

IN DIESEM KAPITEL

Was ist Thermodynamik?

Wodurch unterscheiden sich Festkörper,
Flüssigkeiten und Gase?

Exakte Grundgleichungen der Thermodynamik

Die Stellung der Thermodynamik in der
Ingenieurwissenschaft

Kapitel 1

Warum ist die Thermodynamik wichtig

Die Thermodynamik ist deshalb wichtig, weil nur sie Auskunft über die Energiebeteiligung eines Vorgangs in Natur und Technik geben kann. Nur Energie bringt »Dinge« in Bewegung. Nur die Thermodynamik alleine lässt erkennen, unter welchen Bedingungen ein physikalischer oder chemischer Vorgang überhaupt ablaufen kann oder nicht. Nicht jeder gedachte Vorgang ist anfänglich konform mit den Gesetzen der Thermodynamik und dann gilt es, die charakteristischen Parameter zu ermitteln, welche die freiwillige Ab-
lauffrichtung des Vorgangs bestimmt. Somit kann diese Wissenschaft helfen, die äußeren Bedingungen zu finden, damit ein geplanter Vorgang verwirklicht werden kann.

Was genau ist Thermodynamik?

Das zentrale Konzept der Thermodynamik ist Energie, und die ist eine Erhaltungsgröße. Das heißt, Energie kann nicht verschwinden, sondern nur umgewandelt werden in andere Energieformen. Energie und viele Formen davon werden in der Thermodynamik hauptsächlich durch elementare Variablen wie Temperatur, Druck, Dichte, Volumen und Geschwindigkeit oder von deren Änderungen beschrieben. Die Thermodynamik befasst sich im Detail mit allen Prozessen, in denen diese Umwandlungen der Energieformen stattfinden, um zum Beispiel wirtschaftlichen Nutzen zu erzeugen. Dazu gehören die Beschreibungen der Energieträger und die Änderungen des Aggregatzustands, wenn ein Medium zum Beispiel zuerst flüssig und während eines Prozesses gasförmig wird.

28 TEIL I Die exakten Grundlagen

Mit thermodynamischen Verfahren werden Durchführbarkeit, Güte und Effizienz von Bewegungs-, Arbeits- und Wärmeprozessen geprüft und optimiert. Die Gesamtheit dieser Mechanismen wird in wissenschaftlichen Gesetzen zusammengefasst, die man in der Ingenieurwissenschaft und auch in anderen Wissenschaftsdisziplinen wie Biologie, Chemie und Physik nutzt.

Wenn zum Beispiel in einer Wärmekraftmaschine die zugeführte Wärme in abzugebender Arbeit umgewandelt werden soll, so möchte man natürlich einen maximalen Arbeitsbetrag als Nutzen erzielen. Nur die Thermodynamik alleine liefert die theoretischen Werkzeuge, dieses Ziel zu erreichen.

In der Chemie werden Reaktionen durch Erhöhung der Reaktionstemperatur beschleunigt und mithilfe der Thermodynamik kann vorausgesagt werden, welche chemischen Vorgänge nicht freiwillig ablaufen, also nicht stattfinden können. Bei allen freiwilligen Vorgängen muss eine Umwandlung der beteiligten Energie so erfolgen, dass gegenüber der Anfangsordnung »Unordnung« entsteht. Was das genau ist, wird im Kapitel 11 »Was ist Ordnung und was Unordnung« erklärt. Andererseits können günstige Reaktionsbedingungen errechnet werden, damit eine gewünschte chemische Reaktion erfolgt.

Wie kann die beteiligte Energie eines Vorgangs überhaupt festgestellt werden? Durch eine Betrachtung des Vorgangs, eines Prozesses, innerhalb eines Bilanzraumes. Im Inneren des Bilanzraumes liegt das zu untersuchende thermodynamische System, das durch seine individuelle Materie gegeben sein muss, außerhalb ist die Umgebung. Die meistens räumliche Grenze zwischen System und Umgebung ist die Systemgrenze, eine gedachte dünne Haut, durch die Energie und Masse fließen können. Diejenige Energie, die nur durch einen Temperaturunterschied zwischen System und Umgebung durch die Systemgrenze fließt, nennt man Wärme. Dabei fließt die Wärme immer in Richtung der niedrigeren Temperatur, also manchmal in den Bilanzraum hinein und manchmal heraus.

Systeme grenzen Prozesse ab

Nur in definierten Systemen werden thermodynamische Prozesse aller Art untersucht.



Was ist ein System? Ein System ist ein abgegrenzter räumlicher Bereich aus gasförmigen, flüssigen oder festen Stoffen. Im System läuft zum Beispiel ein Abkühlungsprozess ab, und der hierfür notwendige Wärmetransport wird an der Systemgrenze registriert. Wenn Wärme, Arbeit oder Masse die Systemgrenze überschreiten, so werden diese thermodynamischen Größen erfasst und bilanziert.

Selbstverständlich wird beim Austausch von Energie zwischen den angrenzenden Systemen der Einfluss von Temperatur, Druck und Volumen in Verbindung mit den Eigenschaften der verwendeten Materie und deren möglichen Umwandlungen in gasförmige, flüssige und feste Phasen berücksichtigt.

Ein Massenaustausch ist mit einer Bewegung von Materieteilchen verbunden, deshalb ist in der Thermodynamik die Mechanik und vor allem die Strömungsmechanik zum Teil mit einbezogen. Mit den daraus resultierenden Gesetzen lassen sich zum Beispiel Transportprozesse

oder Gleichgewichtszustände der Materie beschreiben. Dabei werden keine konkreten Vorstellungen über die innere Struktur der Materie benötigt. Es genügen oberflächliche Betrachtungen der beteiligten Materie, um mit den Gesetzen der Thermodynamik die verschiedenen Energieformen genau beschreiben zu können.

Wie die Temperatur die Eigenschaften der Materie verändert

Bei der klassischen Betrachtung der Materie kann die Masse eines Körpers in drei Aggregatzustände eingeteilt werden: gasförmige, flüssige und feste Materie, wie Abbildung 1.1 zeigt. Die feste Phase kann weiter unterteilt werden in amorphe und kristalline Festkörper. Kristalline Festkörper besitzen ein Kristallgitter, bei denen die Atome auf geordneten Gitterplätzen sitzen und sie nicht verlassen können. Amorphe Festkörper haben kein Kristallgitter; sie sind einer Flüssigkeit sehr ähnlich. Bekannte amorphe Stoffe sind: Teer, Kautschuk und Glas. Die moderne Physik kennt neuerdings zwei weitere allgemeine Zustände, den Plasmazustand bei sehr hohen Temperaturen und die Bose-Einstein-Kondensation bei tiefsten Temperaturen. Ein Plasma ist ein ionisiertes Gas, das aus Atomkernen und freien Elektronen im elektrisch neutralen Zustand besteht. Ein Bose-Einstein-Kondensat besteht aus sehr tief unterkühlten Teilchen (Bosonen), die sich im quantenmechanischen Zustand befinden.

Es sind oft nur Temperatur- und/oder Druckänderungen notwendig, um aus festen Stoffen flüssige entstehen zu lassen. Es ist klar, dass zum Beispiel durch Wärmezufuhr Eis schmilzt und zu Wasser wird. Dabei ändern sich die Eigenschaften der Stoffe beträchtlich. Mit der Thermodynamik können auch Fluide (zum Beispiel bei Strömungen im Überschallbereich) oder feste Körper (zum Beispiel das Ausdehnungsverhalten von Metallen) in Abhängigkeit der Temperatur untersucht werden. Dabei sind die Materialeigenschaften der einzelnen Stoffe in ihren Phasen zu berücksichtigen. In der Strömungsmechanik oder in der technischen Mechanik wird in der Regel die Temperatur konstant gehalten.



Die Strömungsmechanik beschreibt die Bewegungen von Flüssigkeiten und Gasen und das allgemeine Verhalten der Strömung infolge von Reibungseinflüssen. Sind die strömungsmechanischen Größen wie Druck, Geschwindigkeitsvektor, Dichte und Zähigkeit bekannt, so können im Strömungsfeld die Bahnen aller strömenden Teilchen berechnet werden. Damit lassen sich Aussagen über das Strömungsverhalten in technischen Rohrleitungen, bei den Umströmungen von Objekten in der Atmosphäre, bei Meeresströmungen und beim Wetter machen.



Die technische Mechanik untersucht das statische und dynamische Verhalten von Festkörpern infolge von Kräfteinwirkungen und Kraftstößen bei Schwingungsbetrachtungen. Es werden Festigkeit, Elastizität, Verformungen und Spannungsverteilungen in Festkörpern bestimmt.

Aggregatzustände

Es gibt drei Aggregatzustände: fest, flüssig und gasförmig. Wird einem Festkörper Energie in Form von Wärme zugeführt, so kann der Festkörper schmelzen. Aus Eis wird Wasser, das nur in einem bestimmten Temperaturbereich existieren kann. Dieser Temperaturbereich hängt vom Druck des Wassers ab. So kann Wasser bei einem Druck von 1 bar nur innerhalb des Temperaturbereiches von 0,01 °C bis 99,63 °C als Flüssigkeit bestehen. Unter 0,01 °C ist H₂O ein Festkörper (Eis) und oberhalb von 99,63 °C ist es ein Gas (überhitzter Wasserdampf). Diese unterschiedlichen Aggregatzustände werden durch Energieübertragung möglich gemacht, und sie sind wichtig, da im Wasser oder im Wasserdampf viel Energie gespeichert werden kann. In Kraftwerken nutzt man diese besondere Eigenschaft des Wasserdampfs. In einer Dampfturbine wird die Enthalpie des zugeführten Frischdampfs, die ein Maß für den Dampfdruck, die Dampfdichte und die Dampftemperatur ist, während der Durchströmung abgebaut auf eine kleinere Enthalpie des Abdampfes am Ausgang der Dampfturbine. Der Fachbegriff für diesen Vorgang heißt »Dampfentspannung«. Die entstandene Enthalpiedifferenz wird mit einem hohen Wirkungsgrad in der Turbine in mechanische Wellenarbeit umgewandelt. Die Welle der Dampfturbine treibt die Welle eines elektrischen Generators an, der schließlich elektrische Energie liefert.

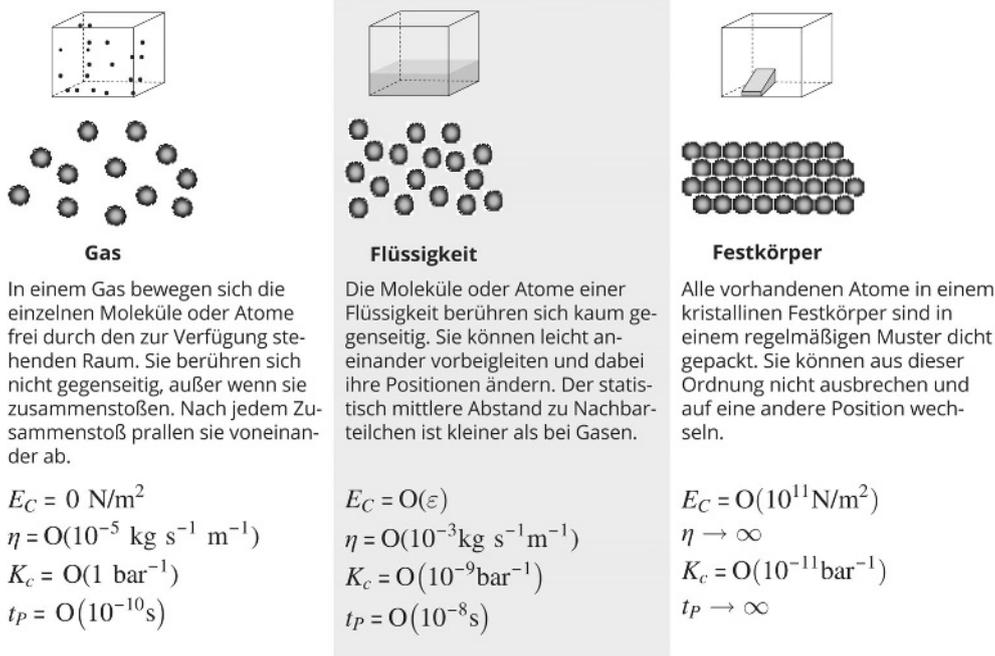


Abbildung 1.1: Vergleich der Eigenschaften von Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern. E_C = Elastizitätsmodul in N/m², η = Viskosität in kg/(m s), K_C = Kompressibilität in bar⁻¹. t_P = Platzwechselzeiten der Teilchen in Sekunden, $O(\varepsilon)$ = Ordnung ε , mit $\varepsilon > 0$ und $\varepsilon \ll 1$

In Abbildung 1.1 können Sie in einer Gegenüberstellung vergleichen, wie unterschiedlich die allgemeinen Eigenschaften der Festkörper, Flüssigkeiten und Gase sind. Neben der Zähig-

keitseigenschaft, wie schwer ein Stoff zerfließen kann, und der Kompressionseigenschaft, wie leicht ein Stoff durch Druck verdichtet werden kann, sind auch die Platzwechselzeiten zwischen Atomen oder Molekülen der Stoffe angegeben. Als Platzwechselzeit bezeichnet man die Zeitspanne, die im Mittel vergeht, bis zwei Nachbarpartikel (Atome, Moleküle) ihre Plätze infolge einer thermischen Bewegung getauscht haben. Gasteilchen tauschen ihre Plätze innerhalb von 10^{-10} Sekunden, Flüssigkeitsteilchen innerhalb von 10^{-8} Sekunden. Festkörperteilchen können ihre Plätze nicht tauschen. Mit dem Symbol $O(\dots)$ ist die Größenordnung einer Variablen gemeint. So ist bei Gasen die Kompressibilität etwa 1 bar^{-1} . Gase lassen sich durch Druckeinfluss sehr leicht verdichten, Flüssigkeiten $O(10^{-9} \text{ bar}^{-1})$ sehr schwer und Festkörper $O(10^{-11} \text{ bar}^{-1})$ dagegen extrem sehr schwer.

Die Stellung der Thermodynamik in der Ingenieurwissenschaft

In diesem Abschnitt wird gezeigt, dass sich das große Wissenschaftsgebiet »Thermodynamik« aufbauend auf der technischen Mechanik und der Strömungsmechanik entwickelt hat. Der Anfang der wissenschaftlichen Thermodynamik lag in dem Bestreben, Dampfmaschinen und Verbrennungsmotoren zu verbessern. Der Wirkungsgrad der Wärmekraftmaschinen, das sind Apparate, die Wärme in Arbeit umwandeln, wurde seitdem ständig erhöht, bis man später erkannte, dass es eine Grenze gibt. Die Feststellung dieser Grenze ist eine besondere Errungenschaft der Thermodynamik; sie wird später im Kapitel 11 durch den Begriff der Entropie veranschaulicht. Die Entropie ist nur durch die Thermodynamik begründet.

Grundgleichungen der technischen Mechanik

Die technische Mechanik beschäftigt sich mit dem Verhalten von Festkörpern unter dem Einfluss von Kräften. Elastizität, Festigkeit, Stabilität und Bewegungsvorgänge aller Art können berechnet werden. Es werden die statischen und die dynamischen Eigenschaften der starren Körper untersucht. Probleme der inneren Struktur der starren Körper werden nicht behandelt. Die klassische Mechanik lässt sich grob in drei Hauptgebiete gliedern: die Statik, die Kinematik und die Dynamik. Gleichgewichtsbedingungen und die additiven Wirkungen von Kräften gehören zur Statik. Die Kinematik untersucht die Bewegungen von Körpern, ohne die Wechselwirkungen zwischen den Körpern zu berücksichtigen. Schließlich behandelt die Dynamik den Einfluss der Wechselwirkungen von Körpern auf deren Bewegungszustand. Abgesehen von der Statik, bei der keine Bewegung eines Körpers erlaubt ist, besteht die Hauptaufgabe der Mechanik darin, die Geschwindigkeiten der Schwerpunkte in den einzelnen starren Körpern zu bestimmen und die Dichten der beteiligten Massen festzulegen.

Aus Festkörpern können Flüssigkeiten oder Gase werden; Sie müssen nur dem Festkörper Wärme zuführen, bis die Schmelztemperatur oder die Verdampfungstemperatur erreicht ist. Wissenschaftler wollen selbstverständlich auch das Verhalten von Flüssigkeiten und Gasen, die allgemein als Fluide bezeichnet werden, berechnen.

32 TEIL I Die exakten Grundlagen

$\vec{F} = m \cdot \vec{a}$	Newton'sches Grundgesetz	$\frac{d\vec{D}}{dt} = \sum \vec{M}_A$	Drehimpulssatz
$\vec{D} = J \cdot \vec{\omega}$	Drehimpuls	$\frac{d\vec{I}}{dt} = \sum \vec{F}$	Impulssatz
$\vec{I} = m \cdot \vec{u}$	Impuls	$W = E - E_0$	Arbeitssatz
$E_{\text{kin}} - E_{\text{pot}} = \text{konstant}$	Energieerhaltungssatz		

Tabelle 1.1: Grundgleichungen der Mechanik

Flüssigkeiten sind geschmolzene Festkörper, Gase sind Flüssigkeitsdämpfe

Zur Beschreibung der Bewegungen von unendlich vielen flüssigen oder unendlich vielen gasförmigen Teilchen, die sich alle durch gegenseitige Reibungseffekte beeinflussen, kommen die Grundgleichungen der Fluidodynamik zur Anwendung. Die Fluidodynamik berechnet die Geschwindigkeitsfelder, die Dichteverteilungen und die Druckfelder von unendlich vielen Teilchen in einem Strömungskontinuum. Materie- oder Stoffteilchen sind immer Atome oder Moleküle oder definierte Gruppen davon.

Fluid ist der Oberbegriff für Flüssigkeiten oder Gase. Für die Untersuchungen der Fluidodynamik wurden bis zur Jahrhundertwende in der Regel reibungslose Fluide zugrunde gelegt. Heute jedoch werden Reibungseinflüsse und Kompressibilitätseffekte berücksichtigt.

Raumausfüllung und die Kompressibilität K_C nach Abbildung 1.1 sind besondere Merkmale, die ein Fluid von einem Festkörper unterscheiden. Unter der Wirkung des Gravitationsfeldes der Erde zum Beispiel füllt die Flüssigkeit nur den unteren Teil eines Behälters aus. Wissenschaftlich gesehen bedeutet dies, dass wegen der leichten Verschiebbarkeit der Fluidteilchen ein Fluid keine Schubspannungen aufnehmen kann. Schubspannungen kennzeichnen räumliche Verzerrungen eines Körpers infolge einwirkender Kräfte. Selbst kleinste Schubspannungen führen bei Fluiden immer sofort zu Bewegungen der Fluidteilchen, aber mit diesen Bewegungen werden die einwirkenden Schubspannungen an den Teilchen sofort wieder abgebaut. Dies hat zur Folge, dass sich an Flüssigkeitsoberflächen eine horizontale Spiegelfläche ausbildet und die Flüssigkeit immer den Boden eines Gefäßes bedeckt. Weil alle Flüssigkeitsteilchen ständig mikroskopisch sehr kleine und ungeordnete Bewegungen ausführen, stoßen die Teilchen oft miteinander zusammen. Prallen die Teilchen gegen eine feste Wand, dann werden Kräfte freigesetzt, aus deren Wirkungen der statische Druck resultiert.

Brown'sche Molekularbewegung

Gase dagegen nehmen stets den ganzen Raum eines Behälters ein. Auch bei Gasen befinden sich die Moleküle oder Atome in ständigen und ungeordneten Bewegungen, so wie es die Flüssigkeitsteilchen tun. Diese ungeordnete Teilchenbewegung wird Brown'sche Molekularbewegung genannt. Je höher die Temperatur ist, desto stärker ist die Molekularbewegung. Jedes Teilchen legt dabei eine sehr kurze Strecke sozusagen im Freiflug zurück, ohne mit

einem anderen Teilchen zusammenzustoßen. Diese freie Flugstrecke wird als freie Weglänge bezeichnet. Jedes auftauchende Hindernis auf der Flugstrecke beendet den Freiflug der Teilchen. Dabei kann die freie Weglänge eines Teilchens ein Vielfaches seines mittleren Durchmessers sein. Alle Teilchenbewegungen werden durch elastische Zusammenstöße mit Nachbarpartikeln oder mit einer festen Wand in ihren Richtungen kontinuierlich verändert. Danach erfolgen erneute Freiflugbewegungen, bis wieder elastische Stöße stattfinden. Die Teilchen sind den größten Teil der Zeit so weit voneinander entfernt, dass die vorhandenen Bindungskräfte zwischen ihnen nur sehr schwach wirken können.

Ein Fluid ist ein Kontinuum

Diese Eigenschaften eines Fluids sind immer gegeben, wenn die Moleküle oder Atome so dicht gepackt sind, dass keine leeren Zwischenräume vorhanden sind. In diesem Fall liegt ein Kontinuum vor. An jedem Punkt des dreidimensionalen Raumes (x, y, z) ist stets nur ein Teilchen vorhanden. Zu jedem Zeitpunkt t kann der statische Druck $p = p(x, y, z, t)$, die Dichte $\rho(x, y, z, t)$, die Geschwindigkeit in x -Richtung $u = u(x, y, z, t)$, die Geschwindigkeit in y -Richtung $v = v(x, y, z, t)$ und die Geschwindigkeit eines jeden Teilchens in z -Richtung $w = w(x, y, z, t)$ theoretisch festgestellt werden. Die Funktionen p , ρ , u , v und w werden Feldgrößen genannt, denn sie beschreiben das Strömungsfeld des Fluids.

Zur Dichtebeständigkeit der Fluide

Jede Flüssigkeit besitzt einen sehr großen Widerstand gegenüber einer Volumenverkleinerung. Gegenüber atmosphärischen Bedingungen verkleinert sich das Volumen einer beliebigen Flüssigkeit im Mittel nur etwa 0,5 %, wenn der Druck um 1000 bar erhöht wird. Daraus lässt sich schließen, dass sich alle Flüssigkeiten praktisch nicht durch Druckkräfte verdichten lassen. Der Temperatureinfluss auf die Dichte einer Flüssigkeit ist gering. Wir merken uns, die Dichte ρ einer Flüssigkeit ist praktisch konstant. Im Gegensatz dazu können Gase jedoch relativ leicht durch Druck- und Temperatureinflüsse verdichtet werden. Gase sind kompressibel und die Dichten ρ der Stoffe sind Feldgrößen $\rho = \rho(x, y, z, t)$ und können vom Ort x, y, z und von der Zeit t abhängen.



Die Dichte ρ einer Flüssigkeit ist konstant, wenn sich Temperatur und Druck der Flüssigkeit nicht ändern. Ändert sich die Temperatur einer Flüssigkeit, verändert sich ihre Dichte nur minimal. Ändert sich der Druck einer Flüssigkeit, so ändert sich die Dichte auch nur geringfügig, da wir aber nur mit moderaten Drücken arbeiten, nehmen wir vereinfacht an, dass dann die Dichte konstant bleibt. Jedoch die Dichte eines Gases kann sich durch eine Druck- oder Temperaturänderung stark ändern. Praktisch gesehen heißt das: Flüssigkeiten sind im Rahmen dieses Buches immer inkompressibel (Dichte $\rho = \text{konstant}$). Gase sind immer kompressibel (Dichte ρ ist nicht konstant und kann von Ort und Zeit abhängen).

Grundgleichungen der Strömungsmechanik

Flüssigkeiten haben freie Oberflächen, Gase nicht. Flüssigkeiten und Gase bestehen aus unendlich vielen Teilchen und es lassen sich auf alle Teilchen die Gesetze der Mechanik nur

34 TEIL I Die exakten Grundlagen

dann anwenden, wenn die Beschreibung der Teilchen mit Feldgrößen erfolgt. Dies führt zu vier Grundgleichungen der Fluidodynamik. Diese sind: die Kontinuitätsgleichung und drei Bewegungsgleichungen für die drei Raumrichtungen x , y und z , die zusammengefasst als Navier-Stokes-Gleichungen bezeichnet werden. Im Kapitel 2 können Sie mehr über diese sehr komplizierten Differentialgleichungen erfahren.

Die Kontinuitätsgleichung sagt im Rahmen der Thermo- und Fluidodynamik aus, dass sich die Masse eines Fluids nie ändert. Deshalb ist die bewegte Masse pro Zeiteinheit, also der Massenstrom, konstant. Dies ist der Erhaltungssatz der Masse, der in Kapitel 2, Abschnitt »Kontinuitätsgleichung oder Erhaltungsgleichung für die Masse« begründet wird.

Gibt es für Temperaturfelder auch eine Grundgleichung?

Ja, hierfür gibt es eine partielle Differentialgleichung, die das Fach Thermodynamik zum höchsten Schwierigkeitsgrad erhebt. Das hochgesteckte Ziel der Thermodynamik ist es, die orts- und zeitabhängigen Geschwindigkeitsfelder u , v , w , die Dichteverteilungen ρ , die Druckverteilungen p und die Temperaturfelder $T(x,y,z,t)$ von unendlich vielen Teilchen in einem definierten System zu berechnen. Die Druck- und Geschwindigkeitsfelder werden durch die Kontinuitätsgleichung und den drei Navier-Stokes-Gleichungen beschrieben, jedoch ist für die Temperaturverteilung in einem bewegten Medium eine weitere Grundgleichung nötig. Diese zentrale Grundgleichung für die absolute Temperatur T kommt aus der Thermodynamik und wird als Gleichung für das Temperaturfeld bezeichnet. Im Kapitel 2 stelle ich Ihnen diese allgemeine Differentialgleichung für die Temperaturfelder vor.

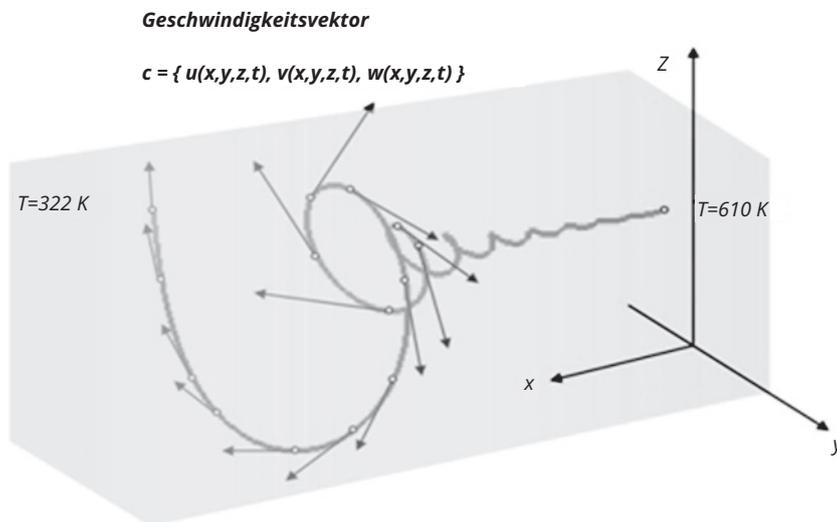


Abbildung 1.2: Eine einzelne Stromlinie von vielen in einem Wirbelfeld einer Flamme. Ein 610 Kelvin heißes Gasteilchen verlässt eine Düse in x -Richtung und ist im Strömungsfeld eines Wirbels gefangen. Gleichzeitig ist das vektorielle Strömungsfeld mit einem skalaren Temperaturfeld einer Flamme gekoppelt, sodass das Teilchen auf seinem Weg durch das gekoppelte Feld ständig seine Bewegungsrichtung und seine Temperatur ändern muss. Längs seiner spiralförmigen Bahn kühlt sich das Teilchen ab und seine Dichte steigt.

Mit der Gleichung für das Temperaturfeld werden auch alle stationären und instationären Wärmeleitungsvorgänge exakt beschrieben. Für die Lösung des Temperaturfeldes $T(x,y,z,t)$ werden sowohl die Lösungen der Geschwindigkeitsfelder $u(x,y,z,t)$, $v(x,y,z,t)$ und $w(x,y,z,t)$ als auch die Lösung des Druckfeldes $p(x,y,z,t)$ und die Dichteverteilung $\rho(x,y,z,t)$ aus den Navier-Stokes-Gleichungen benötigt. Ferner müssen Rand- und Anfangsbedingungen eingehalten werden. Selbstverständlich ist jetzt das ganze Differentialgleichungssystem komplizierter geworden. Selbst ein hierfür eigens gebauter Supercomputer kann zurzeit nur Näherungslösungen präsentieren. Oft werden die druck- und temperaturabhängigen Stoffwerte wie die Dichte ρ , Wärmeleitfähigkeit λ , spezifische Wärmekapazität c_p , dynamische Zähigkeit μ und die kinematische Zähigkeit $\nu = \mu/\rho$ konstant gehalten, um überhaupt nachprüfbare Näherungslösungen erhalten zu können.

Ganzheitliche Betrachtung der Grundgleichungen

Bei allen Problemen müssen Stoffbeziehungen zusätzliche Gleichungen liefern, um in Verbindung mit den Differentialgleichungen der Thermodynamik das gesamte Differentialgleichungssystem so zu schließen, dass die Anzahl der unbekannteten Feldfunktionen mit der Anzahl der Differentialgleichungen übereinstimmt. Je genauer die Stoffbeziehungen oder Materialgleichungen das Fluid in seiner Phase beschreiben, desto höher und besser ist der numerische Vorhersagegrad für das Verhalten des Stoffes während eines Prozesses.



Die Thermodynamik ist bestrebt, die Stoffeigenschaften eines Fluids als Funktion von Zustandsgrößen zu erfassen und miteinander zu korrelieren. Es werden gut formulierte mathematische Gleichungen verlangt, welche die verwendeten Stoffe in den entsprechenden physikalischen Phasen in einem möglichst großen Anwendungsbereich beschreiben. Derartige Gleichungen heißen Materialgleichungen oder Stoffgleichungen. Zum Beispiel ist das bekannte Hooke'sche Gesetz eines Festkörpers $\sigma = E\varepsilon$ eine einfache Materialgleichung, die erst kompliziert wird, wenn zusätzlich berücksichtigt wird, dass der Elastizitätsmodul E (Young'scher Modul) eine Funktion der Temperatur und nicht mehr konstant ist.

Bis hierher haben Sie eine kurze und allgemeine Übersicht über das große Fachgebiet der Thermodynamik erhalten. Sie haben etwas über die wissenschaftlichen Grundgleichungen erfahren, und sicherlich fragen Sie sich, wie man damit umgehen und arbeiten kann. Fundamentale mathematische Kenntnisse sind notwendig, um nur die vereinfachten Grundgleichungen lösen zu können. Aber die Grundgleichungen können Ihnen Ideen liefern, wie Experimente angegangen werden müssen, um in Versuchen die wahren »Antworten der Natur« verstehen zu können. Die experimentellen Ergebnisse aus richtig durchgeführten Versuchsmessungen sind die wahren Antworten der Natur auf die speziellen Fragen, die durch die speziellen Versuche ausgesprochen werden.

Lesen Sie das nächste Kapitel, wenn Sie tiefer in die wissenschaftliche Denkweise eindringen möchten. Danach ist die mathematische Thermodynamik der Felder abgeschlossen, und die für Ingenieure, Physiker und Chemiker wichtigen Hauptsätze der Thermodynamik werden vorgestellt. Hierzu wird die übliche Mathematik angewandt. Aber zuvor noch einige Erklärungen zu den wissenschaftlichen Grundgleichungen der Thermodynamik und einige Beispiele für angehende Wissenschaftler.

