



# 1. Einführung

## 1.1. Lösungsmethode

Nach Planck und Einstein beruhen die Begriffe und Erkenntnisse der Physik nicht in erster Linie auf Experimenten und Beobachtungen, sondern auf „reinem Nachdenken“ (Planck) und solchen Experimenten und Beobachtungen, die sich erst aus einer Theorie ergeben (Einstein). Zur Lösung eines Problems nach dieser Methode bietet sich das Verfahren der Verallgemeinerung oder Erweiterung von Begriffen und Gesetzen der Physik nach **Heisenberg** an. Es besteht darin, daß die bestehenden Begriffe und Gesetze so verallgemeinert werden, daß sie als „Sonderfälle“ oder „Grenzfälle“ der verallgemeinerten Begriffe und Gesetze erscheinen oder, in umgekehrter Denkweise, daß die verallgemeinerten Begriffe und Gesetze als der Ursprung der „alten“ Begriffe und Gesetze erklärt werden können. Darüberhinaus ist es nach Heisenberg zur Lösung eines Problems zweckmäßig, bei „Adam und Eva“ anzufangen und Betrachtungen der griechischen Philosophie in alle Überlegungen einzubeziehen.

Zu den Lösungsmethoden nach **Planck** und **Einstein** gehören hypothetische Ansätze, Phantasie, Spekulation, rein gedankliche Modelle und Begriffe, die voraussetzungslos ohne jede Vorschrift angewandt werden können, wobei insbesondere der Begriff „Kraft“ nicht in der Weise als bekannt vorausgesetzt und angewandt werden muß, wie dies heute üblicherweise der Fall ist (Planck, R. W. Pohl).

## 1.2. Geschichte der Probleme

Im Jahre 1869 entdeckte der irische Physiker Thomas Andrews die *Kontinuität der flüssigen und gasförmigen Phasen* im Gebiet oberhalb eines für jeden Stoff charakteristischen „kritischen Punktes“, der das Ende der Phasengrenze zwischen den Zuständen „Flüssigkeit“ und „Gas“ im „unterkritischen“ Gebiet ist. Da hiermit eine *allgemeine* Verwendung der Begriffe „Flüssigkeit“ und „Gas“ nicht mehr möglich war, machte Planck 1897 anhand eines Paradoxons den Vorschlag, die „Unterscheidung zwischen Flüssigkeiten, Dämpfen und Gasen“ als „nicht mehr durchführbar“ fallen zu lassen. Dieser Vorschlag war und ist jedoch wegen des ständigen Gebrauchs dieser Begriffe für die Praxis untauglich, was mit Sicherheit auch Planck



bewußt war. Daher kann man annehmen, daß Planck seinen Vorschlag nicht aus Überzeugung, sondern aus völliger Ratlosigkeit über die Unlösbarkeit dieses Problems machte, zumal im Jahre 1897 die Möglichkeit einer Suche nach einem nicht beobachtbaren „mikrophysikalischen“ Kriterium für eine „überkritische Phasengrenze“ mit den heutigen Methoden der Quantenphysik noch nicht bestand.

Historische Entwicklung (Quellen z.T. nach H. D. Baehr „Thermodynamik“, Springer, 2. Aufl., 1966)

- 1834 Voraussage eines „kritischen Punktes“ als „sehr wahrscheinlich“ durch E. Clapeyron: „Abhandlung über die bewegende Kraft der Wärme“, übersetzt und herausgegeben von K. Schreber, Akad. Verlagsgesellschaft m.b.H. Leipzig, 1926, S. 22 – „Sur la Puissance motrice de la Chaleur“, Journal de l'École Polytechnique, Bd. 14, 1834, S. 153.
- 1854 Herleitung eines Teils der „Clausius-Clapeyron-Gleichung“ für das beobachtbare Phasengleichgewicht durch R. Clausius: „Über eine veränderte Form des zweiten Hauptsatzes der mechanischen Wärmetheorie“, Poggendorfs Annalen der Physik und Chemie, Band XCIII, No12, 1854, S. 481/506.
- 1869 Erkennen und Deutung der *Kontinuität der flüssigen und gasförmigen Phasen* durch Thomas Andrews „On the Continuity of the Gaseous and Liquid States of Matter“, Deutsche Übersetzung in Ostwalds Klassikern der exakten Wissenschaften Nr. 132, Leipzig 1902.
- 1872 Erkennen des „kosmologischen Problems“ als ein Gleichgewichtsproblem durch Prof. Dr. Jakob Philipp Wolfers (1803-1878) mit dem Satz: „Die ungeheuren Abstände, in denen sich die Fixsterne voneinander befinden, würden allein ihr Zusammenfallen vermöge der allgemeinen Gravitation nicht verhindern können. Man muß vielmehr annehmen, daß dieses ebenso verhindert wird, wie das Zusammenfallen der Planeten mit ihrem Zentralkörper, der Trabanten mit ihren Planeten, durch eine den Fixsternen eigenthümliche fortschreitende Bewegung, welche mit jener allgemeinen Anziehung im Gleichgewicht steht.“ Kommentar zu Newtons Erklärung, warum die Fixsterne „nicht, vermöge ihrer Schwerkraft,



auf einander fallen“ in „Mathematische Principien der Naturlehre“, herausgegeben von J. Ph. Wolfers, Oppenheim, 1872, S. 657.

- 1897 Formulierung des Problems des „kritischen Punktes“ mit einem begrifflichen Paradoxon durch M. Planck und Lösungsvorschlag durch „Fallenlassen“ der Begriffe „Flüssigkeit“, „Dampf“ und „Gas“, in „Vorlesungen über Thermodynamik“, W. de Gruyter, 1964, 11. Aufl., S. 18.
- 1905 Relativitätstheorie von A. Einstein, eingesandt am 30.6.1905 (nach F. Hund: „Geschichte der physikalischen Begriffe“, B.I. Hochschultaschenbücher, Bd. 543, S. 259).
- 1916 Allgemeine Relativitätstheorie und Theorie der Gravitation von A. Einstein (nach F. Hund, S. 271: „Fertigstellung“, keine Angabe des Datums der Einsendung; nach „The Collected Papers of Albert Einstein“, Vol. 6, 1997, S. VII: Einsendung am 20. März 1916 bei „Annalen der Physik“ 49 (1916) als „Die Grundlagen der allgemeinen Relativitätstheorie“).
- 1931 Zusammenstellung von Kritik der Relativitätstheorie (RTH) in „Hundert Autoren gegen Einstein“ von Hans Israel (Hrsg.), Reprint der Originalausgabe von 1931, R. Voigtländers Verlag Leipzig, 1931/austrian literature online – www.literature.at – Band 89.
- 1954 Einstein ist der Ansicht, „daß die Realität überhaupt nicht durch ein kontinuierliches Feld dargestellt werden könne“ und schlägt einen Versuch vor, „die Realität durch eine rein algebraische Theorie zu beschreiben“, in A. Einstein „Grundzüge der Relativitätstheorie“ WTB Band 58, 5. Auflage 1969, S. 163.

Die genannten Jahreszahlen geben Anlaß zur Frage, ob Wolfers Kommentar Einstein bekannt war und ob er sich in diesem Fall mehr mit dessen Problem als mit der Allgemeinen Relativitätstheorie befaßt hätte, von der er sich erst im Jahre 1954 als Grundlage zur „Beschreibung der Realität“ trennte. Es wäre eine interessante Aufgabe der Wissenschaftsgeschichte, dieser Frage einmal nachzugehen.



### 1.3. Geschichte der Lösungen

Die Rohrschäden oberhalb des „kritischen Punktes“ von Wasser (221 bar/374 °C) traten vor allem im Bereich einer gedachten Verlängerung der Phasengrenze über den kritischen Punkt hinaus auf. Um herauszufinden, ob dieser Bereich mehr ein „flüssiger“ oder ein „gasförmiger“ war, war es zweckmäßig, nach einer solchen Grenze zu suchen. Da ein empirisches Verfahren durch Beobachtung und Messung nicht in Frage kam, konnten nur theoretische Grundlagen der Thermodynamik angewandt werden, die zu einer Gleichung für ein „theoretisches überkritisches Phasengleichgewicht“ bis zu 1000 bar/512 °C führten („Energie“, Jahrg. 20, Nr. 7/8 (1968), S. 223/227). Eine weitere Verlängerung mußte grundsätzlich möglich sein, so daß mit Hilfe neuer Messungen der Zustandsgrößen von Wasser oberhalb von 1000 bar nach einer solchen Verlängerung auf rein mechanischer Grundlage gesucht wurde. Das Verfahren war praktisch die Anwendung des folgenden Textes aus Newtons Vorwort zu den Principia vom 8. Mai 1686 und die Verwirklichung seines Wunsches „zu neuen Versuchen und gefälliger Ergänzung“. Der Text lautet in englischer und deutscher Übersetzung:

I wish we could derive the rest of the phenomena of Nature by the same kind of reasoning from mechanical principles, for I am induced by many reasons to suspect that they may all depend upon certain forces by which the particles of bodies, by some causes hitherto unknown, are either mutually impelled towards one another, and cohere in regular figures, or are repelled and recede from one another. These forces being unknown, philosophers have hitherto attempted the search of Nature in vain; but I hope the principles here laid down will afford some light either to this or some truer method of philosophy.

I heartily beg that what I have here done may be read with forbearance; and that my labors in a subject so difficult may be examined, not so much with the view to censure, as to remedy their defects.

Is. Newton

Cambridge, Trinity College, May 8, 1686<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Quellen: „Sir Isaac Newton’s MATHEMATICAL PRINCIPLES of Natural Philosophy and his System of the World“. Translated into English by Andrew Motte in 1729, by Florian Cajori, University of California Press, 1966, S. XVII/XVIII; „Sir Isaac Newton’s MATHEMATISCHE PRINCIPEN der NATURLEHRE“, herausgeg. von Prof. Dr. J. Ph. Wolfers, Verlag von Robert Oppenheim, Berlin, 1872, S. 2/3. Original in Latein in „Philosophiae Naturalis Principia Mathematica“, Vol. I und II, 3rd edition (1726). Assembled and edited by A. Koyré and J.B. Cohen, Cambridge University Press, 1972, S. 15/17.



Viele Beweggründe bringen mich zu der Vermuthung, dass diese Erscheinungen alle von gewissen Kräften abhängen können. Durch diese werden die Theilchen der Körper nämlich, aus noch nicht bekannten Ursachen, entweder gegeneinander getrieben und hängen alsdann als reguläre Körper zusammen, oder sie weichen von einander zurück und fliehen sich gegenseitig. Bis jetzt haben die Physiker es vergebens versucht, die Natur durch diese unbekanntes Kräfte zu erklären; ich hoffe jedoch, dass die hier aufgestellten Principien entweder über diese, oder irgend eine richtigere Verfahrensweise Licht verbreiten werden.

Möge alles mit Eifer gelesen werden, Mängel in einer so schwierigen Materie den Leser weniger zum Tadel, als zu neuen Versuchen und gefälliger Ergänzung veranlassen! Hierum bitte ich denselben recht dringend.

Cambridge, den 8. Mai 1686.

Is. Newton

Da die Verdampfung einer Flüssigkeit aus mechanischer Sicht ein Vorgang ist, bei dem sich die Teilchen der Flüssigkeit durch Wärmezufuhr gegenseitig abstoßen, während sie sich bei der Verflüssigung eines Gases durch Wärmeentzug gegenseitig anziehen, kann das Phasengleichgewicht „flüssig – gasförmig“ als ein Zustand angesehen werden, in dem weder eine abstoßende noch eine anziehende Kraft auf die Teilchen wirkt. Mit Hilfe eines Gedankenmodells für einen „kräftefreien“ Körper ergab sich auf der Grundlage neuer Zustandsgrößen des Wassers bis zu sehr hohen Drücken eine weitere Verlängerung bis 10.000 bar/786 °C.

Nach diesem Ergebnis stellte sich die Frage nach einem Körper, der nicht nur im Sinne eines Gleichgewichts abstoßender und anziehender Kräfte seiner Teilchen „kräftefrei“ ist, sondern auch von äußeren Kräften „frei“ ist. Der gesuchte Körper konnte nur das „Universum“ sein, da er sich 1. aufgrund der letzten Bedingungen in einem „leeren“ Raum von unendlicher Ausdehnung befinden muß, d.h. alles enthalten muß, was existiert, 2. in einer Fluchtbewegung seiner „Teilchen“ gemäß Wolfers Forderung befinden muß, um ein Zusammenfallen (Kontraktion) des Körpers infolge gegenseitiger Anziehung der „Teilchen“ durch Gravitation zu verhindern. Einen „leeren“ Raum von unendlicher Ausdehnung kann man sich zwar nicht vorstellen, man kann ihn aber nach Newton „denken“ (Isaac Newton „Über die Gravitation...“, Texte zu den philosophischen Grundlagen der klassischen Mechanik, übersetzt und erläutert von Gernot Böhme, Vittorio Klostermann, Frankfurt/M., 1988, S. 37/43ff.) Zur Beschreibung wurde das gleiche Gedankenmodell eines „kräftefreien“ Körpers benutzt wie zur Beschreibung des unsichtbaren „Phasenübergangs“ im überkritischen Gebiet.



## Zitate zum Verständnis von Methoden und Lösungen

### Planck

„Der Kraftbegriff hat sich für die Formulierung der Bewegungsgesetze als äußerst nützlich erwiesen, aber erkenntnismäßig führt er an sich nicht um einen Schritt weiter“ („Kausalgesetz und Willensfreiheit“, in „Vorträge und Erinnerungen“, S. Hirzel, Stuttgart, 1949, S. 77).

„In solchen Fällen gibt es kein anderes Mittel, um vorwärtszukommen, als einmal probeweise eine gewisse Annahme einzuführen, eine sogenannte Arbeitshypothese, und zuzusehen, wie weit man mit ihr kommt. Für die Brauchbarkeit einer solchen Hypothese ist es immer ein besonders gutes Zeichen, wenn sie sich auch auf Gebieten bewährt, auf die sie nicht von vornherein zugeschnitten war. Denn dann darf man schließen, daß der gesetzliche Zusammenhang, den sie ausspricht, eine tiefergehende Bedeutung besitzt und eine wesentlich neue Erkenntnis eröffnet... In den meisten Fällen handelt es sich dabei um die Einführung gewisser Gedankenbilder, Analogien, welche auf bekannte gesetzliche Zusammenhänge in einem anderen Gebiete hinlenken und dadurch einen weiteren Schritt nahelegen in der Richtung zu der Vereinheitlichung des physikalischen Weltbildes“ („Physikalische Gesetzlichkeit“, in „Vorträge und Erinnerungen“, S. Hirzel, Stuttgart, 1949, S. 119).

### Einstein

„Die Naturwissenschaft ist nicht bloß eine Sammlung von Gesetzen, ein Katalog zusammenhangloser Fakten. Sie ist eine Schöpfung des Menschengesistes mit all den frei erfundenen Ideen und Begriffen, wie sie derartigen Gedankengebäuden eigen sind. Physikalische Theorien sind Versuche zur Ausbildung eines Weltbildes und zur Herstellung eines Zusammenhangs zwischen diesem und dem weiten Reich der sinnlichen Wahrnehmungen“ („Die Evolution der Physik“, Rowohlt, 1968, S. 193),

„Ohne den Glauben daran, daß es grundsätzlich möglich ist, die Wirklichkeit durch unsere theoretischen Konstruktionen begreiflich zu machen, ohne den Glauben an die innere Harmonie unserer Welt, könnte es keine Naturwissenschaft geben“ S. 195,

„Ich betrachte es aber als durchaus möglich, daß die Physik nicht auf den Feldbegriff gegründet werden kann, d.h. auf kontinuierliche Gebilde. Dann bleibt von meinem ganzen Luftschloß inclusive der Gravitationstheorie *nichts* bestehen.“ (Aus Einsteins letztem Brief an M. Besso, Princeton, 10. August 1954; nach Albrecht Fölsing „Albert Einstein“, Suhrkamp, 1995, S. 824),

„Man kann gute Argumente dafür anführen, daß die Realität überhaupt nicht durch ein kontinuierliches Feld dargestellt werden könne. Aus den Quantenphänomenen scheint nämlich mit Sicherheit hervorzugehen, daß ein endliches System von endlicher Energie durch eine *endliche* Zahl von Zahlen (Quanten-Zahlen) vollständig beschrieben werden kann. Dies scheint zu einer Kontinuums-Theorie nicht zu passen und muß zu einem Versuch führen, die Realität durch eine rein algebraische Theorie zu beschreiben. Niemand sieht aber, wie die Basis einer solchen Theorie gewonnen werden



könnte.“ („Grundzüge der Relativitätstheorie“, Anhang II, Dezember 1954, S. 163, WTb, Band 58, 5. Auflage, 1969).

## Heisenberg

„Die Newtonsche Physik hat, darauf kommt es mir an, einen Grad von Abgeschlossenheit, den das physikalische Rüstzeug des Ingenieurs niemals besitzt. Die Abgeschlossenheit bewirkt, daß es keine kleinen Verbesserungen geben kann. Aber der Übergang zu einem ganz neuen Begriffssystem mag möglich sein, wobei das alte System dann wohl als Grenzfall in dem Neuen enthalten sein muß“ („Der Teil und das Ganze“, Piper, 1969, S. 136/37,

„Unser Denkvermögen ist so gemacht, daß es die Natur verstehen kann“, S. 142,

„Man kann nie nur eine einzige Schwierigkeit lösen, man wird immer gezwungen sein, mehrere auf einmal zu lösen“, S. 143).

## J.D. Barrow

„Vermutlich werden viel mehr vertraute Begriffe neu verstanden werden müssen, bevor sich das wahre Bild abzeichnet“ („Theorien für Alles“, Spektrum, 1998, S. 98,

„Besonders wenn sich Naturkonstanten als Proportionalitätskonstanten ergeben, könnten sie einfach nur ein Kunstprodukt der gewählten Darstellung sein“, S. 98,

„Ein wirklich großer Fortschritt geht oft Hand in Hand mit einer Revision unseres Verständnisses von einer Naturkonstanten“, S. 119).



## **2. Ausführliche Erklärung und Lösung des Planck'schen Problems – Literatur, Kommentare**

Der folgende gekürzte Text ist Teil I und Teil II eines Buchprojekts aus dem Jahr 1997, das nicht weitergeführt wurde. Die Einteilung in Kapitel und Abschnitte wird beibehalten.

### **I. Das Paradoxon von Max Planck zur Frage der Unterscheidung der Begriffe „Flüssigkeit“ und „Dampf“ oder „Gas“**

#### **1. Zweck des Kapitels**

In diesem Kapitel werden zunächst die wichtigsten thermodynamischen Begriffe und Tatsachen erklärt, die zum Verständnis des Problems einer Unterscheidung der Begriffe „Flüssigkeit“ und „Dampf“ oder „Gas“ benötigt werden. Anschließend wird gezeigt, aus welchen Gründen eine physikalische Definition dieser Begriffe bisher scheiterte. Am Beispiel dieses Problems und seiner Behandlung in der modernen Physik wird der grundlegende Unterschied in der philosophischen Auffassung über Begriffsbildungen und physikalische Erkenntnis zwischen Planck und der modernen Physik dargelegt.

#### **2. Phasengleichgewicht und das Kriterium der Beobachtung**

Führt man einer Flüssigkeit bei konstant gehaltenem Druck, z.B. bei 1 bar, Wärme zu, so beginnt sie beim Erreichen der Siedetemperatur, die auch Sättigungstemperatur genannt wird, zu verdampfen. Nach dem Beginn der Verdampfung dient die zugeführte Wärme nicht mehr zur Erhöhung der Temperatur, sondern zur Umwandlung der „Flüssigkeit“ in „Dampf“. Bei diesem Vorgang bleibt die Temperatur so lange konstant, bis die ganze Flüssigkeit in Dampf übergegangen ist. Wird dem „gesättigten“ Dampf weiter Wärme zugeführt, entsteht „überhitzter“ Dampf, der bei genügend hoher Temperatur auch als „Gas“ bezeichnet wird. Da die flüssigen und dampf- oder gasförmigen Zustände einer Substanz auch „Phasen“ genannt werden, bezeichnet man das gleichzeitige Vorhandensein von Flüssigkeit und Dampf im Sättigungszustand auch als „Phasengleichgewicht“.

Der umgekehrte Vorgang zur Verdampfung ist die Verflüssigung oder Kondensation eines Gases. Hierzu muß das Gas zunächst so weit abgekühlt werden, bis gesättigter Dampf vorliegt. Dann erfolgt bei weiterer Wärme-

abfuhr die Kondensation des Dampfes, wobei wieder ein Phasengleichgewicht vorliegt und die Temperatur so lange konstant bleibt, bis der Dampf vollständig in Flüssigkeit übergegangen ist. Die Verflüssigungstemperatur hat selbstverständlich den gleichen Wert wie die Verdampfungstemperatur (Sättigungstemperatur).

Die Unterscheidung zwischen „Flüssigkeit“ und „Dampf“ ergibt sich in einfachster Weise aus einer direkten Beobachtung, wie sie z.B. bei einem Verdampfungsvorgang unter atmosphärischem Druck möglich ist. Der Dampf entsteht hierbei in Form von Dampfblasen, die sich an der Heizfläche bilden und in der gesättigten Flüssigkeit im allgemeinen nach oben aufsteigen. Die Einschränkung „im allgemeinen“ ist deshalb notwendig, weil bei einem in der Schwerelosigkeit durchgeführten Verdampfungsvorgang die Dampfblasen nicht „nach oben“ aufsteigen, sondern in dem entstehenden Gemisch aus Flüssigkeit und Dampf zunächst verbleiben, um sich schließlich mit zunehmender Verdampfung und abnehmendem Flüssigkeitsanteil zu einem einzigen Dampfvolumen zu vereinigen. Auch bei der Verdampfung einer Flüssigkeit in Rohren entsteht zunächst ein Gemisch aus Dampfblasen und Flüssigkeit, wobei man in waagerechten Rohren bei geringer Geschwindigkeit ein Aufsteigen der Dampfblasen in den oberen Rohrteil beobachten kann. Bild 1 veranschaulicht verschiedene Möglichkeiten der Dampfblbildung, abhängig von der Art und der Lage der Heizflächen.

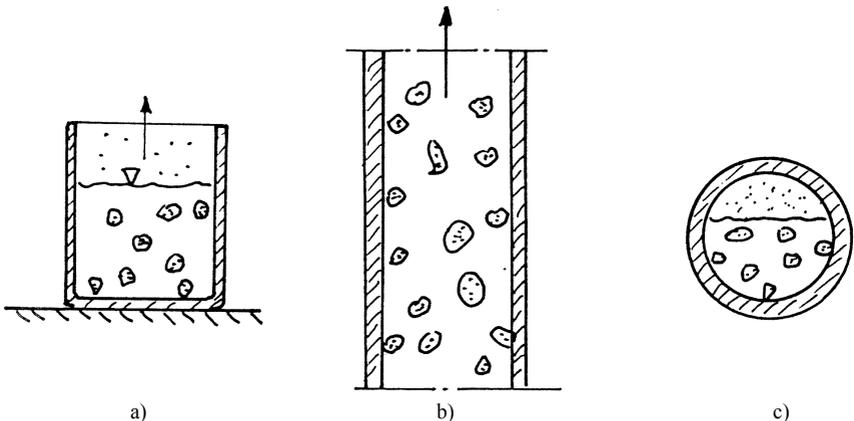


Bild 1: Dampfblbildung in Abhängigkeit von Art und Lage der Heizfläche

- a) waagerechte Heizfläche mit ruhender Flüssigkeit
- b) senkrechttes Rohr mit strömendem Medium
- c) waagerechtes Rohr mit strömendem Medium bei geringer Geschwindigkeit



Bei der Kondensation eines Dampfes entsteht die Flüssigkeit an der Kühlfläche in der Regel in Form von Flüssigkeitstropfen, die unter dem Einfluß der Schwere „nach unten“ abtropfen. Die flüssige Phase kann sich auch in Form eines geschlossenen Flüssigkeitsfilmes an der Kühlfläche bilden und abfließen.

Die Verdampfung ist stets mit einer Volumenvergrößerung oder Expansion, die Verflüssigung mit einer Volumenverkleinerung oder Kontraktion der Substanz verbunden.

Ein Kriterium zur Unterscheidung von „Flüssigkeit“ und „Dampf“ oder „Gas“ ist auch die aus der Erfahrung bekannte Tatsache, daß geringe Mengen der kleinsten Teilchen einer Substanz im flüssigen Zustand immer Tropfen bilden, während die gleiche Menge der Teilchen im gasförmigen Zustand jeden Raum einnehmen, der ihnen zur Verfügung gestellt wird. Ein Flüssigkeitstropfen hat angenähert die Gestalt einer Kugel, während die Teilchen im gasförmigen Zustand keine bestimmte Form einnehmen, sondern ungeordnete, für das Auge nicht sichtbare Bewegungen im Raum ausführen. Das Wort „Gas“ ist griechisch-niederländischen Ursprungs und aus dem Wort „Chaos“ entstanden, was im Gegensatz zum „Kosmos“ einen formlosen, ungeordneten Zustand bedeutet und damit das Verhalten der Teilchen im gasförmigen Zustand richtig beschreibt.

Die Naturwissenschaft hat im Laufe der Zeit zahlreiche Begriffe zur Beschreibung der Eigenschaften von Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen erdacht. Gleichzeitig wurden Meßverfahren definiert, um diese Eigenschaften quantitativ erfassen zu können. Unter einer „Beobachtung“ versteht man daher in der Physik auch immer eine Messung mit künstlichen, d.h. technischen Hilfsmitteln. Der Begriff künstlich soll zum Ausdruck bringen, daß die Beobachtungsmittel nicht auf natürliche Weise existieren, wie z.B. das menschliche Auge, sondern daß sie vom Menschen hergestellt werden müssen [1]. Da sich bei einem Phasenwechsel alle Eigenschaften der Flüssigkeit und des Dampfes sprunghaft ändern, kann ein Phasenübergang auch durch eine Messung derartiger Eigenschaftsänderungen festgestellt werden. Die bloße äußere Beobachtung ist daher nicht das einzige Kriterium, um Flüssigkeit und Dampf voneinander unterscheiden zu können. Die Tabelle 1 im nächsten Abschnitt gibt einige Eigenschaften von Wasser jeweils im gesättigten Zustand der Flüssigkeit und des Dampfes wieder.<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Mit „Wasser“ ist im Folgenden der Einfachheit halber meistens die chemische Substanz  $H_2O$  gemeint, unabhängig davon, ob es sich gerade um den flüssigen oder den dampfförmigen Zustand handelt. Aus dem Zusammenhang geht hervor, welcher Zustand gemeint ist.