen Objektwahrnehmungen zugleich auch den Modus seines eigenen, auf den betreffenden Gegenstand bezogenen Handelns im Blick zu behalten, wodurch alle Naturerkenntnis eine **innere 'Brechung'** erfährt. Sie stellt nie bloß die Natur als solche dar, sondern immer auch bestimmte Aspekte unseres auf sie bezogenen Handelns.

b) Die Krise des Objektivismus

Die eingangs erwähnte Krise des Objektivismus hat **zwei Hauptgründe**, bei deren Nennung sogleich deutlich wird, warum es heute so wichtig ist, über alternative Erkenntnisstrategien nachzudenken. Der **erste** dieser beiden Gründe besteht darin, dass die Wissenschaft die in ihrer Auseinandersetzung mit der Natur entwickelte Methodik seit Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts auch bei ihrer nun einsetzenden Befassung mit dem zuvor ausgeblendeten Subjekt, sprich: mit dem Menschen und seiner Gesellschaft, anwendet. Es gelingt ihr dadurch zwar, ein immer detailreicheres und präziseres Bild von den biologischen, psychologischen und sozialen Strukturen der *Conditio humana* zu zeichnen. Der Aufbau dieses Bildes ist aber entsprechend der objektivistischen Methodik seiner Erstellung weitestgehend von reinen Sachgesetzmäßigkeiten bestimmt und verfehlt so grundsätzlich, was es heißt, ein individuelles Subjekt zu sein und damit als Glied eines ebenfalls zum Subjektsein befähigten Kollektivs zu fungieren. In gesellschaftspolitischer Hinsicht hat das höchst bedenkliche Folgen. Denn eine Wissenschaft vom Menschen und der Gesellschaft, die alles Geschehen als ein Prozessieren von Sachgesetzmäßigkeiten darstellt, führt letztlich zur **Selbstentmächtigung** des Menschen und zementiert so das Ende der Utopien.

Das Verfehlen des Subjekts schlägt sich aber nicht nur in den noch relativ jungen Wissenschaften vom Menschen und der Gesellschaft nieder⁴, sondern behindert auch die Weiterentwicklung der Naturwissenschaft. Hier zeigt sich dann der **zweite** der beiden zuvor erwähnten Hauptgründe für die Verschärfung der Krise des Objektivismus. Er betrifft vor allem die Physik und besteht darin, dass sich diese Wissenschaft im Gefolge der Entwicklung immer präziserer Beobachtungsinstrumente in jene Mikrobereiche unserer Welt vorstastete, in denen die bei der Beobachtungsaktivität mobilisierten Energien von ähnlicher Größenordnung sind wie die bei den jeweils beobachteten Vorgängen im Spiel befindlichen Energien. Die prinzipiell bei **jedem** Beobachtungsprozess vorhandene Wechselwir-

3 Zur detaillierten Analyse der in diesem Beispiel demonstrierten Komplementarität unserer Kraft- und Materieerfahrungen vgl. die Kapitel 4 ("*Kraft und Materie*") und 5 ("*Die Entwicklung des Kraft-Materie-Paradigmas*") in (2)

4 Die Kritik am Verfehlen des Subjekts begleitet die Sozialwissenschaften seit ihren Anfängen. Ein diesbezüglicher Klassiker ist Marxens Spott über den Warenfetischismus der bürgerlichen Ökonomen: "*Der grobe Materialismus der Ökonomen, die gesellschaftlichen Produktionsverhältnisse der Menschen und die Bestimmungen, die die Sachen erhalten, ... als natürliche Eigenschaften der Dinge zu betrachten, ist ein ebenso großer Idealismus, ja Fetischismus, der den Dingen gesellschaftliche Beziehungen als ihnen immanente Bestimmungen zuschreibt und sie so mystifiziert.*" (50) S. 579; Hervorhebung durch K. Marx

kung zwischen dem Beobachter und seinem Gegenstand erfährt dadurch in diesem Mikrobereich einen so starken Bedeutungszuwachs, dass sie sich auf nicht eliminierbare Weise im Beobachtungsergebnis niederschlägt. In der Quantentheorie verbinden sich die Defizite bei der Reflexion auf diese neue Qualität der Subjekt-Objekt-Beziehung im Erkenntnisprozess mit bis heute fortwirkenden Mängeln im Verständnis des **Komplementaritätsprinzips**. Besagte Probleme mit der quantenphysikalischen Komplementarität wurzeln letztlich darin, dass man auch schon die am Ende des vorangehenden Abschnitts erwähnte Komplementarität von Wahrnehmen und Handeln, welche unser Erkennen der Makrowelt prägt, übersieht. In weiterer Folge resultieren dann aus all diesen Reflexions- und Verständnisdefiziten philosophische **Paradoxien** wie etwa die Vorstellungen eines "Dualen Seins" der Materie (als Welle und Teilchen) und des Vorhandenseins von "verschmierten" Seinszuständen.⁵

Beim Zustandekommen dieser Ungereimtheiten spielt neben den eben angeführten Defiziten auch die erwähnte Verdinglichungstendenz eine wichtige Rolle. Sie (ver-)führt die Quantenphysiker nämlich zu der Annahme, bei ihren Objekten handle es sich im Grunde immer schon um **Teilchen**, die sich aber vor ihrem Kontakt mit dem Subjekt in einem verschmierten Seinszustand befinden, aus dem sie erst durch das Subjekt 'erlöst' werden. Denn dieses macht sie dann durch die Wahl einer bestimmten Registrierungsmethode erst zu beobachteten Wellen oder Teilchen und beendet im zweiten Fall ihr verschmiertes Sein, indem es ihnen im Akt der Beobachtung einen bestimmten Ort zuweist. All diese Annahmen lassen die Physiker die viel weiter tragende und Paradoxien vermeidende Hypothese übersehen, dass wir es immer nur mit Energiewellen zu tun haben, die ihrem Beobachter bloß unter ganz bestimmten Beobachtungsbedingungen als Teilchen **erscheinen**.

Die voreilige Verdinglichung der Quantenobjekte hängt ihrerseits eng zusammen mit der Verdinglichung eines Objekts, das schon vor aller Befassung mit der Teilchenwelt ins Zentrum der Aufmerksamkeit der Physiker getreten war. Gemeint ist die von der Physik bereits im Verlauf des neunzehnten Jahrhunderts zum Thema gemachte **Energie**. So wie alle fundamentalen Konzepte der Physik entstand auch der Begriff der Energie durch Bildung einer Analogie zu einem in unserem gesellschaftlichen Erfahrungshorizont angesiedelten sozialen Phänomen.⁶ Was man im Fall der Energie auf die Natur projiziert, ist der **Warenwert** der im Kontext marktwirtschaftlicher Produktionsverhältnisse gehandelten Erzeugnisse. Die klassischen Ökonomen bis hin zu Marx verstanden jenen Wert als die in den Waren gespeicherte **abstrakte Arbeit**. In Entsprechung dazu definierten die Physiker Energie als die in einem natürlichen System gespeicherte Arbeit. Und sie setzten diese gespeicherte Arbeit gleich mit der Fähigkeit jenes Systems, nun seinerseits Arbeit zu leisten, was so viel bedeutet wie die Übertragung jener gespeicherten Energie auf ein anderes System. Ein nach außen hin geschlossener Zusammenhang solcher natürlicher Systeme wird damit zum perfekten Abbild einer im Zustand der einfachen Reproduktion verharrenden Marktwirtschaft. Denn in einem solchen physikalischen Systemzusammenhang

5 Eine ausführliche Darstellung der hier nur stichwortartig benannten Probleme und meiner Vorschläge zu ihrer Entschärfung bzw. Vermeidung findet sich in (4). Eine kurze Zusammenfassung der diesbezüglichen Überlegungen kann in (5) auf meiner Webseite nachgelesen werden.

6 Vgl. zum Folgenden (7) S. 117

kreist Energie, ohne verloren zu gehen oder sich zu vermehren, genauso wie der Arbeitswert in der sich einfach reproduzierenden Marktwirtschaft.

Diese Analogie zwischen der natürlichen Systeme konstituierenden Energie und der Waren schaffenden gesellschaftlichen Arbeit impliziert eine **Verdinglichung der Energie**. Macht man doch dabei aus einem Vermögen zur Interaktion ein speicherbares Ding. Und wenn man dann davon spricht, dass dieses Ding im Kontakt mit anderen Systemen abgegeben bzw. übertragen wird, so wie man ein Paket beim Empfänger abgibt, dann reduziert man komplementär dazu die Vielfalt der konkreten und lebendigen Arbeitsvorgänge auf das bloße Abgeben jenes Energie-Dings. Solche modellhafte Verdinglichung bringt wichtige Vorteile im Umgang mit Energie und Arbeit, denn sie macht beides gut berechenbar und vereinfacht die bildliche Vorstellung einer Vielzahl unterschiedlicher Abläufe. Sie birgt aber tückische Fallen, wenn man vergisst, dass man es mit einem vom Menschen konstruierten Modell zu tun hat und nicht mit einem simplen Abziehbild des tatsächlichen Geschehens.

Auf die Spitze wird die Stilisierung der Energie zu einem Ding dadurch getrieben, dass viele Physiker mit ihrer Vorstellung von Energie nicht an die eben skizzierte Analogie mit der abstrakten Arbeit anknüpfen sondern am **Geld**, d.h. an dem als selbständiges Warending vergegenständlichten Arbeitswert. In diesem Sinne ist etwa für Einstein bei der Berechnung der Bewegungsbahn eines Körpers die aus kinetischer und potentieller Energie bestehende Gesamtenergie mit einem Geldbetrag *"vergleichbar, dessen Wert man stets auf gleicher Höhe hält, ihn dabei aber unter Zugrundelegung eines wohlberechneten Wechselkurses ständig von einer Währung in die andere, sagen wir von Dollars in Pfund Sterling und umgekehrt, umwechselt."*⁷

Und damit komme ich nun zu dem eng mit dem Energiebegriff zusammenhängenden Konzept der Entropie. Wie sich nämlich weisen wird, resultieren problematische Implikationen der verdinglichenden Vorstellung von Energie nicht nur bei der zuvor erwähnten Deutung des Verhältnisses von Welle und Teilchen sondern auch bei der Interpretation des Entropiebegriffs.

Um ein mögliches Missverständnis betreffend das **Grundanliegen** der folgenden Kritik an diesen Implikationen auszuschalten, möchte ich betonen, dass es mir **nicht** um eine prinzipielle Zurückweisung der vom Objektivismus entwickelten Erkenntnisstrategie geht. Meine Reflexionen haben vielmehr die beiden folgenden Ziele: Zum einen möchten sie darauf aufmerksam machen, wie **umfassend** diese Strategie angewendet wird, ist dies doch so manchem Physiker gerade deshalb nicht bewusst, weil er sie mit routinemäßiger Selbstverständlichkeit praktiziert. Zum anderen wollen die nachstehenden Überlegungen darauf hinweisen, wo die objektivistische Erkenntnisstrategie ihre **Grenzen** hat, weil sie zu Ungereimtheiten führt und/oder die gedankliche Freiheit bei der Theorie- und Modellbildung einengt.

7 (21) S. 64

2. Entropie in der phänomenologischen Thermodynamik

In ihren bis ins 17. Jahrhundert zurückreichenden Anfängen befasste sich die Thermodynamik mit den der direkten Beobachtung zugänglichen Prozessen des Wärme­flusses in Gasen und Flüssigkeiten. Ab der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts versuchte man dann, diese phänomenologisch beschreibbaren Vorgänge durch eine ihnen zugrunde liegende Bewegung von Teilchen (Atome, Moleküle) zu erklären. Dabei stellte man im Unterschied zur klassischen Mechanik Newtons nicht auf Gesetze ab, welche die Bewegung des einzelnen Teilchens beschreiben, sondern suchte nach statistischen Gesetzmäßigkeiten, die jeweils die Gesamtheit aller in einem Fluid (Gas oder Flüssigkeit) vorhandenen Teilchen betreffen. Man unterscheidet deshalb zwischen einer nur mit Makroprozessen befassten **phänomenologischen** Thermodynamik und einer auch die Teilchenebene in den Blick fassenden **statistischen** Thermodynamik. Soweit letztere primär auf die Bewegung von Gasteilchen abstellt, spricht man auch von der kinetischen Gastheorie. Der Entropiebegriff wurde zwar bereits von der phänomenologischen Thermodynamik entwickelt. Dem statistisch-kinetischen Ansatz gelang in der Folge jedoch eine wesentliche Vertiefung des Verständnisses dieses wichtigen Konzepts.

a) Entropie und Wärmekraftmaschine

Entstehung und Entfaltung der phänomenologischen Thermodynamik lag das praktische Anliegen zugrunde, den in der **Dampfmaschine** ablaufenden physikalischen Prozess besser zu verstehen, um ihn optimieren zu können. Die Entropie ist einer der dabei entwickelten Schlüsselbegriffe. Um seinen Stellenwert erläutern zu können, gilt es zunächst das Problem zu skizzieren, an dem sich die Thermodynamik bei ihrem Versuch des physikalischen Begreifens der Dampfmaschine abarbeitete.

Aufbauend auf Vorläufermodellen von Denis Papin und Thomas Savery installierte Thomas Newcomen die erste Dampfmaschine im Jahr 1712 in einem Bergwerk, um das Grubenwasser abzupumpen. Die Maschine wurde ihrer Aufgabe zwar gerecht, benötigte aber sehr viel Brennstoff und wurde deshalb rund 50 Jahre danach von James Watt so weit verbessert, dass sie nun einen mehr als doppelt so hohen **Wirkungsgrad** hatte. Dieser in der Physik mit dem Symbol η (Eta) bezeichnete und als das Verhältnis zwischen verrichteter Arbeit W und zugeführter Wärme Q definierte Wirkungsgrad lag aber auch bei Watts Dampfmaschine erst knapp über 1%. Konkret bedeutet dies, dass die Maschine beim Einsatz von 100 Einheiten Wärmeenergie nur etwas mehr als eine Energieeinheit in die von ihrem Konstrukteur beabsichtigte Arbeit umsetzte, während der große Rest irgendwie verloren ging.⁸ Die allmähliche Anhebung dieses noch immer äußerst geringen Wirkungsgrades auf bis zu 10% und die Konstruktion anderer Arten von Wärmekraftmaschinen mit Wirkungsgraden von immerhin bis zu 45%⁹ war nur möglich, weil es der Physik in der Folge gelang, sich ein genaues Bild von dem in Wärmekraftmaschinen ablaufenden Prozess zu machen.

⁸ Vgl. (147)

⁹ Dieser Wert gilt für Dampfturbinen. Otto- und Dieselmotore haben Wirkungsgrade bis zu 35% bzw. 40%; vgl. (148)

Die Hauptursache dafür, dass diese Wirkungsgrade auch nach allen Verbesserungen noch recht niedrig sind, liegt darin, dass jener Prozess ein **zyklischer** Vorgang ist, bei dem die Maschine immer wieder in ihre Startposition zurückkehrt. Um dies zu erreichen, hat sie neben der **externen** Arbeit an dem jeweils mit ihr verbundenen Arbeitsgerät auch **interne** Arbeit an sich selbst zu leisten. Das müsste selbst im Idealfall einer Ausschaltung aller Reibungsvorgänge zu einer kontinuierlichen Erhöhung ihrer Betriebstemperatur führen, wenn nicht ein beträchtlicher Teil der in die Maschine eingeleiteten Wärme im Zuge kontinuierlicher **Kühlung** wieder abgeführt würde.

Man kann sich das auch ohne Rückgriff auf den Entropiebegriff klar machen anhand eines einfachen Gedankenexperiments, bei dem man von aller externen Arbeit der Maschine absieht. Denken wir zu diesem Zweck an einen waagrechten, mit Gas gefüllten Zylinder, in dessen Mitte sich ein verschiebbarer Kolben befindet. Der Zylinder sei thermisch isoliert, wobei aber eine Möglichkeit zu gezielter Wärmezufuhr bestehe. Es handle sich um eine ideale Konstruktion, bei der es keinerlei Reibungsvorgänge gibt.

- Im ersten Schritt führen wir dem Gas linkerhand des Kolbens Wärme zu, worauf es sich ausdehnt. Es schiebt dabei den Kolben vor sich her, der seinerseits das rechts von ihm befindliche Gas komprimiert. Dabei steigt die Temperatur des komprimierten Gases an, während die Temperatur des expandierenden Gases konstant bleibt, da es alle ihm zugeführte Wärme in Arbeit an dem rechts vom Kolben befindlichen Gas umsetzt.
- Im zweiten Schritt beenden wir die Wärmezufuhr. Nun dehnt sich das rechts vom Kolben befindliche Gas so lange wieder aus, bis der Kolben in seine anfängliche Mittelstellung zurückkehrt. Dabei steigt nun die Temperatur des links vom Kolben befindlichen Gases an, da es jetzt seinerseits komprimiert wird, während die Temperatur des rechts vom Kolben befindlichen Gases so lange sinkt, bis die Temperatur und damit auch der Druck auf beiden Seiten des Kolbens gleich hoch sind. Weil aber die Temperatur des links vom Kolben befindlichen Gases jetzt höher ist als vor seiner Expansion, ist die Temperatur nun in beiden Hälften des Zylinders höher als vor der Wärmezufuhr.

Die zugeführte Wärmeenergie hat also den Kolben einmal hin und her bewegt, wobei jede seiner beiden Teilbewegungen Resultat einer Arbeit des Systems an sich selbst war. Der erste Schritt dieser inneren Arbeit wurde von dem links vom Kolben angesiedelten Arbeitsgas vollbracht und resultierte in einer deutlichen Erhöhung des Energiegehalts des rechts vom Kolben befindlichen Arbeitsgases. Dieses vollzog dann unter Verbrauch eines Teils jener Zusatzenergie den zweiten Schritt der inneren Arbeit, indem es nun auch den Energiegehalt des auf der linken Seite vorhandenen Arbeitsgases erhöhte. Das Gesamtergebnis der inneren Arbeit der Maschine an sich selbst besteht in einer beiderseits des Kolbens gleich starken Erhöhung des Energiegehalts des Arbeitsgases. Diese nun in der Maschine gespeicherte zusätzliche Wärmeenergie ist für die weitere Arbeit der Maschine unbrauchbar, da sich das System jetzt zwar auf höherem Energieniveau befindet, jedoch thermisches Gleichgewicht aufweist, sodass der Start eines weiteren Arbeitszyklus nur durch neuerliche Zuführung von Wärmeenergie ausgelöst werden könnte.

Naturwissenschaft und Technik ersannen Mittel und Wege zur präzisen Quantifizierung dieses unvermeidlichen Energieverlustes durch innere Arbeit der Maschine an sich selbst und konnten so schließlich eine genaue **Energiebilanz** von Wärmekraftmaschinen als Basis der Optimierung des in ihnen ablaufenden Prozesses erstellen. Wichtigste Voraussetzung für eine solche Bilanzierung war die Entwicklung eines schematischen Modells jenes Prozesses. Es wurde bereits im Jahr 1824 vom französischen Physiker Nicolas Léonard Sadi Carnot publiziert, weshalb man seither vom **Carnot-Zyklus** (oder auch: Carnot-Prozess) spricht. Dieser Carnot-Zyklus beschreibt das in der Wärmekraftmaschine ablaufende Geschehen als einen in **vier Etappen** gegliederten Kreisprozess, in dessen Verlauf ein Gas abwechseln mit einem Wärmereservoir von konstant hoher Temperatur (zur Aufnahme von Wärme) und einem Kältereservoir mit konstant niedrigerer Temperatur (zur Kühlung durch Abgabe von Wärme) in Kontakt steht, wobei es wechselweise durch Aufbringen mechanischer Arbeit verdichtet wird und unter Abgabe von mechanischer Arbeit wieder expandiert.

Carnot erkannte in der Funktion der Wärme bei diesem Prozess eine Analogie zur Rolle des strömenden Wassers beim Betrieb von Wasserrädern. Aus seiner Sicht vergrößerte sich daher die Arbeitsfähigkeit der in die Maschine eingebrachten Wärme mit der Höhe des **Gefälles** zwischen der Eingangstemperatur, bei der man sie dem Arbeitsgas zuleitete und der Ausgangstemperatur, bei der man sich ihrer im Zuge der Kühlung entledigte. Die präzise mathematische Formulierung dieses Zusammenhangs zwischen der Arbeitsfähigkeit der eingesetzten Wärmeenergie und dem Verhältnis zwischen Eingangs- und Ausgangstemperatur gelang dann aber erst dem deutschen Physiker Rudolf Julius Emanuel Clausius im Jahr 1865 durch Bildung der Variable '**Entropie**' mit der Kurzbezeichnung 'S'.

Die genannte Variable sollte dem Umstand Rechnung tragen, dass im zyklischen Wärmekraftprozess nur ein Teil der dem Arbeitsgas zugeführten Wärmeenergie in externe Arbeit umgesetzt werden kann. Fließt doch die übrige Energie, wie das vorangehende Gedankenexperiment zeigte, in die innere Arbeit des Systems an sich selbst und erhöht dabei dessen Energiegehalt. Diese sich so im System ansammelnde Wärmeenergie hat ihre Brauchbarkeit für die Leistung externer Arbeit verloren und ist daher für Clausius so etwas wie **verwandelte Energie**. Während Clausius die von der Maschine geleistete externe Arbeit als das "*äußere Werk*" bezeichnet, ist für ihn die im Verlauf jedes Zyklus vom System an sich selbst geleistete Arbeit das "*innere Werk*". Die dabei in inneres Werk verwandelte Wärmeenergie bezeichnet er als den "*Werkinhalt*". Die Entropie schließlich ist der Messwert für den Umfang der kontinuierlich stattfindenden Verwandlung von zugeführter Wärmeenergie in unerwünschte Zusatzwärme der Maschine. Für Clausius repräsentiert jener Messwert den "*Verwandlungsinhalt*" des Arbeitsgases¹⁰. Womit nun auch das dem Griechischen entlehnte Wort 'Entropie' seine Erklärung findet. Denn es bedeutet auf Deutsch nichts anderes als 'Wandlungsgehalt'.

Bei der Kontrolle der unerwünschten Energieverwandlung geht es um das Konstanthalten der Betriebstemperatur der Maschine. Clausius konstruiert daher seine das Ausmaß jener

¹⁰ Vgl. (15), § 14

Verwandlung anzeigende Variable S als eine Beziehung zwischen der Menge Q der jeweils zu- oder abgeführten Wärme und der jeweiligen Temperatur T , bei welcher der Wärmeübergang stattfindet. Er bestimmt diese Beziehung als den Quotienten Q/T und definiert also: Entropie = $S = Q/T$, wobei man das Q in der für alle Energieformen gebräuchlichen Maßeinheit Joule misst, während T für die ausgehend vom absoluten Nullpunkt ($-273,15$ C) anzugebende absolute Temperatur steht. Die Größe der Entropie wird daher in Joule pro Kelvin Grad (J/K) gemessen.¹¹ Die tiefere Bedeutung des Quotienten Q/T werde ich erst im anschließenden Abschnitt 2.b erläutern. Hier müssen wir uns nur folgendes klar machen: Wird dem System eine kleine Menge Wärme ΔQ zugeführt, so erhöht sich der Wert der Variable S um ein vergleichbar kleines Ausmaß $\Delta S = \Delta Q/T$, wird eine kleine Menge Wärme durch Arbeit oder Kühlung abgeführt, verringert er sich entsprechend. Wenn die Betriebstemperatur der Maschine am Ende eines Arbeitszyklus wieder dieselbe wie zu dessen Beginn sein soll, dann müssen einander alle im Verlauf des betreffenden Arbeitsdurchgangs stattfindenden Zuwächse und Verringerungen von S **kompensieren**, sodass der Anfangswert von S am Beginn des Zyklus wieder erreicht wird.

Im Verlauf eines Arbeitszyklus wird der Dampfmaschine zunächst eine Wärmemenge Q_1 bei **hoher** Betriebstemperatur T_H zugeführt. Anschließend sinkt die Betriebstemperatur, weil das System nun einen Teil seiner Wärmeenergie in Form von externer Arbeitsleistung W abgibt. Die Abfuhr der Wärmemenge Q_2 im Zuge der abschließenden Kühlung geschieht daher bei einer wesentlich **niedrigeren** Temperatur T_N . Clausius erkannte, dass die Variable S in einer ohne reibungsbedingte Wärmeverluste arbeitenden idealen Wärmekraftmaschine, wie sie der Carnot-Prozess modelliert, bei der Wärmezufuhr den **gleichen Wert** annimmt wie bei dem im Zuge der Kühlung stattfindenden Wärmeaustritt. Für eine solche Idealmaschine gilt somit:

$$S_H = Q_1/T_H = Q_2/T_N = S_N.$$

Warum dies so sein muss, ist am einfachsten zu verstehen vor dem Hintergrund einer zentralen Einsicht der erst in Kapitel 3 näher zu erörternden kinetischen Gastheorie. Sie besagt, dass die Temperatur eines Fluids der mittleren kinetischen Energie pro Teilchen entspricht, während der Gesamtgehalt an kinetischer Energie gleich ist dem Produkt aus dieser mittleren Energie pro Teilchen mal der Teilchenzahl N . Wenn sich somit die der Temperatur entsprechende mittlere Energie der Teilchen eines Gases von seinem Gesamtgehalt an kinetischer Energie bloß durch den Faktor N unterscheidet, dann muss diese **mittlere** kinetische Energie des Arbeitsgases (bei gleichbleibender Anzahl seiner Teilchen) im Zuge der externen Arbeitsleistung der Maschine im selben Maße sinken wie die **Gesamtmenge** seiner kinetischen Energie. Das bedeutet, dass sich T_N zu T_H genau so verhält wie Q_2 zu Q_1 . Und das wieder heißt, dass $Q_1/T_H = Q_2/T_N$

Praktisch bedeutet diese Gleichheit der Werte von S_H und S_N ,

- dass prinzipiell eine große Menge an bei hoher Betriebstemperatur zugeführter Wärme durch eine kleinere Menge an abzuführender Wärme kompensiert werden kann,

¹¹ Vgl. (113)

- und dass dieser Unterschied umso größer sein wird, je stärker die Betriebstemperatur T gesenkt wird durch die zwischen der Wärmezufuhr- und Abfuhr stattfindende externe Arbeit. Ist nämlich T_N viel niedriger als T_H , dann wird das Q_2/T_N auch bei einem sehr kleinen Wert von Q_2 gleich groß sein wie das Q_1/T_H .

Auf Basis der eben erläuterten Gleichheit von S_H und S_N bei der reibungslosen Wärmekraftmaschine konnte man nun mit mathematischer Präzision berechnen, wie der Wirkungsgrad einer solchen Maschine mit dem Verhältnis der beiden Temperaturniveaus zusammenhängt, zwischen denen sie arbeitet. Auch dieser Argumentationsschritt ist wieder einfach nachvollziehbar:

- Die maximal leistbare Nutzarbeit W ist in der reibungslos arbeitenden Maschine so groß wie die Differenz zwischen zu- und abgeführter Wärmeenergie ($W = Q_1 - Q_2$).
- Da in diesem Fall S_H gleich S_N ist, kann man aus der Gleichung $Q_1/T_H = Q_2/T_N$ die Größe der abzuführenden Wärmemenge Q_2 ermitteln:

$$Q_2 = Q_1 \cdot (T_N/T_H).$$
- Daraus ergibt sich für die maximal leistbare Nutzarbeit W :

$$W = Q_1 - Q_2 = Q_1 - Q_1 \cdot (T_N/T_H) = Q_1 \cdot (1 - (T_N/T_H)).$$
- Für den Wirkungsgrad dieser Maschine ($\eta = W/Q_1$) gilt somit:

$$\eta = 1 - (T_N/T_H)$$

Bei allen realen Maschinen muss der **Wirkungsgrad** unter diesem Maximalwert liegen, da hier jeweils noch mehr oder weniger große Reibungsverluste in Rechnung zu stellen sind. Er wird aber, genau entsprechend der Vermutung Carnots umso höher sein, je größer die Differenz zwischen Eingangs- und Ausgangstemperatur der Wärme ist, da der Quotient (T_N/T_H) mit dem Anwachsen dieser Differenz immer kleiner wird. Praktisch bedeutet dies, dass eine Wärmekraftmaschine umso wirkungsvoller arbeitet, je höher die Eingangstemperatur der zugeführten Wärme ist. Im Hinblick auf den **Grad der Umwandlung** einer gegebenen Menge an Wärmeenergie in die den Wirkungsgrad beschränkende **innere** Arbeit der Maschine an sich selbst konnte Clausius also mittels der neu gebildeten Variable 'Entropie' zeigen, dass dieses Ausmaß an Umwandlung der zugeführten Wärmeenergie umso kleiner wird, je höher die Temperatur ist, bei der sie in die Maschine eintritt.

b) Entropie als Ding

So gute Dienste die von Clausius neu gebildete Variable 'Entropie' auch für die mathematische Präzisierung des Wirkungsgrades von Wärmekraftmaschinen leistete, so groß war doch die Schwierigkeit, ihr eine **anschauliche Bedeutung** zuzuordnen. Die eigentliche Ursache für dieses Problem wird erst klar bei Betrachtung des Stellenwerts der Entropie im Gesamtgeflecht aller Variablen, die für die Analyse des Carnot-Prozesses von Relevanz sind.

Die genannten Variablen untergliedern sich in **zwei Hauptgruppen**. Die **erste** Hauptgruppe umfasst die sogenannten **Zustandsgrößen**. Sie beschreiben den jeweiligen Zustand des Arbeitsgases in einem bestimmten Moment des Kreisprozesses, wobei es keine Rolle spielt, auf welchem Weg es zur fraglichen Beschaffenheit kam. Wichtige Beispiele

dafür sind der Druck des Gases (p), sein Volumen (V), seine Temperatur (T) und seine innere Energie (U). Die **zweite** Hauptgruppe der Variablen beschreibt die Vorgänge, die zu Änderungen im Zustand des Arbeitsgases führen. Man nennt die betreffenden Variablen **Prozessgrößen**. Es handelt es sich dabei um die beiden bereits oben im Kontext der Definition des Wirkungsgrads erwähnten Größen, also um die vom System verrichtete Arbeit (W) und die zu- oder abfließende Wärme (Q). Die Prozessgrößen charakterisieren den jeweiligen Prozessschritt zwischen zwei Zuständen des Systems. Sie beziehen sich somit nicht auf Eigenschaften des Systems, sondern beschreiben eine **Interaktion** zwischen zwei Systemen bzw. zwischen einem System und seiner Umgebung.

Um den Zustand der Maschine an jedem beliebigen Punkt ihres Prozessierens umfassend beschreiben zu können, bildet man sogenannte **Zustandsgleichungen**. Dabei nimmt jeweils eine der Zustandsgrößen die Position einer Zustandsfunktion ein, während die anderen, von ihr abhängigen Zustandsgrößen als Zustandsvariablen auftreten. Neben diesen Wechselbeziehungen zwischen den verschiedenen Zustandsgrößen des Carnot-Prozesses gilt es aber auch, die jeweiligen **Bezüge zwischen den Zustands- und Prozessgrößen** im Auge zu behalten. Für die Prozessgröße 'Arbeit' (W) spielt etwa der folgender Zusammenhang mit den Zustandsgrößen V (Volumen) und p (Druck) eine wichtige Rolle: Bei gegebenem Druck p entspricht der Betrag der von bzw. an einem Gas verrichteten Arbeit dW seiner Volumenänderung dV . Es gilt also: $dW = p \cdot dV$. Daraus geht hervor, dass bei gegebenem Druck die Fähigkeit der Maschine, Arbeit umzusetzen, vom Volumen des Arbeitsgases abhängt.

Bei der Kühlung der Dampfmaschine geht es aber nicht um den Arbeitsumsatz dW und seinen Zusammenhang mit einem gegebenen Druck p , sondern um den Wärmeumsatz dQ und seinen Effekt für die über den Zyklus hinweg konstant zu haltende Temperatur T des Systems. Es galt daher eine Zustandsvariable zu finden, welche im Verhältnis zwischen dQ und T genau jene Vermittlungsfunktion übernimmt, welche dV zwischen dW und p spielt. Das Problem bestand darin, dass es keine direkt beobachtbare Zustandsgröße gibt, welche diese Rolle spielen kann. In dieser Situation schuf Clausius mit 'Entropie' eine gleichsam 'künstliche' Variable¹², welche die genannte Vermittlungsfunktion übernimmt. Sie hat keine unmittelbare Entsprechung in der Beobachtung, sondern ist **rein mathematisch als Quotient** der beiden zu vermittelnden Größen dQ und T definiert: $dS = dQ/T$. Dieses Vorgehen ist möglich, weil man für zwei beliebige Variablen A und B die tautologische Gleichung $A = (A/B) \cdot B$ bilden kann, aus der dann die Definition einer neuen Vermittlungsvariablen ($V = A/B$) folgt, die A mit B verknüpft. In diesem Sinne wird bei der Definition der Variable 'Entropie' zunächst aus den Variablen Q und T die tautologische Gleichung $Q = (Q/T) \cdot T$ gebildet und dann aus dieser Tautologie die Vermittlungsvariable $S = Q/T$ 'destilliert'.

Die Schwierigkeiten mit der Größe 'Entropie' resultieren somit daraus, dass sie im Gegensatz zu den übrigen Zustandsvariablen nicht auf einer allen physikalischen Untersuchungen immer schon vorausgehenden **qualitativen Anschauung** fußt, sondern bloß eine funktionale Leerstelle im Rechenmodell des Carnot-Prozesses füllt. Bei jeder anderen Zu-

¹² Vgl. zum Vorangehenden und Folgenden (92)

standsgröße geht die qualitative Anschauung ihrer Quantifizierung durch eine im Rahmen des theoretischen Modells definierte Variable voran und verleiht dieser Quantifizierung anschaulichen Sinn. Im vorliegenden Fall musste der umgekehrte Weg beschritten werden. Den Ausgangspunkt bildete hier die im Rahmen des Carnot-Modells als Quotient Q/T definierte Variable, welche dann in weiterer Folge die systematische Beobachtung und technische Kontrolle der Entwicklung jenes Quotienten ermöglicht. Die Beobachtung der Entwicklung eines Quotienten zweier theoretisch definierter Variablen kann aber niemals die Sinnstiftungsleistung der den übrigen Zustandsvariablen zugrunde liegenden qualitativen Anschauung ersetzen und so ist das Verständnis Variable Entropie immer schon durch ein prinzipiell nicht zu beseitigendes **Anschauungsdefizit** beeinträchtigt.

Der vorliegende Text will nun darauf hinweisen, dass **zusätzliche** Verständnisprobleme entstehen, die den ohnehin schwierigen Zugang zu dieser Größe weiter erschweren, wenn man die erwähnte Anschauungslücke durch unpassende Bilder füllt, die dem objektivistischen Zugang der Physiker zu ihrem Gegenstandsbereich geschuldet sind. Schon in Kapitel 1 wurde aufgezeigt, wie bedenklich es ist, wenn man aus der Energie, als einem Vermögen zur Interaktion, ein bloßes Ding macht, das aufgenommen und weitergegeben werden kann. Noch um Vieles problematischer ist das analoge Vorgehen im Falle der Entropie. Denn hier handelt es sich ja im Gegensatz zur Energie nicht um eine Prozessgröße, bei der die Bilder des Aufnehmens und Abgebens zwar sinnreduzierend aber nicht gänzlich falsch sind. Vielmehr geht es hier um eine Zustandsgröße, die als Quotient zweier Variablen definiert ist. Und die Auffassung einer solchen **Relation als ein Ding** muss das Denken fast zwangsläufig in Vorstellungswelten führen, die eher Probleme schaffen, als solche zu lösen.

Die erste falsche Spur zur Verdinglichung besagter Relation legt bereits Clausius selbst, wenn er die Entropie, wie oben erwähnt, als 'Verwandlungsinhalt' des jeweiligen Fluids bezeichnete. Mit dieser terminologischen Entscheidung machte er aus dem, was bloß Relation ist, ganz bewusst und gezielt einen **Inhalt** und damit ein dingliches Gegenstück zu der bereits im gedanklichen Vorfeld verdinglichten inneren Energie U des Fluids.¹³ Damit scheint seit Clausius klar zu sein, dass Entropie etwas ist, das gemeinsam mit der Wärme **aufgenommen** bzw. **abgegeben** wird.¹⁴ Tatsächlich aber ist das bei den diesbezüglichen Vorgängen in keiner Weise der Fall. Alle hier stattfindenden Veränderungen betreffen ausschließlich die durch die Entropie gemessene Relation zwischen der im Spiel befindlichen Wärmemenge und der jeweiligen Systemtemperatur. Wird Wärme abgegeben, sinkt der Wert des betreffenden Quotienten, wird Wärme aufgenommen, steigt er an.

Diese von Clausius in die Welt gesetzte Dinglichkeit haftet nicht nur der Entropie selbst an, sondern strahlt auch auf die mit ihr verknüpfte Wärmeenergie zurück. Die ist zwar auch unabhängig von der Entropie schon ein Pseudodding. Durch die enge Beziehung zur

13 "Sucht man für S einen bezeichnenden Namen, so könnte man, ähnlich wie von der Größe U gesagt ist, sie sei der **Wärme- und Werkinhalt** des Körpers, von der Größe S sagen, sie sei der **Verwandlungsinhalt** des Körpers." (15), § 14; Hervorhebungen durch R. Clausius

14 Am hemmungslosesten geben sich die Physiker ihrem Verdinglichungsdrang hin, wenn sie sich bei einem Laienpublikum verständlich machen wollen. Dann wird die der Wärmekraftmaschine zugeführte Wärme schnell einmal zu einer Menge großer roter Kugeln, während die Entropie in Gestalt einer Menge kleiner blauer Kugeln in die Maschine einströmt. Vgl. (84)

Entropie tritt nun aber ihr dinglicher Charakter verstärkt hervor. Indem nämlich die Entropie nicht bloß irgendein Inhalt des Fluids ist, sondern **Verwandlungsinhalt**, hat sie die Fähigkeit, das mit ihr verbundene Energie-Ding zu verwandeln. Sie macht einen Teil von ihm zu sogenannter **Anergie**, welche für weitere Arbeitsleistungen unbrauchbar ist. Zugleich damit wird aus der übrigen Energie die arbeitsfähige **Exergie**. Im Endergebnis besteht dann das Energieding genau wie jedes ordentliche andere Ding aus unterschiedlichen Bestandteilen.

Der vermeintlich in Anergie verwandelte Teil der Energie ist jene Energie, die im System als Resultat seiner inneren Arbeit an sich selbst in Gestalt von erhöhter Betriebstemperatur gespeichert bleibt. Tatsächlich hat sich der betreffende Teil der inneren Energie des Systems natürlich in keiner Weise gewandelt. Energie bleibt Energie. Was sich geändert hat, ist bloß ihr **funktionaler Stellenwert** bezüglich des betreffenden Systems: Letzteres kann nun mit ihm keine externe Arbeit mehr leisten. Das Arbeitspotential jener in Anergie 'verwandelten' Energie ist davon aber in keiner Weise betroffen und wäre, wenn es anderen Systemen zugeleitet würde, jederzeit wieder aktivierbar.

Nun aber wieder zurück zur Entropie, der durch ihre Verdinglichung noch weitere wundersame Eigenschaften zuwachsen. Diese verwandeln sie in eine höchst mysteriöse Wesenheit, und das wieder hat für den mit der Entropie befassten Physiker eine nicht ganz unerwünschte Nebenfolge: Es verleiht ihm, als dem mit den Geheimnissen jenes übernatürlichen Wesens vertrauten Experten, in den Augen des staunenden Laienpublikums etwas vom Glanz eines Magiers.

Die Eigenschaften, welche den eigentlichen Zauber des Dings 'Entropie' ausmachen, konstituieren sich vor dem Hintergrund eines nun ins Zentrum unserer Aufmerksamkeit zu rückenden Aspekts des Carnot-Prozesses. Letzterer ist, wie erwähnt, ein bloßes Idealmodell des Geschehens in der Wärmekraftmaschine, das von allen möglichen Reibungsprozessen absieht. Besagte Idealisierung impliziert die bisher noch nicht explizit erwähnte Unterstellung, dass abgesehen vom Zu- und Abfluss von Wärme sämtliche in der Maschine stattfindenden Prozesse auf '**reversible**', d.h. umkehrbare Weise ablaufen. Das bedeutet, dass sie im Unterschied zu '**irreversiblen**', also unumkehrbaren Prozessen extrem langsam voranschreiten und mit minimalen Kraftwirkungen verbunden sind. Es ist klar, dass alles reale Geschehen auf der Erde, insbesondere das von der Thermodynamik untersuchte Verhalten von Gasen und Flüssigkeiten, von diesem Idealmodell eines Vorgangs abweicht. Die einschlägigen Realprozesse sind also durchwegs unumkehrbar, bzw. bestenfalls annähernd umkehrbar. Und weil das so ist, hat man es beispielsweise außer bei der Besichtigung eines rückwärts abgespulten Films noch nie erlebt, dass jemand das aus einem Glas verschüttete Wasser auf demselben Weg, auf dem es das Glas verließ, wieder ins Glas zurückbefördern konnte.

Dass die Gesetze der klassischen Mechanik nur reversible Idealvorgänge anvisieren, bei denen immer bloß einige wenige, in all ihren Wechselwirkungen und Bewegungen gut erfassbare Körper beteiligt sind, wurde für die Physiker erst im Gefolge ihrer Beschäftigung mit den Problemen der Thermodynamik zu einem Thema. Denn erst jetzt hatte man es mit Problemstellungen zu tun, die sich auf eine unübersehbar große Anzahl kleinster

Partikel beziehen, welche im Detail völlig unkontrollierbaren Wechselwirkungen unterliegen und entsprechend unbeherrschbare Bewegungen ausführen. Die Vorstellung eines reversiblen Prozesses setzt demgegenüber eine zumindest prinzipiell gegebene technische Beherrschbarkeit all seiner Komponenten voraus und wurde daher unter diesen neuen Bedingungen zum praktisch irrelevanten Idealbild eines absoluten Grenzfalles.

Wichtige Beispiele für die nun ins Zentrum der Aufmerksamkeit rückenden irreversiblen Zustandsänderungen sind

- der infolge eines Temperaturunterschiedes einsetzende **Wärmefluss** in oder zwischen Körpern, Flüssigkeiten bzw. Gasen,
- die beim Ausgleich von Partialdruckunterschieden stattfindende **Durchmischung** von Gasen oder Flüssigkeiten,
- die bei der Reibung auftretende **Umwandlung** von Bewegungsenergie in Wärme.

Da Prozesse dieser Art letztlich bei allen auf Erden stattfindenden Naturvorgängen im Spiel sind, kam die Physik durch ihre Beschäftigung mit thermodynamischen Problemen einen Schritt näher an die Alltagsrealität heran als in der von astronomischen Themenstellungen bestimmten Anfangsphase der klassischen Mechanik. Im Hinblick auf die Entropie erhob sich dabei sofort die Frage, ob sich diese Variable bei irreversiblen Realprozessen anders entwickelt als bei deren reversibler Idealisierung. Man ging bei den diesbezüglichen Überlegungen von einem thermisch isolierten System aus, das sich **im thermischen Gleichgewicht** befindet. Das bedeutet, dass es hier weder einen externen Zustrom von Wärme gibt noch interne Druck- und Temperaturdifferenzen mit den daraus resultierenden inneren Flüssen von Materie und Wärmeenergie. Mangels strömender Wärme kann sich unter diesen Bedingungen die als Quotient von zufließender Wärme und Temperatur definierte Entropie nicht verändern. Hier gilt also $dS = 0$. Bei allen **reversibel** ablaufenden Vorgängen innerhalb solch eines Systems bleibt die Entropie **ebenfalls unverändert**, weil diese Prozesse idealerweise so 'sanft' ablaufen, dass das System nur '**quasistatische**' Zustandsänderungen erfährt, durch die es von einem Gleichgewichtszustand in den nächsten Gleichgewichtszustand 'gleitet'.

Ganz anders bei **irreversiblen** Prozessen. Damit solche in einem thermisch isolierten System stattfinden können, müssen innere Temperaturunterschiede vorhanden sein, die zu Wärme- und Materieflüssen zwischen unterschiedlichen Teilbereichen des Systems führen. Dabei ändern sich die Entropiequotienten all dieser Teilsysteme, wobei die Entropie dort, wo Wärme abfließt, sinkt, während sie dort, wo Wärme zufließt, ansteigt. Der springende Punkt ist nun der, dass bei jedem dieser internen Wärme Flüsse der Entropierückgang im **wärmeabgebenden** Teilsystem **schwächer** ist, als der Entropieanstieg im wärmeaufnehmenden Teilsystem. Denn im ersten der beiden herrschte ja beim Einsetzen des Wärmestroms höhere Temperatur als im zweiten. Der Quotient Q/T ist daher beim wärmeabgebenden Teilsystem stets geringer als beim wärmeaufnehmenden Teilsystem. Mit jedem der internen Wärme Flüsse steigt auch die Entropie des Gesamtsystems an, wobei dieser Prozess erst zum Stillstand kommt, wenn alle inneren Temperaturunterschiede ausgeglichen sind. Das Gesamtsystem befindet sich dann in thermischem Gleichgewicht

und seine Entropie hat ihren Maximalwert erreicht. Für irreversible Prozesse in thermisch isolierten Systemen gilt somit ganz allgemein: $dS > 0$.

All diese weder sehr aufregenden noch geheimnisvollen Sachverhalte werden ordentlich aufgepeppt, sobald man die Entropie nicht als einen simplen Quotienten betrachtet, sondern als ein Ding auffasst. Jetzt kann man nämlich an dem Ding 'Entropie' **zwei Sorten** unterscheiden. Die beim Wärmefluss zwischen zwei Systemen von dem einen 'abgegebene' und von dem anderen 'aufgenommene' Entropie ist die '**transportierte**' Entropie. Während man jene Entropie, welche innerhalb thermisch isolierter Systeme beim Ablauf von internen irreversiblen Prozessen entsteht, als '**produzierte**' Entropie bezeichnet. Damit ist nun der dingliche Charakter der Entropie mit einem Schlag dreifach gefestigt. Erstens gehört es sich für jedes Ding, das etwas auf sich hält, in mehreren Sorten vorzukommen. Zweitens ist alles, was man transportieren kann, mit Sicherheit ein Ding. Und drittens muss selbstverständlich auch das, was produziert wurde, ein Ding sein. In weiterer Folge erweist sich dann jene produzierte Entropie als besonders ergiebig für die Erzeugung von Mythen. Denn bei ihr zeigt sich eine wichtige Differenz zwischen den beiden Größen 'Energie' und 'Entropie', welche die Physiker bei ihrer Entdeckung aufs Höchste überraschte, weil sie nicht in ihr objektivistisches Weltverständnis hineinpasste.

Der Objektivismus fußt nämlich auf einer sehr naiven Übertragung von unreflektierten Grundannahmen unseres Alltagsbewusstseins in die Wissenschaft. Er nimmt daher genau wie dieses Alltagsbewusstsein seinen Gegenstand prinzipiell als etwas immer schon Existierendes wahr, das höchstens seinen Ort im Raum und seine äußere Gestalt verändert. Selbst die Kosmologie nimmt ihren Ausgang nicht vom Nichts, sondern von der am Beginn des Urknalls stehenden Singularität, die sie als einen Punkt mit unendlich hoher Materie- und Energiedichte auffasst. Die **Erhaltungsgröße** Energie, die immer schon irgendwo bzw. irgendwie da war und nie ins Nichts verschwindet, ist daher der Lieblingsgegenstand aller Objektivisten. Passt sie doch so gut zu ihrer obersten Ausgangshypothese, dass da etwas **vorhanden** ist, was die Wissenschaft nun in seinen vielfältigen Differenzierungen und Veränderungen analysieren muss. Die als Ding aufgefasste 'produzierte' Entropie ist demgegenüber eine einzige Herausforderung für diese Weltsicht. Da sie im Gegensatz zur Energie in einem thermisch isolierten System keinen fix gegebenen Wert besitzt, sondern im Verlauf von irreversiblen Prozessen immer weiter anwächst, ist sie **keine Erhaltungsgröße**. Und da dieses Anwachsen weder Resultat eines von außen kommenden Zustroms von Entropie noch einer inneren Verwandlung irgendeines anderen Systembestandteils ist, hat man es bei der Entropie peinlicherweise mit einem Ding zu tun, das "*aus dem Nichts*"¹⁵ entsteht.

Dieser Skandal ist allerdings selbstverschuldet. Man könnte ihn nämlich sofort beenden, wenn man die Entropie nur als das nähme, was sie ist - ein Quotient zweier Variabler. Die Situation wäre dann im Hinblick auf das Problem der Entstehung von Etwas aus dem Nichts ähnlich wie etwa bei der Beschleunigung. Dieser Quotient aus der Geschwindigkeit und der Zeit wächst beim Beginn jeder Bewegung ausgehend von Null an, und kein Mensch wundert sich dabei, dass hier etwas aus dem Nichts entsteht. Der Grund dafür

15 Vgl. etwa (85): "*Entropie kann im Falle von irreversiblen Prozessen aus dem Nichts heraus entstehen.*"

liegt darin, dass die Physik Bewegungen nicht nach dem Muster der Veränderung (bzw. des Entstehens und Vergehens) eines Dings denkt, sondern nach dem Vorbild einer **Handlung**. Und Handlungen setzen immer irgendwann ein, um dann auch wieder irgendwann wieder zu enden. Man kann besagten Skandal aber nicht auflösen, weil man beschlossen hat, dass die Energie ein Ding ist. Und wegen ihrer engen Verwandtschaft mit der Energie muss wohl auch die Entropie ein Ding bleiben.

ENDE DER LESEPROBE