

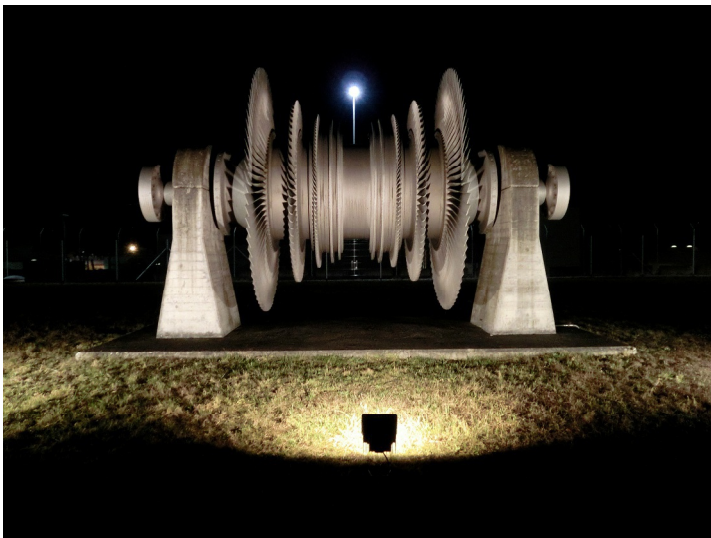
Jost Braun

Technische Thermodynamik

Grundlagen

Technische Thermodynamik

Vorlesungsbegleitendes Lehrbuch, 2016



Dampfturbinenrotor

Prof. Dr.-Ing. Jost Braun (Autor)
Hochschule Kempten



Technische Thermodynamik
Vorlesungsbegleitendes Lehrbuch, 2. und verbesserte Auflage 2016

Dieses Werk ist in Papierform oder in elektronischer Form erhältlich und urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung des Werkes oder von Teilen des Werkes ist nur innerhalb der Grenzen des Urheberrechtes zulässig. Es wird darauf hingewiesen, dass das deutsche Urheberrechtsgesetz in der jeweils gültigen Fassung uneingeschränkt auch für dieses Dokument in beiden Versionen gültig ist.

Herstellung und Verlag:
BoD - [Books on Demand](#), Norderstedt
ISBN 978-3-7431-5457-5

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung in die Thematik	7
	Was ist die Thermodynamik?	8
	Wie beschreibt man den „Wärmezustand“?	9
	Was ist ein thermodynamisches System und seine Umgebung?	10
	Wo finde ich, was ich in diesem Buch nicht finde?	11
2	Die Gleichgewichtspostulate und die Definition der Temperatur	13
	Systeme und Systemgrenze	18
	Zustandsgrößen eines Systems	19
3	Der 1. Hauptsatz der Thermodynamik (Erhaltung der Energie)	21
	Der Satz von der Erhaltung der Energie (etwa 1842 durch Robert J. Mayer)	21
	1. Hauptsatz für ein geschlossenes System	22
	1. Hauptsatz mit chemischen Reaktionen im geschlossenen System	25
	1. Hauptsatz für ein offenes System	29
	1. Hauptsatz mit chemischen Reaktionen im offenen System	32
4	Zustandsgleichungen und Zustandsgrößen	36
	Thermische Zustandsgleichung für ideale Gase	36
	Kalorische Zustandsgleichung der Inneren Energie	37
	Kalorische Zustandsgleichung der Enthalpie	38
	Die Volumenänderungsarbeit	41

5	Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik	41
	Allgemeines	41
	Verbale Formulierung des 2. Hauptsatzes und Definition der Entropie	42
	Die Entropie als Zustandsgröße	43
	Beispiel für die Verwendung der Entropie und des 2. Hauptsatzes .	45
	Der 2. Hauptsatz, formuliert nur mit Zustandsgrößen	47
6	Zustandsänderungen von Systemen	49
	Reversible und irreversible Zustandsänderungen	49
	Irreversibilität realer Zustandsänderungen	58
	Zustandsdiagramme	58
	Wichtige Zustandsänderungen idealer Gase	59
7	Verhalten idealer Gase	70
	Definition idealer Gase	70
	Eigenschaft aller Zustandsgrößen	70
	Innere Energie und Enthalpie	71
	Entropiedifferenz zwischen zwei Zustandspunkten	72
	Gasgemische idealer Gase	74
	Berechnungsformeln	74
	Beispiel: Trockene Luft als Gasgemisch	81
8	Kreisprozesse	82
	Wärme­kraft­prozesse	83
	Energiebilanz von Kreisprozessen	87
	Thermischer Wirkungsgrad	87
	Kältemaschinenprozesse	88
	Leistungsziffer, Leistungszahl, Arbeitszahl	88
	Adiabat/reibungsbehaftete Zustandsänderungen	92
9	Spezielle Kreisprozesse	94

	Carnot-Prozess	94
	Jouleprozess (Gasturbinenprozess)	96
	Regenerativer Jouleprozess	98
	Joule-Reheatprozess	101
	Kombiprozess, GuD-Prozess	102
	Ottoprozess	104
	Dieselprozess	105
10	Kreisprozesse mit Dampf als Arbeitsmedium	106
	Thermodynamische Eigenschaften von Dampf	107
	Thermodynamisches Verhalten der unterkühlten Flüssigkeit	111
	Dampfkraftprozesse	112
	Kältemaschinenprozesse	117
11	Feuchte Luft	128
	Bezugsmenge spezifischer Größen ist nur die Masse der trockenen Luft	128
	Dampfdruck und relative Feuchte RH	129
	Enthalpie	131
	Innere Energie, Entropie und spezifisches Volumen	132
	Nullpunkte der Enthalpie, inneren Energie und der Entropie der Be- standteile	132
	Berechnung der Enthalpiewerte feuchter Luft aus der Temperatur t in °C	134
	Das Mollier h - x -Diagramm	136
	Zustandsänderungen feuchter Luft	137
	Literaturverzeichnis	149

Vorwort

Dieses Buch ist ein Kompendium, das die Grundlagen der Technischen Thermodynamik speziell für Bachelorstudiengänge Maschinenbau sowie für verwandte technische Studiengänge wie Energietechnik, Verfahrenstechnik und Lebensmittel-Verpackungstechnologie in leicht verständlicher Form darstellt. Auf besondere Grundlagen wird nicht zurückgegriffen, lediglich Grundzüge der Differential- und Integralrechnung werden vorausgesetzt.

Konzipiert wurde es als vorlesungsbegleitendes Lehrbuch für den Studiengang Lebensmittel-Verpackungstechnologie der Hochschule Kempten und soll die Prüfungsvorbereitung erleichtern. Es kann aber auch Ingenieuren aller Fachrichtungen und Anwendern im Beruf, die nur gelegentlich mit thermodynamischen Fragestellungen konfrontiert werden, als Nachschlagewerk und zur schnellen Information dienen.

Nachdem es bewusst kurz gehalten ist und sich auf die wesentlichen Zusammenhänge konzentriert, wird es auch für Studierende anderer Hochschulen und Universitäten nützlich sein. Die wesentlichen Themengebiete, die an allen Hochschulen zu den Grundlagen zählen, werden äußerst kompakt abgedeckt, naturgemäß wurde deswegen auf bestimmte Details verzichtet. Es ersetzt daher auch nicht den Besuch einer Vorlesung, ebenso wenig wie es vollständiger Ersatz für weitergehende Fachliteratur sein kann.

Meiner Frau Kirsten danke ich sehr für das Korrekturlesen des Manuskriptes. Trotz großer Sorgfalt, möglichst alle Fehler zu entdecken und zu eliminieren, wäre es vermessen anzunehmen, dass sich kein Fehler mehr versteckt hat. Die Teilnehmer meiner Vorlesungen bitte ich um diesbezügliche Rückmeldung, wenn sie Fehler entdecken. Wenn Sie bei einer Formel einen Fehler vermuten, wäre meine Empfehlung allerdings, zunächst in der Literatur nachzuschlagen, denn erfahrungsgemäß lassen sich die meisten vermeintlichen Fehler schnell klären. Hierzu bitte ich darum, das Literaturverzeichnis am Ende zu beachten.

Zuletzt möchte ich noch Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Beer danken, der mich in meiner Zeit als Assistent an der TU Darmstadt als Mentor und Doktorvater betreut hat und dem ich gerne dieses Buch widme.

Kempten, im September 2016

Prof. Dr.-Ing. Jost Braun

1 Einführung in die Thematik

In diesem Buch werden die wesentlichen Zusammenhänge der Technischen Thermodynamik aus den Grundlagen hergeleitet und anwendungsgerecht in leicht verständlicher Form dargestellt.

Ursprüngliches Ziel war es, die Inhalte der Technischen Thermodynamik für den Studiengang Lebensmittel-Verpackungstechnologie aufzubereiten und im Vergleich zum Allgemeinen Maschinenbau entsprechend in den Schwerpunkten modifiziert zu vermitteln. Insbesondere wurde der Tatsache Rechnung getragen, dass in diesem Studiengang die thermische Verfahrenstechnik bei der Lebensmittelbehandlung eine wichtige Rolle spielt. Es hat sich allerdings schnell herausgestellt, dass eine Reduktion auf das Wesentliche nicht nur für diesen Studiengang, sondern für alle technischen Studiengänge von Interesse ist, auch wenn damit bestimmte Themengebiete naturgemäß nicht genauso ausführlich dargestellt werden können, wie es eine jeweils leicht unterschiedliche Schwerpunktsetzung in den angesprochenen Studiengängen verlangt. Die Kunst des Weglassens war gefragt, daher werden manche Themen nur gestreift. Die Grundlagen sind jedoch überall gleich und genau dort starten wir die Betrachtungen.

Wir beginnen mit den grundlegenden Postulaten, die zwar offensichtlich aus der Beobachtung (oder dem „gesunden Menschenverstand“) heraus aufgestellt, aber nicht beweisbar sind. Eine Beweisführung wäre ohnehin für den Anwender nicht erheblich, denn in der Praxis ist vor allem die zu den Beobachtungen („Experimenten“) widerspruchsfreie mathematische Beschreibung bedeutsam. Wir können also nur sagen, *dass* etwas sich so verhält, aber normalerweise nicht, *warum* es sich so verhält. Ein schönes Beispiel hierfür ist die wichtige Zustandsgröße Temperatur, die durch das Gleichgewichtspostulat definiert wird. Dieses wird manchmal auch als 0. Hauptsatz der Thermodynamik bezeichnet.

Der nächste Schritt ist der 1. Hauptsatz der Thermodynamik, also der Satz von der Energieerhaltung. Er führt uns zum Begriff des thermodynamischen Systems, zu Bilanzierung, Bilanzgrenzen und zu den Zustandsgrößen innere Energie und Enthalpie.

Weiter geht es mit dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik. Er definiert die Zustandsgröße Entropie. Mit ihrer Hilfe können wir Reversibilität und Irreversibilität von Zustandsänderungen und Prozessen beschreiben. Sie ist sehr wertvoll, um die Güte von Prozessen vergleichen zu können.

Auch das Verhalten der Materie muss in der praktischen Anwendung geeignet beschrieben werden. Dies geschieht über Zustandsgleichungen und -größen, wobei uns bei Prozessen auch Zustandsdiagramme, z.B. T - s und h - s Diagramm, hilfreich

sind. Dabei ist wichtig, dass wir es nur selten mit Reinstoffen zu tun haben, so dass wir insbesondere das Verhalten von Gasgemischen idealer Gase, das Verhalten von Stoffen beim Phasenübergang flüssig - gasförmig (Sieden) bzw. gasförmig - flüssig (Kondensieren) und das Verhalten von Gas-Dampfgemischen in Form der feuchten Luft näher betrachten werden. Dabei werden auch die Phasenübergänge fest - flüssig (Schmelzen) und flüssig - fest (Gefrieren oder Erstarren) beschrieben.

Schließlich leiten wir technische Kenngrößen, z.B. die „Technische Arbeit“, „Wirkungsgrade“ und „Nutzungsgrade“ her und beschreiben wichtige Kreisprozesse, besonders aus der Kälte- und Verfahrenstechnik.

Was ist die Thermodynamik?

Unter Thermodynamik versteht man eine allgemeine Energielehre. Die klassische Thermodynamik arbeitet nur mit makroskopischen, also in der Regel gemittelten Größen. Sie baut auf Erfahrungssätzen auf. Dagegen geht die statistische Thermodynamik vom atomistischen Aufbau der Materie aus und ermittelt den Zusammenhang zwischen dem Verhalten einzelner Teilchen und den makroskopischen Eigenschaften von Vielteilchensystemen.

Energie ist die grundsätzliche Fähigkeit Arbeit zu verrichten. Arbeit verrichten heißt, eine Kraft auszuüben *und* sie über eine bestimmte Wegstrecke zu verschieben. Die Thermodynamik lehrt, die unterschiedlichen Energieformen zu unterscheiden. Aus der Technischen Mechanik kennen wir die mechanischen Energieformen wie kinetische Energie, potentielle Energie und Federenergie, also alle Energieformen, die sich fast vollständig in Arbeit umwandeln lassen. In der Thermodynamik kommt zu diesen mechanischen Formen der Energie noch die Wärme und der innere Wärmezustand der Stoffe dazu, den wir mit dem Begriff „innere Energie“ beschreiben werden. Zu dieser gehört auch die bei chemischen Reaktionen wie der Verbrennung (also bei Stoffumwandlungen) freigesetzte oder benötigte Reaktionsenergie.

Im Gegensatz zu den mechanischen Energieformen lassen sich Wärme und innere Energie aber prinzipiell nicht vollständig in Arbeit umwandeln. Aufgabe der Thermodynamik ist es daher, die Bedingungen zur Umwandlung klar zu definieren. Der 1. Hauptsatz der Thermodynamik beschreibt die Gleichwertigkeit der unterschiedlichen Energieformen bei Energiebilanzen. Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik klärt die Bedingungen und Grenzen der Umwandlung verschiedener Energieformen ineinander bei natürlichen Vorgängen und bei technischen Prozessen. Zu diesem Zweck müssen wir auch das Verhalten der Stoffe geeignet beschreiben können.

Wie beschreibt man den „Wärmezustand“?

Als Zustandsgrößen bezeichnet man physikalische Eigenschaften von Körpern und Stoffen, die geeignet sind den Zustand und das Verhalten der Materie eindeutig festzulegen. Beispiele sind Druck, Dichte und Temperatur. Zustandsgrößen müssen auch den Wärmezustand von Körpern eindeutig festlegen, sonst sind sie für unsere Zwecke ungeeignet. Wir werden sehen, dass bei geeigneter Wahl genau zwei voneinander unabhängige Zustandsgrößen den thermodynamischen Zustand eines Körpers eindeutig bestimmen. Ändert sich der Wärmezustand eines Körpers, muss sich folglich mindestens eine Zustandsgröße ändern, in der Regel sind es aber mehrere oder sogar alle.

Die drei genannten Größen reichen aber nicht aus, den Wärmezustand eindeutig festzulegen, insbesondere ist die Temperatur wider Erwarten nicht alleine dazu geeignet. Gerade siedendes Wasser bei 100°C und der dabei entstehende Wasserdampf haben beispielsweise die gleiche Temperatur und den gleichen Druck aber einen deutlich unterschiedlichen inneren Wärmezustand. Folglich benötigen wir weitere Zustandsgrößen, z.B. „innere Energie“, „Enthalpie“ und „Entropie“, um diesen Zustand genau zu beschreiben.

Auch wenn uns auf den ersten Blick die Zustandsgrößen Druck, Temperatur und Dichte (bzw. deren Kehrwert, das spezifische Volumen) sehr vertraut sind, muss man sich doch vergegenwärtigen, dass diese Vertrautheit einzig und allein dem Umstand zu verdanken ist, dass wir Sinnesorgane besitzen, die diese Größen scheinbar „messen“ können. Wir können innerhalb gewisser Grenzen zwischen „heiß“ und „kalt“ unterscheiden und verbinden dies mit Temperatur. Allerdings bricht das scheinbare Verständnis der Temperatur sofort in sich zusammen, wenn man in der Sauna ein 80°C heißes Metallstück anfasst oder sich auf die genau gleich heiße Holzbank setzt. Dass alle Objekte in der Sauna, die über keinen Kühlmechanismus wie der Mensch verfügen, die gleiche Temperatur haben *müssen*, ergibt sich aus der Definition der Temperatur. Beim Metall kann man sich heftig die Finger verbrennen, beim Holz passiert gar nichts, trotz gleicher Temperatur ist die Auswirkung unterschiedlich. Letztlich ist der Begriff „Temperatur“ genauso gut oder schlecht begreifbar wie die Entropie. Beide definieren sich durch ihre Eigenschaften, beide werden unabhängig vom betrachteten Material beschrieben und sie beeinflussen sich gegenseitig.

Die Entropie stellt eine Art „Schadensmaßstab“ dar. Mit ihrer Hilfe kann man beurteilen, wie „schlimm“ die unwiderruflichen Auswirkungen von Prozessen in Bezug auf die Umgebung oder Umwelt sind. Dazu bilanziert man die Entropieänderung aller an einem Vorgang beteiligten Körper, wobei die Gesamtsumme der Entropieänderungen immer größer als null ist. Je geringer dieser Zuwachs ist, desto weni-

ger schädlich ist der Vorgang. Beim Berühren von heißem Metall in der Sauna ist der Gesamtzuwachs an Entropie pro Zeiteinheit groß, beim Berühren von heißem Holz dagegen recht klein. Die Vorstellung, die Entropie sei ein Schadensmaß funktioniert also auch im Saunabeispiel. Was wir tatsächlich fühlen, hat weniger mit der Temperatur zu tun, sondern mit dem Entropiestrom vom Metall in den Körper, der durch den höheren Wärmestrom beim Metall verursacht wird.

Über die Entropie wird ein thermodynamisches System unmittelbar mit seiner Umgebung verbunden, mit der es in irgendeiner Weise im Wärmeaustausch steht, denn die Entropieänderungen von System und Umgebung sind nicht voneinander unabhängig. Dies unterscheidet sie von den anderen Zustandsgrößen. Zusätzlich berücksichtigt die Entropie aber auch die Auswirkung der mechanischen (auch strömungsmechanischen) Reibung im System selbst.

Was ist ein thermodynamisches System und seine Umgebung?

Als ein thermodynamisches System bezeichnen wir ein grundsätzlich frei wählbares Raumgebiet, das eine zusammenhängende Oberfläche besitzt, die es vom Rest des Universums abgrenzt. Innerhalb des Raumgebietes befindet sich beliebig viel oder wenig Materie, die auch beliebiger Art sein darf. Alles was sich außerhalb der Grenze des Raumgebietes befindet, nennen wir die Umgebung des Systems. Die Umgebung schließt alles ein, was sich auch nur möglicherweise an einem Energie- oder Materieaustausch mit dem System beteiligen könnte. Die Grenze des betrachteten Raumgebietes heißt Systemgrenze.

Die Systemgrenze ist wie gesagt frei wählbar, einzige Bedingung ist, dass sie zusammenhängt, d.h., wenn man gedacht einen Stift an einem beliebigen Punkt der Systemgrenze ansetzt, muss man ohne den Stift abzusetzen, jeden anderen Punkt der Grenze erreichen können. Löcher im Inneren („Schweizerkäse“) sind damit zunächst genauso ausgeschlossen wie getrennte Raumgebiete. Allerdings kann man sowohl Löcher im Inneren als auch zwei getrennte Raumgebiete durch einen gedachten, unendlich dünnen „Schlauch“ verbinden, der selbst keine Materie enthält, so dass die Oberflächen verbunden sind. Das Innere eines Loches wird damit automatisch zur Umgebung dazugezählt, zwei getrennte Systeme (Raumgebiete) werden zu einem einzigen System.

Der Systemgedanke zieht sich wie ein Roter Faden durch die Thermodynamik. Es wird sich herausstellen, dass durch geschickte Wahl der Systemgrenze manches scheinbar komplizierte System recht einfach berechenbar wird. In vielen Fällen müssen sogar nur die Vorgänge an der Systemgrenze beschrieben werden, während die Vorgänge im System selbst ausgeblendet werden, also gar nicht bekannt sein müssen („black box“).

Wo finde ich, was ich in diesem Buch nicht finde?

Das vorliegende Buch soll nur die wichtigsten Grundlagen der Thermodynamik in möglichst kompakter Form darstellen. Naturgemäß werden dadurch einige Themengebiete nur am Rande, andere gar nicht behandelt. Die folgende Liste soll Ihnen Hinweise auf weiterführende Literatur geben, wenn Sie mehr wissen wollen oder sollen. Wenn Sie unter den angegebenen Stichworten (z.B. Wärme- und Stoffübertragung) suchen, finden Sie natürlich jeweils eine ganze Reihe von Büchern anderer Autoren, die Ihnen genauso weiterhelfen werden. Die folgende Liste ist also nur eine kleine Auswahl.

Allgemeine Thermodynamik Hier gibt es eine ganze Reihe von Büchern, die tiefer in die Materie eintauchen. Allen voran und stellvertretend möchte ich hier die sogenannte „Bibel“ der Thermodynamik von H. D. Baehr [Baehr und Kabelac, 2012] erwähnen. In diesem Buch findet sich sicher alles, was man im Ingenieursberuf wissen muss.

Wärme- und Stoffübertragung Die Wärme- und Stoffübertragung wird in diesem Buch gar nicht behandelt. Auch für diese Thematik gibt es ein Grundlagenwerk von H. D. Baehr und K. Stephan, das die Thematik vollständig abdeckt, [Baehr und Stephan, 2010].

Strömungsmechanik Zu dem eng mit der Thermodynamik und der Wärmeübertragung verwandten Gebiet der Strömungsmechanik gibt es vom Autor dieses Buches ein weiteres Lehrbuch [Braun, 2014].

Stoffwerttabellen, Wärmeübertragungsgleichungen Aus urheberrechtlichen Gründen sind in diesem Buch keine Stoffwerttabellen wiedergegeben. Hier verweise ich auf die mit Abstand ausführlichste und immer aktuell gehaltene Quelle, den VDI-Wärmeatlas [VDI-GVC (Hrsg.), 2013], der in deutscher und englischer Sprache (VDI Heat Atlas) erscheint. Hier finden sich ebenfalls die wichtigsten empirischen Beziehungen zur Berechnung von Wärmeübergangszahlen aus den dimensionslosen Kenngrößen („Nusseltbeziehungen“). Auch im Lehrbuch von H. D. Baehr [Baehr und Kabelac, 2012] findet sich eine Auswahl der wichtigsten Tabellen.

Dampftafeln (Wasser), maßstäbliche Diagramme Für diese Daten finden Sie im Lehrbuch von H. D. Baehr [Baehr und Kabelac, 2012] ebenfalls Tabellen. Sehr verlässliche Quelle ist weiterhin der VDI-Wärmeatlas [VDI-GVC (Hrsg.), 2013]. In einigen anderen Lehrbüchern, z.B. K. Langeheinecke [Langeheinecke (Hrsg.), 2006], wird auch ein maßstäbliches Mollier h,s -Diagramm von Wasserdampf mitgeliefert. Letzteres kann man sich auch über den Buchhandel beschaffen, z.B. von Schmidt und Grigull [Schmidt (Hrsg.), Grigull (Hrsg.) 1979]. Maßstäbliche h,s -Diagramme

von Wasser und $\log p, h$ Diagramme von Kältemitteln kann man sich bei Eingabe des entsprechenden Begriffes und des Kältemittel-Kürzels (z.B. R134a) auch aus dem Internet bei entsprechender Freigabe für den eigenen Gebrauch herunterladen. Dies gilt auch für Mollier h, x -Diagramme der feuchten Luft, sogar bei unterschiedlichen Drücken.

Übersichtswerk Maschinenbau Ein brandneues Lehrbuch, das alle Grundlagenlehrgebiete eines klassischen Maschinenbaustudiums in einem Band abdeckt, erscheint 2014 im Springer-Verlag [Skolaut (Hrsg.), 2014]. Auch der Autor dieses Buches hat zu diesem Lehrbuch ein Kapitel, die Strömungsmechanik, beigetragen. Insgesamt 20 Professoren aus ganz Deutschland, von Hannover über Dresden bis Kempten, von Aachen über Karlsruhe und Stuttgart bis München, haben die Themengebiete Technische Mechanik, Technische Thermodynamik, Strömungsmechanik, Werkstoffkunde, Maschinenelemente, Fertigungstechnik bis hin zur Elektrotechnik und Regelungsmechanik in einem Lehrbuch zusammengefasst.

2 Die Gleichgewichtspostulate und die Definition der Temperatur

Erstes Gleichgewichtspostulat

Werden zwei Körper verschiedener Wärmeszustände miteinander in Berührung gebracht (Abb. 2.1), so ändern sich ihre Zustände so lange, bis ein Wärmegleichgewicht eintritt, wenn das Gesamtgebilde aus beiden Körpern nach außen, also zur „Umgebung“ hin, wärmeisoliert ist. Danach ist dieses Gesamtgebilde (das „System“) „von selbst“, also ohne äußeren Eingriff, zu keiner weiteren Änderung mehr fähig.

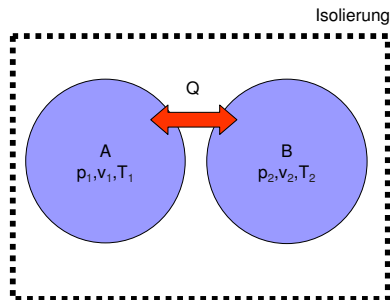


Abbildung 2.1 Wärmeaustausch zweier Körper.

Begriff der Temperatur

Wenn zwei Körper im Wärmegleichgewicht sind, d.h. wenn sie miteinander keine Wärme mehr austauschen, haben sie die gleiche Temperatur (Abb. 2.2).

Dies ist die grundlegende Definition der Temperatur und gleichzeitig Grundlage der Temperaturmessung. Das Temperaturmessgerät und der zu messende Körper müssen dazu nur lange genug in Berührung sein, bis sie keine Wärme mehr austauschen (Abb. 2.3). Die Definition der Temperatur ist vollständig vom Material der betrachteten Körper oder Temperaturmessgeräte unabhängig!

Die Temperaturdefinition erlaubt es, die Wärmeszustände aller Körper miteinander zu vergleichen und eine Reihenfolge zu definieren. Es ist nur wichtig, dass die

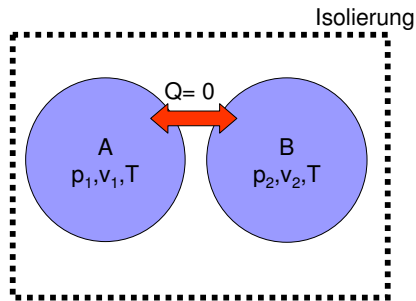


Abbildung 2.2 Wärmegleichgewicht: Die Temperatur ist gleich.

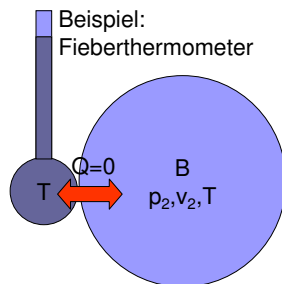


Abbildung 2.3 Wärmegleichgewicht: Grundlage der Temperaturmessung.

Wärmezustände zweier Körper mit Hilfe der Temperatur jeweils in **kleiner, größer oder gleich** eingeteilt werden können, um diese Reihenfolge aller Körper zu bilden. Eine Temperaturskala ist hierzu zwar grundsätzlich nicht erforderlich, aber in der Praxis natürlich sehr hilfreich.

Eine Skaleneinteilung der Temperatur zu definieren ist also nicht unbedingt notwendig, aber in der Anwendung des Begriffes Temperatur viel einfacher. Oder wä-