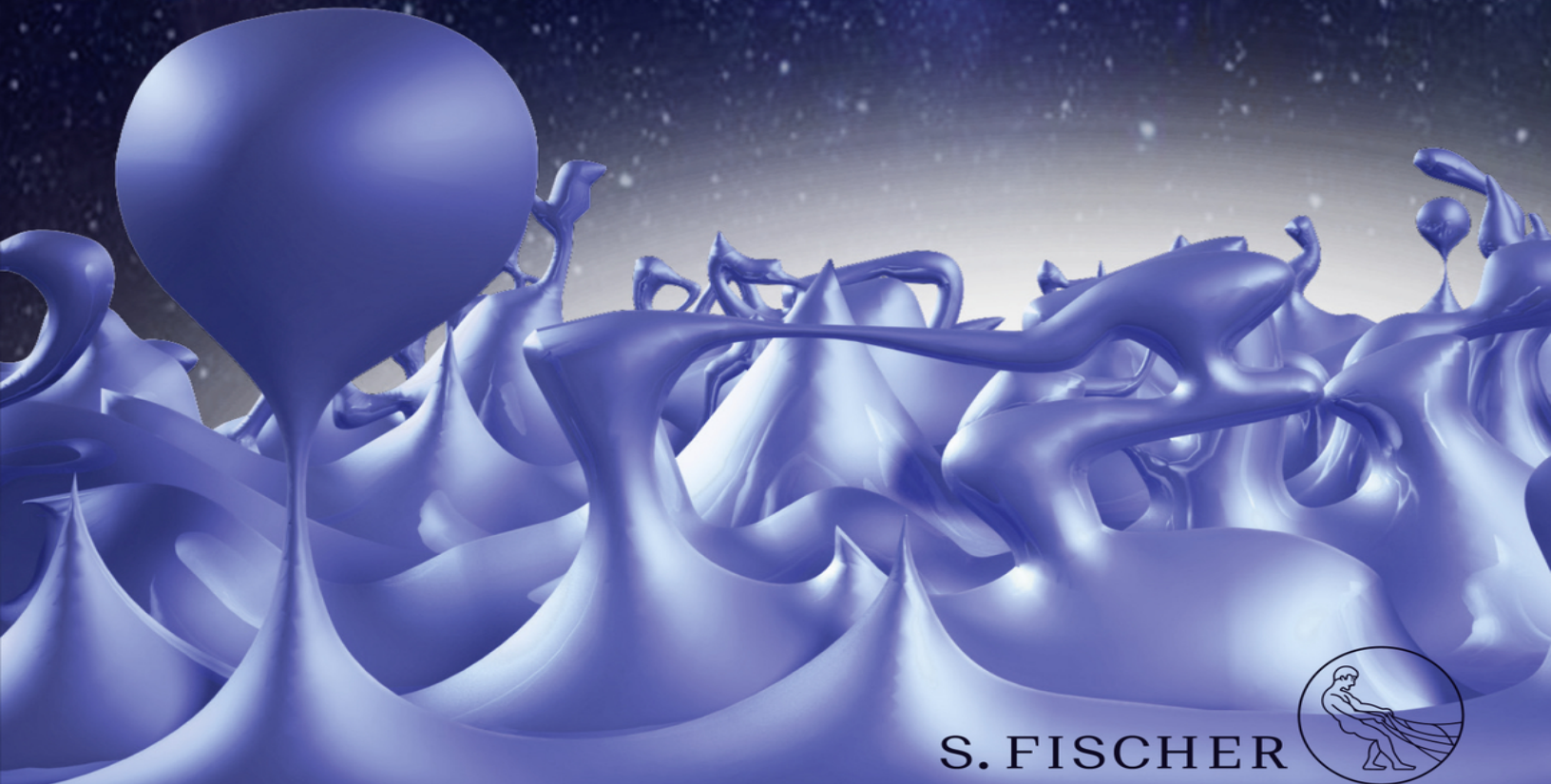


Josef M. Gaßner / Jörn Müller

# KOSMOLOGIE

Die größte Geschichte  
aller Zeiten



S. FISCHER



**Josef M. Gaßner | Jörn Müller**

# **Kosmologie**

Die größte Geschichte aller Zeiten

⊗ | E-BOOKS

## Über dieses Buch

Was hat den Urknall ausgelöst und was war davor? Gibt es räumliche und zeitliche Grenzen? Ist Leben ein ewiges Erfolgsmodell oder wird es enden?

Diesen und vielen weiteren Fragen gehen der Astrophysiker und Kosmologe Josef M. Gaßner und der Experimentalphysiker Jörn Müller in gewohnt anschaulicher Weise auf den Grund. Es geht um das Informationsparadoxon Schwarzer Löcher, die Hawkingstrahlung oder auch die Rindler-Raumzeit. Sie berichten von unendlich heißen Objekten, die groß sind wie ein Planet und dennoch den Gesetzen des Allerkleinsten – der Quantenmechanik – gehorchen. Sie erzählen von Dunkler Materie, Dunkler Energie, negativem Druck, entropischer Gravitation und vielem mehr.

Wer sich auf dieses Buch einlässt, wird unsere Welt und die eigene Existenz mit völlig neuen Augen betrachten!

Weitere Informationen finden Sie auf [www.fischerverlage.de](http://www.fischerverlage.de)

## Biografie

*Josef M. Gaßner* ist Grundlagenforscher, Betreiber des wissenschaftlichen YouTube-Kanals »Urknall, Weltall und das Leben« und Lehrbeauftragter für Naturwissenschaft, Astronomie und Kosmologie an der Hochschule für angewandte Wissenschaft in Landshut. Gemeinsam mit Harald Lesch schrieb er 2012 den großen Erfolg »Urknall, Weltall und das Leben«. Das vorliegende Buch basiert, ebenso wie das 2019 bei S. Fischer erschienene »Können wir die Welt verstehen?«, auf einer Vorlesungsreihe, die bei YouTube bereits mehrere Millionen Aufrufe verzeichnet.

*Jörn Müller* ist Physiker und hat am Deutschen Elektronensynchrotron »DESY« promoviert. Er arbeitete im Bereich Optik und Elektrofotografie sowie an der Entwicklung von Hochenergielasern.

# Inhalt

## Prolog

### 1. Thermodynamik

#### 1.1 Wärmelehre

#### 1.2 Erster Hauptsatz der Thermodynamik

#### 1.3 Statistische Thermodynamik – Mikrozustände

#### 1.4 Boltzmann-Faktor

#### 1.5 Negative absolute Temperatur

#### 1.6 Unruh-Effekt, Hawking-Strahlung, Rindler-Raumzeit

#### 1.7 Entropie, Informationsdefizit, Informationsparadoxon Schwarzer Löcher

#### 1.8 Der Maxwellsche Dämon – Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik

### 2. Urknall und Expansion

#### 2.1 Das Universum expandiert

2.2 Die erste Friedmann-Gleichung

2.3 Verschiedene Epochen des Universums

2.4 Zweite Friedmann-Gleichung – Welche Kraft übt die Expansion aus?

2.5 Friedmann-Gleichung ohne Singularität – Steady State

2.6 Schleifenquantentheorie und Lichtermüdung

2.7 Das Horizontproblem

2.8 Das Flachheitsproblem

2.9 Magnetische Monopole

2.10 Kosmische Inflation – der Knall des Urknalls

2.11 Ewige Inflation

**3. Das Holographische Prinzip**

3.1 Bekenstein-Limit

3.2 Entropische Gravitation

**4. Dunkle Materie**

**5. Entfernungen und Horizonte**

**6. Antimaterie und Baryogenese**

## **7. Primordiale Nukleosynthese**

### **7.1 Entstehung der leichten Elemente**

### **7.2 Beobachtungsdaten zu den einzelnen Häufigkeiten**

#### **7.2.1 Deuterium**

#### **7.2.2 Tritium**

#### **7.2.3 Helium-3**

#### **7.2.4 Helium-4**

#### **7.2.5 Lithium**

### **7.3 Fazit**

## **8. Zeitlicher Überblick**

## **9. Analyse der Kosmischen Hintergrundstrahlung**

### **9.1 Baryonische akustische Oszillation**

### **9.2 Das Leistungsspektrum der Kosmischen Hintergrundstrahlung**

### **9.3 Der Sachs-Wolfe-Effekt**

### **9.4 Baryonische akustische Oszillationen im Leistungsspektrum**

### **9.5 Die Silk-Dämpfung**

9.6 Analyse des Leistungsspektrums

9.7 Himmelsdurchmusterungen – SDSS (Sloan Digital Sky Survey)

## **10. Sterne**

10.1 Spektralanalyse und Klassifikation

10.2 Das Hertzsprung-Russell-Diagramm

10.3 Unser lokales Medium

10.4 Interstellares Medium und Sternentstehung

10.5 Stellare Nukleosynthese

10.5.1 Die Proton-Proton-Reaktionskette

10.5.2 Der CNO-Prozess

10.5.3 Hydrostatisches Gleichgewicht – Hauptreihe

10.5.4 Rote Riesen, Weiße Zwerge, Planetare Nebel

10.5.5 Sterne von drei bis acht Sonnenmassen

10.5.6 Massereiche Sterne mit mehr als acht  
Sonnenmassen

10.6 Neutronensterne

10.7 Pulsare

10.8 Supernova Ia



10.9 Stellare Schwarze Löcher

10.10 Entstehung der Elemente schwerer als Eisen

10.11 Bedeckungsveränderliche

10.12 Überblick

## **11. Galaxien**

11.1 Elliptische Galaxien

11.2 Lentikuläre Galaxien

11.3 Spiral- oder Scheibengalaxien

11.4 Balkenspiralgalaxien

11.5 Irreguläre Galaxien

11.6 Galaxien-Merger

11.7 Aktive Galaktische Kerne (AGN)

11.8 Fazit

## **12. Anthropisches Prinzip**

**Dank**

**Bildnachweis**

**Register**

# Prolog

Das Universum ist kalt, finster und leer, und mit jedem Augenblick verstärkt es diese Eigenschaften noch. Auf den ersten Blick offenbart es sich auf unvorstellbar großen Skalen als ein Ort, der lebensfeindlicher kaum sein könnte.

Schaut man jedoch genauer hin, finden sich vereinzelte Inseln des Lichts im Ozean der Dunkelheit. In diesen sogenannten Galaxien haben sich bizarre Objekte zu einer illustren Gesellschaft zusammengefunden. Auch sie ist geprägt von Lebensfeindlichkeit: unzählige Plasmasterne mit extrem hohen Temperaturen, Pulsare mit absurd starken Magnetfeldern und die ewig hungrigen Schwarzen Löcher, die scheinbar nur danach trachten, alles zu vernichten, was sich in ihre Nähe wagt.

Weiter draußen – gewissermaßen in den Vororten der Galaxien – herrschen etwas gemäßigtere Bedingungen, die bedrohlichsten Objekte zeigen sich hier selten. Das ermöglicht in entlegenen Hinterhöfen die friedliche Existenz von Planetensystemen, die über Jahrmilliarden ungestört ihre Bahnen um ihren Heimatstern ziehen.

Auf dem dritten Felsenplaneten um einen dieser durchschnittlichen Sterne hat sich eine rätselhafte

Metamorphose vollzogen: die Selbstorganisation von toter Materie zu lebenden Organismen. Dieses Leben hat sich in seiner Nische, inmitten dieses scheinbar lebensfeindlichen Universums, stetig weiterentwickelt, vom ersten Schritt auf das Festland bis zum ersten Schritt auf dem Mond. Das Leben ist sich seiner selbst bewusst geworden und stellt Fragen: Woher kommen wir, und wohin gehen wir? Oder, etwas wissenschaftlicher ausgedrückt: Wie ist dieses Universum entstanden, und wie wird es enden? Ist es überhaupt endlich – gibt es eine zeitliche und räumliche Grenze? Wenn ja, was war davor, und was ist außerhalb? Können wir das Universum verstehen?

Viele Generationen einer besonders neugierigen Spezies aus der Gattung der Trockennasaffen tragen unermüdlich Mosaiksteine der Erkenntnis zu einem Weltbild zusammen. Sie beginnen das Universum zumindest ansatzweise zu begreifen. Die Ergebnisse sind faszinierend und verblüffend zugleich: Vier fundamentale Kräfte scheinen das Universum zu beherrschen: die Gravitation, der Elektromagnetismus, die Starke und die Schwache Kernkraft. Wechselwirkungen, die unterschiedlicher kaum sein könnten – die einen spielen sich innerhalb von Atomen ab, während die anderen unendlich weit ins Weltall hinausreichen. Außer in ihrer Reichweite unterscheiden sich die Kräfte auch in ihrer Stärke um viele Größenordnungen. Alle Objekte, von Atomkernen bis hin zu Galaxienhaufen, müssen ein Gleichgewicht zwischen diesen Kräften aushandeln. Viele Prozesse verändern dabei fortwährend die

Rahmenbedingungen, wodurch es sich zumeist um zeitlich befristete, labile Konstellationen handelt. Die Zeitskalen, auf denen sich diese Veränderungen abspielen, sind für uns Menschen kaum vorstellbar: Zerfälle in der Welt des Allerkleinsten spielen sich typischerweise in  $10^{-24}$  Sekunden ab, Sternenleben hingegen in Milliarden von Jahren. Dass wir angesichts dieser entmutigenden Voraussetzungen überhaupt in der Lage sind, ein schlüssiges Weltbild zu entwickeln, ist für mich persönlich eine der größten Errungenschaften unserer Spezies.

Unser Anliegen ist es, die Faszination dieser Erkenntnisse mit Ihnen zu teilen und gemeinsam zu feiern. Dabei werden wir auf die großen Theorien der Wissenschaft zurückgreifen, die wir detailliert bereits im 2019 erschienenen Buch *Können wir die Welt verstehen?* präsentiert haben. Wer es nicht gelesen hat, muss sich keine Sorgen machen. Das vorliegende Buch soll auch für Quereinsteiger verständlich sein und die notwendigen Grundlagen vermitteln. In gewohnter Manier werden wir dabei stets so weit wie möglich vereinfachen, jedoch nie weiter, als es wissenschaftlich korrekt wäre. Wo es uns für ein tiefgehendes Verständnis unerlässlich erscheint, werden wir auch auf die Sprache der Mathematik zurückgreifen. Schwierige Passagen, die Sie für den roten Faden nicht zwingend benötigen, werden durch das Verkehrszeichen »Vorsicht, Schleudergefahr!« gekennzeichnet.

Zum Einstieg holen wir zunächst etwas Schwung in der Thermodynamik als treibender Kraft der Veränderung. Das



wird unsere Vorstellung von Realität bereits ordentlich durchschütteln. Dann wenden wir die großen wissenschaftlichen Theorien auf das Universum als Ganzes an – das führt uns zur Kosmologie. Vom Verständnis des Urknalls gelangen wir über die Expansion des Universums zur Strukturbildung bis hin zu den Sternen und Galaxien. Dabei werden wir feststellen, dass alle oben genannten Objekte im Universum nicht für sich allein stehen, sondern vielmehr Teile eines großen kosmischen Materiekreislaufs sind. Auch wir Menschen bestehen überwiegend aus den chemischen Elementen, die im Inneren von Sternen gebildet werden. Ja, wir Menschen sind tatsächlich Kinder der Sterne, die wiederum Produkte der besagten vier Grundkräfte sind.

Das wird uns einen zweiten, tieferen Blick auf unser Universum ermöglichen. Ohne die individuelle Feinabstimmung der fundamentalen Kräfte gäbe es uns nicht. Wie bereits angesprochen, sind auch die eingangs als lebensfeindlich eingestuften Objekte Produkte dieser Kräfte. Sterne sind nur deswegen so gewaltige Plasmabälle, weil die Gravitation um viele Größenordnungen schwächer ist als der Elektromagnetismus und es daher gewaltiger Massen bedarf, um die gegenseitige elektromagnetische Abstoßung geladener Atomkerne zu überwinden und die elementaren Bestandteile unseres Körpers zu fusionieren. Am Ende des Sternenlebens führt diese große Masse zu bizarren Sternleichen wie Pulsaren

oder Schwarzen Löchern. Aus diesem Blickwinkel betrachtet sind die Sterne sogar äußerst lebensfreundlich – ein Universum ohne sie wäre definitiv auch ein Universum ohne uns. Warum letztlich alles so geworden ist, wie wir es heute vorfinden, ist nach wie vor ein großes Rätsel und wird Anlass sein für einen Blick über den Tellerrand der Naturwissenschaft.

Begleiten Sie uns also durch die größte Geschichte aller Zeiten – es wird um nicht weniger gehen als um alles. Versuchen wir gemeinsam, das Universum, in dem wir leben, zu verstehen. Unterwegs machen wir Station beim Informationsparadoxon Schwarzer Löcher, der Hawking-Strahlung und der Rindler-Raumzeit. Wir begegnen Objekten, die heißer als unendlich sind, groß wie ein Planet und dennoch dominiert von den Gesetzen des Allerkleinsten – der Quantenmechanik. Dunkle Materie, Dunkle Energie, negativer Druck, Entropische Gravitation und die Friedmann-Gleichungen führen uns bis an den Anfang allen Seins: zum Urknall. Auf der Suche nach unserer eigenen Herkunft geben die Primordiale Nukleosynthese, die Kosmische Hintergrundstrahlung, die Strukturbildung im Kosmos, Galaxien, Sterne und nicht zuletzt die Metamorphose von toter Materie zu lebenden Organismen die entscheidenden Antworten.

Zu den einzelnen Kapiteln finden Sie auf unserem YouTube-Kanal »Urknall, Weltall und das Leben« ergänzende Videos – im Buch verlinken QR-Codes auch direkt dorthin. Sollten trotzdem Fragen offenbleiben, stehen wir Ihnen gern auf unserer

Webseite [www.urknall-weltall-leben.de](http://www.urknall-weltall-leben.de) unter »Fragen zu Büchern/Videos« zur Verfügung – dort erstellen wir auch ein Erratum.

Abschließend noch eine Warnung: Wenn Sie sich auf dieses Buch einlassen, dann werden Sie mit schier unglaublichen Dingen und Fakten konfrontiert, die Sie eventuell an ihrem Verstand zweifeln lassen. Aber Sie werden auch Zusammenhänge erkennen, die sich bei oberflächlicher Betrachtung nicht ohne weiteres erschließen. Oder anders ausgedrückt: Sie werden die Welt und Ihre Existenz mit anderen Augen sehen.

1.

# Thermodynamik

## *Motor der Veränderung*



Bevor wir die großen Theorien der Wissenschaft auf das Universum als Ganzes anwenden, müssen wir eine grundsätzliche Frage klären: Dürfen wir das überhaupt? Kann man das Werden und Vergehen des Kosmos durch die Brille der modernen Theoretischen Physik erkennen und schlüssig verstehen? Unser Weltbild setzt sich aus vielen eigenständigen Theorien unterschiedlicher Epochen zusammen. Wenn wir beispielsweise in diesem Kapitel mit den Grundlagen der Thermodynamik als treibender Kraft der Veränderung beginnen, dürfen wir dann moderne physikalische Modelle und Theorien, die erst viele Generationen nach den Begründern dieser Disziplin entwickelt wurden, gewissermaßen als Quereinstieg in die Thermodynamik nutzen?



Die Antwort ist ein eindeutiges Ja! Denn eines der vielleicht wichtigsten Prinzipien in der Grundlagenforschung besagt: Das Universum kennt keine Fachgebiete, oder wissenschaftlich gesprochen: Es kennt keine Fakultäten. Wir sind es gewohnt, die Naturwissenschaft in Themenfelder zu gliedern, die wir dann z.B. als Physik, Chemie, Biologie usw. bezeichnen. Entsprechend werden an den Universitäten Fakultäten für diese Fachbereiche eingerichtet, in denen hochspezialisierte Wissenschaftler an immer spezielleren Aufgabenstellungen arbeiten, was dazu führt, dass sie schließlich von einem immer engeren Teilbereich immer mehr wissen. Böse Zungen behaupten sogar: bis sie am Ende von nichts alles wissen.

Die Natur jedoch kennt diese Fakultäten nicht! Die Geschehnisse im Universum halten sich nicht an das Motto: Hoppla, hier überschreite ich die Grenze zur Chemie oder zu was auch immer, und ab hier gelten bestimmte Gesetze, die es ab jetzt einzuhalten gilt. Nein! So ist es nicht! Alles hängt mit allem zusammen: keine Chemie ohne Physik, keine Biologie ohne Chemie, keine Medizin ohne Biologie und letztlich auch keine Medizin ohne Physik, wobei sich der Kreis schließt. Weil es so wichtig ist, sei es nochmals wiederholt: Die Natur unterscheidet nicht zwischen diversen Fakultäten!

Mit dieser Erkenntnis im Gepäck wollen wir den mächtigen Werkzeugkoffer der Theoretischen Physik nutzen, um unser modernes naturwissenschaftliches Weltbild zu erweitern. Beginnen wir mit der Thermodynamik, die für das Verständnis eines Kosmos unerlässlich ist, der sich aus einem extrem

heißen Anfangszustand heraus über eine Epoche des thermodynamischen Gleichgewichts schließlich in das uns vertraute, fortwährend expandierende und somit stetig kühler werdende Universum entwickelt hat. Viele Prozesse entlang dieser Geschichte werden wesentlich von Begriffen wie Temperatur, thermische Strahlung, thermischer Druck, Entropie und den Hauptsätzen der Thermodynamik bestimmt. Wundern Sie sich deshalb bitte nicht, dass wir ein Kapitel mit Grundlagen hierzu voranstellen.

## 1.1

# Wärmelehre

Betrachtet man die historische Entwicklung der Thermodynamik, so fällt auf, dass daran viele Personen aus verschiedenen Themen- und Wissenschaftsbereichen und aus unterschiedlichen Beweggründen beteiligt waren. So wurde die Thermodynamik wie kaum ein anderer Bereich der Naturwissenschaft zunächst vom Maschinenbau geprägt. Das Paradebeispiel ist die Dampfmaschine, deren Erfindung gern fälschlicherweise dem Schotten James Watt zugeschrieben wird. Blättert man jedoch in den Annalen zur Geschichte der Technik, so erfährt man, dass der französische Physiker Denis Papin (1647–1713) bereits 1690 das Funktionsprinzip dieser Maschine beschrieben und eine erste Dampfdruckpumpe gebaut hat.

Anhand dieser Vorarbeiten entstand einige Jahre später unter der Leitung des englischen Ingenieurs Thomas Savery (1650–1715) eine einfache Maschine zum Entwässern von Bergwerkstollen. Doch die erste wirklich praxistaugliche Maschine dieser Art geht auf Thomas Newcomen (1663–1729) zurück und wurde 1712 an ein Bergwerk in Staffordshire ausgeliefert. Erst 1759 hat sich dann James Watt (1736–1819) intensiv mit der Technik der Dampfmaschine beschäftigt und



1.1 Denis Papin  
(1647–1713)



1.2 James Watt  
(1736–1819)

sie schließlich im gleichen Jahr zum Patent angemeldet. In der Folgezeit erschloss sich diese Maschine immer mehr

Anwendungsbereiche, bis sie schließlich in Form der Dampflokomotive auf Schienen gesetzt wurde und die Welt eroberte.

Oberstes Ziel aller Anstrengungen war es, diese Maschinen möglichst effizient zu

gestalten. 1824 veröffentlichte Sadi Carnot (1796–1832) eine Arbeit, in der er vorschlug,

mit Hilfe von Kreisprozessen, also mit periodisch arbeitenden Maschinen, zu einer

höheren Effizienz zu gelangen. Später wurde die Entwicklung derartiger Maschinen zu

einer regelrechten Wissenschaft. Aber immer ging es dabei um Gase in einem

Zylinder mit einem Kolben, es ging um

Druck, Volumen, Temperatur, um Arbeit und um Wirkungsgrade.

Auch die Medizin kam ins Spiel. So war dem deutschen Arzt Julius Robert von Mayer (1814–1878)

aufgefallen, dass sich Muskeln erwärmen, wenn sie Arbeit

verrichten müssen. Wenn Sie einmal zügig eine längere Treppe hochlaufen, so können Sie das in einem Selbstversuch leicht

überprüfen. Aufgrund dieser Erfahrung postulierte Mayer:

Wärme ist eine andere Form von Energie. Zu dem gleichen

Schluss gelangte, unabhängig von Mayer, auch Hermann von



1.3 Julius Robert von Mayer (1814–1878)



1.4 Hermann von Helmholtz (1821–1894)

Helmholtz (1821–1894), nachdem er ein theoretisches Konzept zur Umwandlung von Energie in Wärme entwickelt hatte.

Um 1850 machte sich James Joule (1818–1889), ein Bierbrauer aus Salford bei Manchester, darüber Gedanken, wie viel Energie nötig ist, um die Temperatur von einem Liter Flüssigkeit um ein Grad Celsius zu erhöhen. Zusammen mit William Thomson, dem späteren Lord Kelvin (1824–1907), untersuchte er auch, wie sich die Temperatur eines in einem Gefäß eingeschlossenen Gases verhält, wenn man den Druck verändert.

In diesem Zusammenhang müssen auch noch Rudolf Clausius (1822–1888) und Ludwig Boltzmann (1844–1906) erwähnt werden. Ersterer beschäftigte sich mit dem Druck in einem Gas, als dessen Ursache er die mittlere Bewegungsenergie der Gasmoleküle vermutete. Boltzmann wiederum ging die Probleme mit

statistischen Verfahren an und deutete die thermodynamische Variable Entropie als statistische Größe. Neben den erwähnten Personen haben noch viele andere wichtige Beiträge zur Thermodynamik geliefert, die wir hier nicht alle erwähnen können. Im Endeffekt gipfelten schließlich alle Arbeiten in den

sogenannten drei Hauptsätzen der  
Thermodynamik.



1.5 James Joule  
(1818–1889)

## 1.2

# Erster Hauptsatz der Thermodynamik

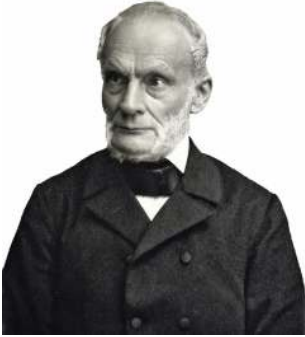
Der Erste Hauptsatz besagt nichts anderes, als dass unterschiedliche Energieformen, wie z.B. Arbeit oder Wärme, ineinander umwandelbar sind, wobei die Energie dem Betrag nach erhalten bleibt. Folglich ist der Erste Hauptsatz im Prinzip ein Energieerhaltungssatz. Generell setzt sich die Energie  $E$  eines Systems zusammen aus der Arbeit  $W$ , die im System verrichtet wird, und einer Wärmemenge  $Q$ . Als Gleichung geschrieben bedeutet das:  $E = W + Q$ .

Eine Änderung der Energie bedingt somit eine Änderung in der Arbeit oder der Wärme oder eine Änderung beider Größen. Bezeichnen wir die Änderungen mit einem  $\Delta$ , so lautet die Gleichung:

$$\Delta E = \Delta W + \Delta Q \quad (1.1)$$

Das  $\Delta Q$  in (1.1) bezeichnet man übrigens auch als Abwärme. An dieser Stelle kommt nun Rudolf Clausius (1822–1888) ins Spiel. Er hat sich diese (Ab-)Wärme  $Q$  genauer angesehen und eine weitere Größe eingeführt, die zu der Wärmeänderung  $\Delta Q$  in Beziehung steht. Clausius stellte fest, dass mit einer Änderung der Wärme  $Q$  bei einer gegebenen Temperatur  $T$

auch die Änderung einer neuen Größe  $S$  verbunden ist, die er Entropie nannte:



1.6 Rudolf Clausius  
(1822–1888)

$$\Delta S \geq \frac{\Delta Q}{T} \quad (1.2)$$

Dass in (1.2) die linke und die rechte Seite gleich sind, d.h. dass ein Gleichheitszeichen zu stehen kommt, gilt nur im Falle idealisierter Prozesse, die reversibel verlaufen, die also als Kreisprozesse in einer Schleife ohne Verluste wieder am Ausgangspunkt ankommen. Beispielsweise könnte ein ideal elastischer Gummiball, den man aus einer gewissen Höhe auf eine Steinplatte fallen lässt, dort abprallen und wieder auf die Ausgangshöhe zurückspringen. Dazu dürfte aber die Wärme, die beim Aufprall des Balles durch dessen Verformung entsteht, nicht verlorengehen, sondern müsste komplett wieder in Bewegungsenergie umgewandelt werden und zur Bewegungsenergie des zurückprallenden Gummiballes beitragen. Bislang hat man Derartiges jedoch noch nicht beobachtet.

Mit solchen sogenannten idealen Kreisprozessen hat sich auch Sadi Carnot beschäftigt. Anstelle von Gummibällen untersuchte er das Verhalten von in einen Zylinder mit beweglichem Kolben eingeschlossenen Gasen und ob man damit Arbeit verrichten könne. Zu diesem Thema hatten bereits Robert Boyle (1626–





1.7 Sadi Carnot  
(1796–1832)

1691) und Edme Mariotte (1620–1684) sowie Joseph Louis Gay-Lussac (1778–1850) Vorarbeit geleistet und festgestellt, dass der Druck eines in einem Zylinder eingeschlossenen Gases multipliziert mit seinem Volumen eine Prozesskonstante darstellt, dass also gilt:

$$p \cdot V = \text{const} \quad (1.3)$$

Demnach nimmt der Gasdruck ab, wenn man durch ein Herausziehen des Kolbens aus dem Zylinder das Volumen des Gases vergrößert und umgekehrt. Am Produkt  $p$  mal  $V$  ändert sich nichts. Später stellte sich heraus, dass sich die Konstante aus drei Größen zusammensetzt: der Anzahl  $N$  der Moleküle in dem betrachteten Gasvolumen, der Temperatur des Gases und einer weiteren Konstante  $k$ , auf die wir noch zu sprechen kommen. Damit können wir Gleichung (1.3) erweitern zu

$$p \cdot V = N \cdot k \cdot T \quad (1.4)$$

Diese Gleichung wird auch als ideale Gasgleichung bezeichnet. Dabei werden die Teilchen eines idealen Gases als punktförmige, d.h. ausdehnungslose Masseteilchen angenommen, die sich frei im Raum bewegen können und Energie und Impuls nur über elastische Stöße austauschen.

Warum wir diese Gleichung anführen, hat damit zu tun, dass wir für das  $\Delta W$  in Gleichung (1.1), also für die zu verrichtende Arbeit, einen entsprechenden mathematischen Ausdruck benötigen, den wir anstelle von  $W$  setzen können. Denn wenn wir das Volumen unseres Gases in dem Zylinder verkleinern wollen, so müssen wir an dem Kolben Arbeit verrichten, wobei sich der Druck erhöht. Druck mal Volumen ist also eine Arbeit. Und da wir diese Arbeit in das System hineinstecken, muss sie ein negatives Vorzeichen haben. Schreiben wir also Gleichung (1.1) neu an und verwenden anstelle der Wärme  $Q$  den gemäß Gleichung (1.2) nach  $Q$  umgestellten Ausdruck

$$T \cdot \Delta S \geq \Delta Q \quad (1.5)$$

dann transformiert sich (1.1) zu

$$dE = -pdV + TdS \quad (1.6)$$

Dass nun anstelle des Symbols  $\Delta$  ein  $d$  steht, hat damit zu tun, dass wir uns auf beliebig kleine Veränderungen beschränken wollen, so dass wir die differenzielle Schreibweise mit dem Buchstaben  $d$  benutzen können.

Kommen wir nochmals zurück zur Gleichung (1.2). Wenn es sich um einen Kreisprozess handelt, der ohne Verluste abläuft, dann steht, wie schon erwähnt, anstelle des Zeichens  $\geq$  das Gleichheitszeichen. In der Praxis kommen aber solche

idealisierten Prozesse nicht vor. Mit dem Ball, den wir haben fallen lassen, klappt es schon deswegen nicht, weil es keine vollkommen elastischen Körper gibt. Noch klarer wird die Sache, wenn wir ein Hühnerei fallen lassen. Zunächst veranstalten wir damit eine ziemliche Sauerei. Betrachtet man den Matsch jedoch genauer, so zeigt sich: Er hat sich etwas erwärmt. Verantwortlich dafür ist die Gravitation, die an dem Ei Arbeit verrichtet hat. Da aber die ursprünglichen Bestandteile des Eies nach wie vor vorhanden sind, könnte man doch – rein theoretisch – die Energie, die in dieser Abwärme steckt, dazu nutzen, das Ei wieder zusammensetzen und gegen die Schwerkraft unversehrt zum Ausgangspunkt hochzuheben. Das funktioniert aber nicht, zumindest hat man so etwas noch nie beobachtet. Fazit: Diese Größe  $S$ , die Entropie, die spuckt uns, salopp gesagt, in die Suppe. Doch bevor wir uns mit diesem Problem näher befassen, kehren wir kurz zurück zur Gleichung (1.6). Aus Gründen der Vollständigkeit muss neben den Termen  $-p dV$  und  $T dS$  noch ein dritter Term in Betracht gezogen werden, der ebenfalls zur Gesamtenergie  $E$  beiträgt. Es spricht ja nichts dagegen, dem System noch  $N$  weitere Teilchen mit anderen (z.B. chemischen) Eigenschaften hinzuzufügen. Damit erweitert sich Gleichung (1.6) zu

$$dE = -pdV + TdS + \mu dN \quad (1.7)$$

wobei  $\mu$ , das die Dimension Joule pro Mol hat, für das chemische Potential der jeweiligen Teilchenart steht. Mit anderen Worten: Die Größe  $\mu$  beschreibt, wie sich die Energie eines Systems ändert, wenn dem System Teilchen hinzugefügt bzw. entnommen werden. Je nachdem, welche Eigenschaften diese Teilchen haben, wirken sie sich auf das System aus. Für die weiteren Betrachtungen ist der Beitrag  $\mu \cdot dN$  jedoch ohne Belang, wir dürfen ihn daher gleich wieder vergessen.

Fassen wir kurz zusammen. Der Energieerhaltungssatz – Gleichung (1.7) – zählt zu den Grundpfeilern der Thermodynamik, weshalb man ihn auch als Ersten Hauptsatz der Thermodynamik bezeichnet. Er besagt: Soll sich an der Gesamtenergie eines Systems etwas ändern, so muss entweder Arbeit verrichtet, Wärme zu- oder abgeführt, oder es müssen dem System irgendwelche Teilchen hinzugefügt bzw. entnommen werden. Ferner hat sich gezeigt: Die Größe  $dS$ , die Änderung der Entropie, wird bestenfalls dann gleich null, wenn man es mit reversiblen Kreisprozessen zu tun hat. Da in der realen Welt derartige Prozesse jedoch nicht vorkommen, gilt dort  $dS > 0$ , d.h., in einem abgeschlossenen System nimmt die Entropie ohne äußeres Zutun immer zu. Damit zerplatzte bereits sehr früh ein Traum, der vermutlich sogar älter als die Thermodynamik ist: eine Maschine, die ohne äußeres Zutun ewig Arbeit verrichten könnte. Die Energieerhaltung in Form der Gleichung (1.7) schlägt diesem Wunsch die Türe zu.

In der Thermodynamik kommt der Entropie eine entscheidende Rolle zu. Der Schlüssel zum Verständnis der

Thermodynamik liegt in der Deutung dieser Größe, also darin, wie dieser Begriff zu interpretieren ist. Man hat erkannt, dass die Entropie etwas mit der Ordnung in einem System zu tun hat. Anders ausgedrückt: Die Entropie ist ein Maß für die Unordnung in einem System. Machen wir das anhand eines geordneten Papierstapels mit 100 durchnummerierten Blättern deutlich. Schusselig wie Physiker sind, fällt uns der Stapel aus der Hand, und als wir ihn wieder aufheben, stellen wir fest, dass sich vier Blätter nicht mehr an den richtigen Stellen befinden. Da wir nicht nur schusselig, sondern auch zu faul sind, die Blätter neu zu ordnen, kommen wir auf die Idee, den Stapel erneut zu Boden fallen zu lassen, in der Hoffnung, dass sich die Fehler wieder korrigieren. Leider zeigt sich, dass nun nicht nur vier, sondern viel mehr Blätter »verrutscht« sind. Ein weiterer Fallversuch ergibt sogar ein noch größeres Durcheinander. Doch warum ist das so? Woher kommt das? Gibt es etwa ein Gesetz, wonach zu Boden fallende Papierstapel in Unordnung geraten müssen? Wieso nimmt die Unordnung zu? Grundsätzlich wäre es doch möglich, dass sich die Ordnung des Stapels beim Hinunterfallen wieder verbessert. Physikalisch spricht da nichts dagegen. Denn jeder »Fallversuch« hat zum Ergebnis, dass sich eine der vielen möglichen Anordnungen der Blätter einstellt. Und damit sind wir schon bei der Lösung des Problems: Es gibt viel mehr Anordnungen, die ein höheres Maß an Unordnung aufweisen, als die wenigen, nahezu geordneten Zustände. Die

Wahrscheinlichkeit, dass die Unordnung beim Herunterfallen zunimmt, ist somit viel größer als die, dass sie abnimmt.

Für das Ergebnis des Fallversuchs spielt natürlich auch die Größe der Grundgesamtheit eine Rolle. Aus ihr ergibt sich das sogenannte Ensemble – in unserem Beispiel sind es sämtliche Blätter des Papierstapels. Besteht der Stapel beispielsweise nur aus zwei Blättern, so ist die Wahrscheinlichkeit 50 Prozent, dass die Blätter nach dem Herunterfallen in der richtigen Reihenfolge zu liegen kommen. Andererseits steigt die Wahrscheinlichkeit, dass das Experiment einen geordneteren Zustand als den Ausgangszustand liefert, wenn man den Fallversuch mit einem Stapel ausführt, in dem die Unordnung schon sehr nahe an die maximale Unordnung – das sogenannte Gleichgewicht – heranreicht. In der Praxis spielt das jedoch kaum eine Rolle, denn da hat man es mit unglaublich vielen Ensemblemitgliedern zu tun, wodurch sich die Unordnung des Ausgangszustands spielend weiter verschlimmern lässt – wir sind also stets weit von einer Gleichverteilung entfernt.

Betrachten wir dazu die Luftmoleküle in einem Zimmer. Grob abgeschätzt schwirren da pro Kubikmeter rund 10<sup>25</sup> Teilchen herum. Es gibt also sehr viele Möglichkeiten, wie sich die Luftmoleküle im Raum verteilen können. Was also sehen wir als geordnet und was als ungeordnet an? Geht man von einem Zustand aus, in dem alle Teilchen in einer Ecke des Zimmers versammelt sind, ist das sicher ein relativ geordneter Zustand. Mit der Zeit werden sich die Moleküle jedoch mehr oder weniger gleichmäßig im gesamten Raum verteilen. Das