BEITRAG DES GRUNDLAGENFACHS TECHNISCHE THERMODYNAMIK ZUR THEMATIK TECHNISCHE BILDUNG FÜR EINE NACHHALTIGE ENTWICKLUNG

Christian Karcher
Technische Universität Ilmenau, christian.karcher@tu-ilmenau.de

Abstract 1 *Die Technische Thermodynamik versteht sich heutzutage als eine allgemeine Energielehre. In vielen Ingenieurstudiengängen gilt sie als Grundlagenfach, dem die Aufgabe zukommt, den Studierenden die vielfältigen Umwandlungsmöglichkeiten von Energieformen aufzuzeigen. Des Weiteren werden die Studierenden über die Einschränkungen bei den Umwandlungsprozessen unterrichtet, anhand derer sie die Effizienz der Prozesse beurteilen können. Die Aussagen der Thermodynamik sind methodisch in vier Hauptsätzen zusammengefasst. Trotz dieses klaren inhaltlichen Aufbaus ist die Technische Thermodynamik bei vielen Studierenden ein eher unbeliebtes Fach, wohl, weil die sichere Beherrschung abstrakter, fachspezifischer Größen wie Entropie und Exergie notwendig ist. Der vorliegende Beitrag setzt sich zum Ziel zu zeigen, dass die Kernaussagen der Thermodynamik mit dem Gedanken der Nachhaltigkeit verknüpft sind. Dadurch ist fundiertes Fachwissen in dieser Disziplin von zentraler Bedeutung für die Umsetzung nachhaltiger Ansätze in der Anwendung. Alle künftigen technischen Lösungsvorschläge im Rahmen der viel zitierten Energiewende kommen an dem grundlegenden Verständnis der thermodynamischen Zusammenhänge nicht vorbei. Weiterhin wird anhand von Praxisbeispielen analysiert, welche Herausforderungen sich daraus für die Lehre in der universitären Ingenieurausbildung ergeben. Neben den klassischen Lehrinstrumenten wie Vorlesung und Seminarübung sind auch Erfahrungssammlung durch Laborversuche und Exkursionen wichtige Schritte im Lernprozess.*

Keywords *Technische Thermodynamik, Hauptsätze, Entropie, Exergie, Nachhaltigkeit*

Abstract 2 *Nowadays, Engineering Thermodynamics is seen as a universal science of energy. As a fundamental discipline established in many engineering courses, Engineering Thermodynamics teaches students in the conversion of the various forms of energy. Moreover, within this subject, students are instructed in the restrictions during the conversion processes. Herewith, the students will be qualified to evaluate the efficiency of such processes. The statements of thermodynamics are summarized methodically in four basic laws. Despite this clear structure of content, among students, Engineering Thermodynamics is more likely an unpopular course. Probably because sure command of abstract, subject-specific quantities like entropy and exergy is necessary. This paper aims to show that the basic laws of thermodynamics are interconnected with the principles of sustainability. Therefore, sound expertise in this discipline is essential for the implementation of sustainability in the engineering application. All future solutions proposed in the context of the much-quoted energy turnaround, have to be based on the fundamentals of thermodynamics. Additionally, based on practical examples, the present study analyzes the challenges resulting from that in the engineering education at a university level. Besides the classical teaching instruments lecture and exercise, also gain of experience via laboratory work and excursions are essential steps in the education process.*

Keywords *Engineering Thermodynamics, basic laws, entropy, exergy, sustainability*

EINLEITUNG

Im Zuge umweltproblematischer Aspekte bei der Energiebereitstellung und stark steigender Verbraucherpreise für Energie durch Ressourcenverknappung kommt dem nachhaltigen Handeln speziell auf dem Energiesektor eine tragende Rolle zu. An Ingenieur/innen ergeht dadurch die Anforderung, energetische Prozesse so zu gestalten, dass sie ökologisch und ökonomisch möglichst «effizient» und «nachhaltig» sind. Das ingenieurwissenschaftliche Grundlagenfach Technische Thermodynamik bietet die Möglichkeit, den unbestimmten Begriff Nachhaltigkeit anhand der Zustandsgröße «Entropie» sowie der Prozessgrößen «Entropieerzeugung» und «Exergievernichtung» zu interpretieren. Daraus lassen sich für Ingenieur/innen direkt grundlegende Prinzipien und konkrete Maßnahmen für technisches Handeln für eine nachhaltige Entwicklung ableiten. Die maßgebenden Größen können durch die Auswertung der Hauptsätze der Thermodynamik berechnet werden.

Bei der universitären Ingenieurausbildung stellt sich die Herausforderung, die oben genannten, nicht direkt messbaren und mit Kunstworten bezeichneten Größen Entropie für «Wendung» [Clausius (1850)] und Exergie für «technische Arbeitsfähigkeit» [Rant (1956)] so einzuführen und zu definieren, dass die Studierenden deren Wichtigkeit erkennen. Die Begriffe sollen in der späteren Praxis sicher angewandt werden können und die Grundgedanken von Nachhaltigkeit verinnerlicht sein. Hierzu gibt es je nach Lehrverständnis verschiedene didaktische Ansätze. Im vorliegenden Beitrag stellt der Verfasser anhand ausgesuchter Beispiele seine Vorgehensweise vor, die von den Studierenden der Technischen Thermodynamik an der TU Ilmenau positiv aufgenommen wurde.

Der Beitrag gliedert sich wie folgt. Im nächsten Kapitel werden die Hauptsätze der Thermodynamik vorgestellt und ihre Relevanz zum Verständnis des Begriffs der Nachhaltigkeit aus Sicht des Verfassers dargelegt. Der danach folgende Abschnitt soll anhand der scheinbar trivialen Größe Temperatur aufzeigen, welche Schwierigkeiten sich in der Lehre bei der physikalisch korrekten Definition von thermodynamischen Größen ergeben können. Des Weiteren werden die Größen Entropie und Exergie betrachtet. Abschließend sei ein Plädoyer dafür abgegeben, dass ein umfassendes Verständnis für thermodynamische Zusammenhänge nur dadurch erworben werden kann, wenn im Ausbildungsgang auch Erfahrungsgewinn durch Laborpraxis und Exkursionen verwurzelt sind. Im Schlusskapitel werden die wesentlichen Punkte zusammengefasst. Es sei vorab darauf hingewiesen, dass bewusst auf vollständige mathematische Formulierungen verzichtet wird. Diese sind in gängigen Lehrbüchern [Moran, Shapiro (2005)] dokumentiert.

HAUPTSÄTZE DER THERMODYNAMIK UND IHR BEZUG ZUR THEMATIK NACHHALTIGKEIT

Nullter Hauptsatz

Der nullte Hauptsatz trifft eine Aussage über das thermische Gleichgewicht von thermodynamischen Systemen: Ist System A im Gleichgewicht mit System B und System B im Gleichgewicht mit System C, dann gilt, dass System A auch im thermischen Gleichgewicht mit System C ist. Der nullte Hauptsatz bildet die Grundlage der Messtechnik. Man denke sich beispielsweise System B als Thermometer, mithilfe dessen die thermischen Zustände von A und C verglichen werden können, ohne dass dabei A und C in direkten Kontakt gebracht werden müssen.

Der Bezug zur Nachhaltigkeit ergibt die Folgerung, dass sich selbst überlassene Systeme - wie A und B im obigen Beispiel - inhärent einen Gleichgewichtszustand anstreben. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass technische Prozesse nur ablaufen können, wenn ein treibender Mechanismus - man spricht von einem thermodynamischen Potenzial - vorliegt. Ein solches Potenzial wird technisch gesehen

beispielweise von Temperatur- und Druckgradienten oder auch einem Gradienten in der chemischen Zusammensetzung gebildet. Dieses Potenzial kann mit dem Begriff «Ressource» belegt werden.

Erster Hauptsatz

Der erste Hauptsatz trifft eine Aussage über die Zustandsgröße innere Energie U. Er besagt, dass sich bei einer Zustandsänderung $1 \rightarrow 2$, durch die ein geschlossenes System von einem Ausgangszustand 1 in einen Endzustand 2 geführt wird, die Änderung $\Delta U = U_2 - U_1$ der inneren Energie mit Zufuhr oder Abfuhr der Prozessgrößen Arbeit W und Wärme Q verbunden ist. Hierzu muss das System folglich in energetische Wechselwirkung mit seiner Umgebung treten. Die Aussage ist als Energieerhaltungssatz bekannt. Er ist allgemein gültig, sofern man kinetische, potenzielle und elektromagnetische Energie über ihre entsprechenden Arbeitsäquivalente definiert. Er schließt damit auch den Energiesatz der Mechanik als einfachen Sonderfall mit ein. Die innere Energie umfasst die Anteile aufgrund der molekularen Bewegung der im System enthaltenen Masseteilchen, der chemisch gebundenen Energie und der Kernbindungsenergie. Die innere Energie ist ein thermodynamisches Potenzial, durch dessen Änderung die technisch relevanten Prozesse angetrieben werden.

Der Bezug zur Thematik Nachhaltigkeit ist offensichtlich: Energie kann weder erzeugt noch vernichtet, sondern nur umgewandelt werden. Die innere Energie stellt die endliche, natürliche Ressource dar, die bei der technischen Bereitstellung von Nutzarbeit W oder Nutzwärme Q stetig aufgebraucht wird. Angewandt auf das geschlossene System Erde bedeutet dies, dass diese Ressource nur durch solare Einstrahlung gespeist beziehungsweise regeneriert werden kann.

In der Ingenieurtechnik sind zwei Umwandlungsketten von besonderem Interesse.

(i) In Wärmekraftprozessen wird via $\Delta U \Rightarrow Q$ zunächst Prozesswärme bereitgestellt, die anschließend via $Q \Rightarrow W$ in mechanische Nutzarbeit als Zielgröße umgewandelt wird.

(ii) In Kälte- und Wärmepumpenprozessen erfolgen die Schritte in umgekehrter Folge, also $\Delta U \Rightarrow W$ und $W \Rightarrow Q$. Hier ist die Kälte/Wärme Q die technische Nutz- bzw. Zielgröße.

Das Symbol $\Rightarrow$ soll verdeutlichen, dass die Umwandlungen in der Regel unvollständig erfolgen. Die Ressource ist somit nicht in vollem Maße technisch verwertbar. Beispielsweise verbleiben bei der Gesamtkette $\Delta U \Rightarrow W$ eines Wärmekraftprozesses stets energetische Anteile, die aus technischer Sicht «wertlos» sind. In der Anwendung werden die Umwandlungsketten $Q \Rightarrow W$ und $W \Rightarrow Q$ in Kreisprozessen realisiert. Die Energieerhaltung bedingt, dass beispielsweise in der Kette $Q \Rightarrow W$ der Anteil der zugeführten Prozesswärme Q_{in}, der nicht in Nutzarbeit W gewandelt werden kann, als Restwärme Q_{out} abgeführt werden muss. Es gilt folglich $W = Q_{in} - Q_{out}$. Als notwendige Wärmesenke dient in großtechnischen Anlagen die natürliche Umgebung, also Atmosphäre, Hydrosphäre und Lithosphäre. Da auch die generierte mechanische Arbeit bei ihrer Nutzung schlussendlich dissipiert wird, bedeutet dies, das jedweder Ressourcenverbrauch ΔU letztlich unvermeidbar zur Erhöhung des Wärmezustands der Umgebung beiträgt. Damit lassen sich nun die eingangs unbestimmt verbliebenen Begriffe «effizient» und «nachhaltig» vorerst näher fassen. Im rein thermodynamischen Sinne sind Prozesse effizient und damit nachhaltig, wenn die Nutzen-Aufwand-Verhältnisse $W/\Delta U$ bei Wärmekraftprozessen und $Q/\Delta U$ bei Kälte- und Wärmepumpenprozessen hoch sind. Die Ressourcen werden dann geschont und die Rückwirkungen auf die Umwelt verringert.

Zweiter Hauptsatz

Der zweite Hauptsatz trifft eine Aussage über die Zustandsgröße Entropie S. Er besagt, dass in einem geschlossenen System, das die Zustandsänderung $1 \rightarrow 2$ durchläuft, die Änderung $\Delta S = S_2 - S_1$ der

Entropie durch Wärmezufuhr oder Wärmeabfuhr sowie durch die Prozessgröße Entropieerzeugung σ erfolgt. Die Wärmeübertragung zwischen System und Umgebung findet dabei bei einer bestimmten Temperatur T statt. Die Entropieerzeugung σ rührt von irreversiblen, dissipativen Vorgängen im Systeminnern her. Es gilt $\sigma \geq 0$. Entropie ist somit keine Erhaltungsgröße. Sie kann nur erzeugt, aber nicht vernichtet werden. Der Grenzfall $\sigma = 0$ kennzeichnet ideale Prozesse, die jedoch technisch nicht verwirklicht werden können. Für alle realen Prozesse gilt stets $\sigma > 0$.

Um den Bezug zur Thematik Nachhaltigkeit abzuleiten, sei an dieser Stelle ein idealer Wärmekraftprozess mit $\sigma = 0$, der sogenannte Carnot-Prozess [Carnot (1872)], diskutiert. Die Zufuhr der Prozesswärme Q_{in} erfolgt hier bei der konstanten hohen Temperatur T_H. Dadurch wird dem Prozess auch Entropie zugeführt. Die Abfuhr der Restwärme Q_{out} und damit der Entropie erfolgt bei einer entsprechend niedrigen Temperatur T_C, welche nach unten durch die herrschende Umgebungstemperatur T_∞ beschränkt ist. Die Auswertung des ersten und zweiten Hauptsatzes liefert die einfachen Beziehungen $W = Q_{in} \cdot (1 - T_C/T_H)$ und $Q_{in}/T_H = Q_{out}/T_C$. Die thermodynamische Effizienz bei diesem Wandlungsprozess $Q_{in} \Rightarrow W$ ist der Carnot-Wirkungsgrad $\eta_{Carnot} = 1 - T_C/T_H$. Dieser Wirkungsgrad ist die höchst mögliche Effizienz, die bei einem Wärmekraftprozess erreicht werden kann, der mit den Temperaturniveaus T_H und T_C arbeitet. Es kann die «goldene Regel» abgeleitet werden, dass die Wärmezufuhr bei möglichst hoher Temperatur T_H erfolgen soll, um einen thermodynamisch effizienten Betrieb zu gewährleisten. Zugleich ist ersichtlich, dass die Wärmezufuhr der limitierende Faktor hinsichtlich Prozesseffizienz ist. Um eine Vorstellung von der Größenordnung zu erhalten, sei hier ein Zahlenbeispiel angegeben, das sich auf einen Dampfkraftprozess mit dem Arbeitsmedium Wasser bezieht. Über solche Prozesse wird der Großteil der elektrischen Energie bereitgestellt. Mit $T_H = 600$ K und $T_C = 300$ K ergibt sich $\eta_{Carnot} = 50$ %.

In realen Prozessen werden zum Teil deutlich geringe Werte von nur ungefähr $\eta_{real} = 40$ % erreicht, da die Wärmezufuhr rein technisch bedingt nicht bei einer konstanten Temperatur erfolgen kann, sondern das Arbeitsmedium bei konstantem Druck in drei Schritten zunächst auf Siedetemperatur erwärmt, danach verdampft und schließlich noch stark überhitzt wird. Dadurch ergibt sich insgesamt eine niedrigere mittlere Temperatur der Wärmezufuhr als bei Carnotscher Prozessführung, da der Dampfüberhitzung bei hohen Drücken werkstofftechnische Grenzen gesetzt sind. Hinzu kommen im realen Betrieb noch unumgängliche, aber eher kleinere Verluste durch Entropieproduktion aufgrund irreversibler Vorgänge in den mechanischen Bauteilen Dampfturbine und Speisewasserpumpe. Es ist jedoch hervorzuheben, dass die reale Prozessführung von Ingenieur/innen wohl gewählt wird. Es ergeben sich etliche erhebliche Vorteile, die den Prozess ingenieurtechnisch gesehen sogar nachhaltiger als den idealen Vergleichsprozess nach Carnot gestalten. Zum einen wird in der Praxis durch regenerative Methoden wie Speisewasservorwärmung und Wiedererhitzung die Wärmezufuhr an den Carnot-Fall angenähert. Zum anderen ist der mechanische Verschleiß in der Dampfturbine deutlich geringer, da das Arbeitsmedium bei der Expansion weitgehend gasförmig vorliegt und nicht wie im Carnot-Fall ein Zweiphasengemisch aus Dampf und Flüssigkeit vorherrscht. Somit wird der erodierend wirkende «Tropfenschlag» auf die thermisch und mechanisch hochbelasteten Turbinenschaufeln vermieden. Als weiteres Kriterium kommt hinzu, dass die reale Prozessführung bei vergleichbarem technischen Aufwand eine deutlich größere mechanische Nettoleistung abwirft, was die Gestehungskosten drastisch senkt. Neben der Dampfüberhitzung trägt hierzu auch der Umstand bei, dass das Arbeitsmedium bei der Kompression vollständig in Flüssigphase vorliegt. Dadurch benötigt die Speisewasserpumpe nur eine sehr geringe Antriebsleistung. Dagegen fallen bei Carnotscher Prozessführung hohe Kompressionsleistungen an, da ein Nassdampfgemisch auf den Eintrittsdruck der Turbine gebracht werden muss. Hier überwiegen demnach insgesamt gesehen die ökonomischen Aspekte den Beitrag des Wirkungsgrads zum Begriff der Nachhaltigkeit. Detaillierte Untersuchungen zu dieser Thematik werden in der Spezialdisziplin «Thermoökonomie» [Bryant

(2012)] durchgeführt. Hierbei ist das Ziel, Wärmekraftprozesse anhand der Kalkulationsfunktion Gesamtkosten pro bereitgestellter Kilowattstunde zu optimieren. Die Gesamtkosten schließen dabei Anlagekosten, Betriebskosten, Betriebsmittelkosten und Instandhaltungskosten sowie finanzielle Aufwendungen für Recycling, Entsorgung und Einhaltung von Umweltauflagen mit ein.

Der Bezug des zweiten Hauptsatzes zur Nachhaltigkeit ist noch weitreichender. Da bei realen Prozessen stets Entropie erzeugt wird, laufen in einem sich selbst überlassenen System alle Zustandsänderungen nur in Richtung zunehmender Entropie ab. Der Prozess wird solange getrieben, bis das Entropiemaximum erreicht ist. Hier stoppt der Vorgang von alleine in einem thermodynamischen Gleichgewichtszustand. Diesen Endzustand kann das System ohne Energiezufuhr von außen nicht mehr eigenständig verlassen, sondern es wird für immer in diesem verharren. Diese Überlegung stellt die Verknüpfung zum bereits diskutieren nullten Hauptsatz her. Einfache technische Beispiele für solche irreversiblen, dissipativen Abläufe sind die adiabaten Ausgleichsprozesse von Temperatur, Druck und Stoffzusammensetzung, die alle unter stetigem Abbau des Ausgangsgefälles und Entropieerzeugung ablaufen. Dabei wird das System kontinuierlich seine potenzielle Fähigkeit verlieren, mechanische Arbeit zu generieren. Während der Prozesse findet demnach eine stetige «Exergievernichtung» statt. Das System strebt automatisch in einen Zustand, in dem seine Exergie ein Minimum annimmt. Bezogen auf das abgeschlossene System Weltall lässt sich folgern, dass sich nach gängiger Theorie in zwar sehr ferner, aber absehbarer Zukunft ein Zustand maximaler Entropie einstellen wird, bei dem alle natürlichen Ressourcen erschöpft sind und die Exergie null wird. Dann verliert auch der Zeitbegriff seine Sinnhaftigkeit als die Richtung zunehmender Entropie.

Dritter Hauptsatz

Der dritte Hauptsatz trifft die Aussage, dass im absoluten Nullpunkt bei T = 0 K die Entropie null ist [Nernst (1905)]. Um den Bezug zum Begriff der Nachhaltigkeit zu beleuchten, wird die Aussage mit denen des ersten und zweiten Hauptsatzes verknüpft. Es ergibt sich der Schluss, dass beispielsweise ein Kälteprozess, dessen Aufgabe darin bestünde, einem Körper seine gesamte Entropie zu entziehen, einen unendlich großen Ressourcenbedarf benötigt. Die Effizienz eines solchen Prozesses, die sich anhand seiner Carnotschen Leistungsziffer gemäß $\varepsilon_{Carnot} = T_C/(T_H - T_C)$ beurteilen lässt, wäre null. Der dritte Hauptsatz postuliert somit die Unerreichbarkeit des absoluten Nullpunkts.

Tieftemperaturprozesse laufen zwar sehr energieintensiv ab, tragen aber trotzdem ein gewisses Potenzial für nachhaltiges Handeln in sich. In einigen Anwendungen werden sie zur Energiespeicherung [Rummich (2009)] genutzt. Es lässt sich ein Wärmekraftprozess schalten, wobei nun die Umgebung mit T_∞ = 300 K die Wärmequelle und die Speichersubstanz wie beispielsweise flüssige Luft bei T_C = 100 K die Wärmesenke bilden. Der Carnot-Wirkungsgrad des Prozesses wäre $\eta_{Carnot} = 1 - T_C/T_\infty$ = 66.7 %. Bei tiefen Temperaturen tragen Substanzen somit eine hohe technische Arbeitsfähigkeit, also Exergie in sich. Der Speicherwirkungsgrad, bestehend aus der Effizienz ε_{Carnot} der Kälteerzeugung und der Effizienz η_{Carnot} der späteren Rückumwandlung in Arbeit, betrüge jedoch nur $\eta_{Speicher} = T_C/T_\infty$ = 33.3 %. Es ist somit für eine thermodynamisch nachhaltigere Energiespeicherung sinnvoller, das Konzept der Carnot-Batterie [Dumont, Frate, Pillai, Lecompte, De paepe, Lemort (2020)] zu verfolgen. Hierbei wird aus fluktuierenden regenerativen Quellen erzeugter Strom dadurch gespeichert, dass dieser zunächst durch einen idealen Wärmepumpenprozess mit der Leistungsziffer $\varepsilon_{Carnot} = T_H/(T_H - T_C)$ in Wärme umgewandelt wird. Die Wärme wird dann als innere Energie in einen thermischen Speicher abgelegt. Bei Bedarf wird schließlich über einen idealen Wärmekraftprozess rückverstromt. Die Be- und Entladevorgänge können durch die Kette $W_{in} \Rightarrow Q_{in} \Rightarrow \Delta U \Rightarrow Q_{out} \Rightarrow W_{out}$ symbolisch dargestellt werden. Im betrachteten Idealfall ergäbe sich $W_{in} = W_{out}$. Somit betrüge der Speicherwirkungsgrad 100 %. Jedoch unterliegt auch die Energiespeichertechnik den Zwängen der

Thermoökonomie. Letztendlich werden sich nur solche Konzepte durchsetzen, bei denen die Kalkulationsfunktion Gesamtkosten pro gespeicherter Kilowattstunde möglichst niedrige Werte annimmt.

HERAUSFORDERUNGEN IN DER LEHRE

Die bisherigen Überlegungen fußten auf dem Gebrauch der Begriffe Temperatur, Entropie und Exergie, welche speziell in der Lehre einer scharfen, aber auch verständlichen Definition bedürfen, um den Studierenden die Gedanken der thermodynamischen Interpretation von Nachhaltigkeit zu vermitteln. Häufig gestellte Fragen der Studierenden in Vorlesung und Seminar sind: Was ist eigentlich Temperatur? Was ist eigentlich Entropie? Was ist eigentlich Exergie? Im Folgenden wird ein Konzept vorgestellt, um auf diese schwierigen, aber vollauf berechtigten Fragen Antworten geben zu können.

Was ist Temperatur?

Aus Sicht des Verfassers ist diese Frage zugleich die schwierigste, da die gegebenen Antworten je nach Fachgebiet des/der Befragten variieren. Typische Antworten könnten sein:

Thermodynamiker/in: «Die Temperatur ist eine intensive Zustandsgröße, die durch die partielle Ableitung der inneren Energie nach der Entropie bei konstantem Volumen definiert ist».

Messtechniker/in: «Die Einheit der Temperatur ist das Kelvin. Dabei ergibt 1 Kelvin, multipliziert mit der Boltzmann-Konstanten k_B einen Energiewert von genau $1.380649 \cdot 10^{-26}$ Kilojoule».

Physiker/in: «Die Temperatur ist das Quadrat der mittleren Teilchengeschwindigkeit, dividiert durch $3 \cdot R$, wobei R die spezifische Gaskonstante ist».

Mathematiker/in: «Der Kehrwert der Temperatur 1/T ist ein Euler-Multiplikator für das unvollständige Differential δQ und definiert dadurch das vollständige Differential dS einer Variablen, die Entropie genannt wird.».

Ingenieur/in: «Die Temperatur ist eine Größe, die den Wärmezustand eines Systems beschreibt».

Prinzipiell sind alle Antworten korrekt, tragen aber zu einer gewissen Verwirrung der Studierenden bei und werfen neue Fragen oder Nachfragen auf. Aus den Antworten ist ersichtlich, dass sie sich direkt oder indirekt - k_B entspricht einer Teilchenentropie, und R ist über die spezifischen Wärmekapazitäten an die Entropie gekoppelt - auf die Entropie beziehen. Der Verfasser bevorzugt in seinen Lehrveranstaltungen die erstgenannte, thermodynamische Antwort. Diese bedingt jedoch, dass die innere Energie - wie oben bereits gezeigt - als thermodynamisches Potenzial und die Entropie - wie anschließend vorgestellt - als Zustandsgröße eingeführt und definiert werden. Bis dahin leistet jedoch auch die eher pragmatische ingenieurtechnische Antwort gute Dienste.

Was ist Entropie?

Aus Sicht des Verfassers eignet sich für die Beantwortung der Frage ein einfaches Gedankenexperiment, bei dem der Temperaturausgleich zweier Festkörper gleicher einheitlicher Stoffzusammensetzung und gleicher Masse betrachtet wird. Zu Beginn des Experiments befindet sich Körper 1 in einem Wärmezustand, dem der Temperaturwert T_1 zugewiesen wird. Der Wärmezustand von Körper 2 wird analog durch die Temperatur T_2 mit $T_2 < T_1$ beschrieben. Die Körper sind gegenüber ihrer Umgebung thermisch isoliert. Es liegen somit adiabate Bedingungen vor. Nun werden die beiden Körper in Kontakt gebracht und sich selbst überlassen. Man beobachtet, dass ein Prozess startet, bei

dem Körper 1 stetig Wärme an Körper 2 überträgt. Die Temperatur von Körper 1 verringert sich in dem Maße, wie die Temperatur von Körper 2 steigt. Der Prozess kommt erst dann zum Stillstand, wenn beide Körper die gleiche Endtemperatur $T_{end} = ½\cdot(T_1 + T_2)$ erreicht haben, sich also im gleichen Wärmezustand befinden. Eine rein energetisch gesehen gleichwertige und nach erstem Hauptsatz zulässige Umkehrung des Prozesses, bei dem sich Körper 1 spontan zulasten von Körper 2 wieder erwärmt, ist ausgeschlossen, je beobachtet zu werden. Der Prozess ist irreversibel. Vielmehr wird das System für immer im genannten Endzustand des thermischen Gleichgewichts anzutreffen sein. Wie bereits bei der Diskussion des zweiten Hauptsatzes festgestellt, ist dieser Endzustand dadurch ausgezeichnet, dass die Entropie des Systems ihr Maximum erreicht hat. Da keine Entropie von außen in das System einfließen kann, muss während des Prozesses Entropie im Systeminnern erzeugt worden sein. Auf Basis dieser in Gedanken gemachten Beobachtungen lässt sich Entropie wie folgt definieren.

«Entropie ist eine extensive Zustandsgröße, die beschreibt, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein bestimmter Zustand eines thermodynamischen Systems bei einer zufälligen Beobachtung anzutreffen sein wird».

Die mathematische Auswertung führt unter Zuhilfenahme der Wahrscheinlichkeitsrechnung und der statistischen Mechanik zu der berühmten, von Ludwig Boltzmann hergeleiteten Beziehung $S = k_B\cdot\ln \Omega$ [Boltzmann (1877)], wobei Ω die sogenannte Zustandssumme bezeichnet. Der Vorteil dieser Definition der Entropie ist, dass sie den Studierenden den interdisziplinären Charakter der Technischen Thermodynamik mit ihren Bezügen zu den Naturwissenschaften und zur Informationstechnik aufzeigt, bei der die Entropie in analoger Weise definiert und als Maß für den Informationsgehalt eines von einer Quelle mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit ausgesandten Einzelsignals interpretiert wird.

In manchen Lehrbüchern zur Technischen Thermodynamik wird die Entropie als Maß für die «Unordnung» eines Systems beschrieben. Aus Sicht des Verfassers ist diese Auffassung inkorrekt und irreführend. Zum einen ist Unordnung keine physikalische Größe. Zum anderen könnte genau gegenteilig argumentiert werden: Im Zustand höchster Entropie haben alle Teilchen die gleiche Temperatur. Es läge also höchste «Ordnung» vor. Vielmehr ist die Auffassung richtig, dass es im Zustand gleicher Temperatur eine Höchstanzahl an Möglichkeiten gibt, die einzelnen Teilchen im System gegeneinander energetisch anzuordnen, ohne dass sich dabei der beobachtbare Systemzustand ändert. Die Gesamtanzahl dieser möglichen Einzelanordnungen, man spricht von sogenannten Mikrozuständen, bildet die Zustandssumme Ω in der Boltzmannschen Entropieformel. Da diese Anzahl mit zunehmender Teilchenzahl multiplikativ ansteigt, sich Entropie als extensive Zustandsgröße jedoch additiv zusammensetzt, folgt intrinsisch der logarithmische Zusammenhang zwischen den Größen. Im Grenzzustand des absoluten Nullpunkts gilt somit $\Omega = 1$. Hierbei ist zu beachten, dass einfacher Platztausch von Systemteilchen keinen neuen Mikrozustand bildet, da die Teilchen an sich ununterscheidbar sind.

Was ist Exergie?

Zur Beantwortung dieser Frage eignet sich im gleichen Maße das oben beschriebene Gedankenexperiment des Temperaturausgleichs. Das Experiment wird dahingehend erweitert, dass das System nun vermöge, mit seiner Umgebung in Wechselwirkung zu treten. Zur Vereinfachung der Diskussion wird der Fall betrachtet, dass die Umgebungstemperatur T_∞ genau der Endtemperatur T_{end} der beiden Körper entspricht. Im Ausgangszustand vor dem thermischen Kontakt der Körper bestünde aufgrund $T_1 > T_\infty$ und $T_\infty > T_2$ prinzipiell die Möglichkeit, zwei Wärmekraftprozesse zwischen den beiden Körpern und der Umgebung zum Laufen zu bringen, mit deren Hilfe mechanische Nutzarbeit

nach außen abgeführt werden kann. Im Endzustand besteht diese Möglichkeit aufgrund des Temperaturausgleichs nicht mehr. Das System hat sprichwörtlich von selbst diese Fähigkeit eingebüßt. Diese Überlegung führt direkt zu einer griffigen Definition der Exergie:

«Exergie ist die maximal mögliche mechanische Nutzarbeit, die bei einem Prozess generiert werden kann, durch den ein System mit seiner Umgebung ins thermodynamische Gleichgewicht kommt».

Die weitere Diskussion ergibt, dass durch den Ausgleichsprozess eine «Exergievernichtung» stattfindet. Im vorliegenden Fall, bei dem die Möglichkeit zur Arbeitsgenerierung durch die thermische Isolierung komplett ungenutzt bleibt, ist diese Exergievernichtung maximal. Die anfangs vorliegende Ressource wird demnach vollständig verschwendet. Das Beispiel zeigt zudem, dass die Quelle der Exergievernichtung die Entropieerzeugung ist. Die mathematische Auswertung ergibt den einfachen Zusammenhang $E_{destructed} = \sigma \cdot T_\infty$ zwischen Exergievernichtung und Entropieerzeugung σ.

Eine tiefere Analyse ergibt die Interpretation, dass Exergie einer Potenzialdifferenz zwischen dem thermischen, mechanischen und chemischen Zustand des Systems zu dem seiner Umgebung gleichkommt. Je weiter diese Zustände voneinander entfernt liegen, umso größer ist die Exergie des Systems. Als Grenzfall erhält man, dass die Exergie des Systems null ist, wenn es sich im Umgebungszustand befindet. Man spricht vom sogenannten «dead state». Der weitere Grenzfall ist der Zustand des absoluten Nullpunkts. In diesem wäre die Exergie des Systems unendlich groß. Ein weiterer Aspekt ist, dass durch die Exergie den verschiedenen Energieformen eine Wertigkeit zugeordnet wird. Beispielweise sind kinetische und potenzielle Systemenergien oder auch elektrische Energie hochwertige Energien. Sie können vollständig in mechanische Arbeit umgewandelt, da die Umgebung per Definition auf kinetischem und potenziellem Nullenergieniveau liegt. Dagegen sind innere Energie, mechanische Druckenergie und chemische Energie minderwertigere Energieformen. Diese können nur insoweit in Arbeit gewandelt werden, bis das System die Umgebungstemperatur, den Umgebungsdruck und die chemische Zusammensetzung der Umgebung angenommen hat.

In Bezug auf Nachhaltigkeit ist es pure Ressourcenverschwendung, wenn beispielsweise heiße Rauchgase, wie sie bei technischen Verbrennungsprozessen entstehen, nach ihrer Nutzung als Transport- und Übertragungsmedium von Prozesswärme bequemerweise einfach in die Atmosphäre entsorgt werden. Durch die stattfindende irreversible Durchmischung bleibt die noch reichlich vorhandene thermochemische Restexergie vollkommen ungenutzt. Jedoch greift auch hier wieder das Prinzip der Thermoökonomie. In der Anwendung müssen die gereinigten Rauchgase gegenüber der Umgebung eine gewisse Übertemperatur aufweisen, um durch den entstehenden Naturzug im Kamin den sicheren Abtransport ohne zusätzlichen energetischen Aufwand zu gewährleisten. Weiterhin wird dadurch die Unterschreitung der Taupunkttemperatur vermieden, bei der in den Rauchgasen enthaltende Wasserdampf kondensieren würde. Solches Flüssigwasser würde zu unerwünschten chemischen Reaktionen mit den Kaminmaterialien führen und zu deren vorzeitigem Verschleiß beitragen.

Was bedeutet aus thermodynamischer Sicht Nachhaltigkeit?

Aus Sicht der Technischen Thermodynamik ergeben die obigen Überlegungen folgenden Schluss:

«Technische Prozesse jeglicher Art sind besonders nachhaltig, wenn die unvermeidbare Entropieerzeugung als Maß für die Irreversibilität so gering wie möglich gehalten wird und die damit verbundene Exergievernichtung als Maß für die Ressourcenverschwendung möglichst klein ist».

Im ingenieurtechnischen Sinne sind jedoch auch thermoökonomisch optimierte Prozesse als nachhaltig zu bezeichnen. Hier können die erzielten ökonomischen Vorteile durch

Verschleißminderung und Nettoleistungssteigerung die Nachteile durch erhöhte Entropieproduktion und Exergievernichtung überkompensieren.

GEDANKEN ZUR GESTALTUNG DER LEHRE

An der TU Ilmenau wie auch an manch anderer technischen Universität ist das Grundlagenfach Technische Thermodynamik 1 für Bachelor-Studiengänge als einsemestrige Lehrveranstaltung im Umfang von vier Semesterwochenstunden (SWS) konzipiert. Hierbei entfallen je 2 SWS auf die Vorlesung (V) und das als Rechenübung gestaltete Seminar (S). Erst im Rahmen einer vertiefenden Lehrveranstaltung Technische Thermodynamik 2 (TTD 2), die gleichfalls dem Schema 2 V + 2 S folgt, erhalten Master-Studierende vermehrte Einblicke in die vielfältigen Anwendungen und Nachhaltigkeitsaspekte der Thermodynamik. Die TTD 2 ist als Pflichtfach jedoch nur für wenige Module innerhalb lediglich einzelner Masterstudiengänge zu belegen. Dadurch werden Bachelor-Absolventen nur ein eingeschränktes Verständnis für die Technische Thermodynamik entwickelt haben, und nur ein Bruchteil der Master-Absolventen wird die nachhaltigen Botschaften der Thermodynamik in die ingenieurtechnische Anwendung tragen können.

In diesem starren Lehrkorsett fehlen aus Sicht des Verfassers vor allem obligatorisch zu belegende, praxisbezogene Elemente wie die Durchführung von Laborexperimenten und technischen Exkursionen. Diesbezüglich bestehen zwar fakultative Angebote, die auf reiner Eigeninitiative der Lehrenden beruhen, aber von den Studierenden aus verschiedenen Gründen nur sehr mäßig angenommen werden. Abhilfe würde hier eine Erweiterung des Lehrplans auf 6 SWS schaffen, die aber in den entsprechenden Gremien und Kommissionen schwerlich durchsetzbar ist. Die vorgehaltenen Angebote umfassen in Kurzvorstellung folgende Stationen:

Laborversuch 1: Stirling-Motor [Stirling (1816)]; emissionsfreier, regenerativer Wärmekraftprozess mit Arbeitsmedium Umgebungsluft; Bestimmung Wirkungsgrad.

Laborversuch 2: Kaltdampf-Kompressions-Wärmepumpenprozess [Aydemir (2015)]; Wärmepumpe mit elektrisch angetriebenem Verdichter und Umgebungsluft als kaltem Wärmereservoir; Bestimmung Leistungsziffer.

Laborversuch 3: Joulesches Schaufelradexperiment [Joule (1854)]; Umwandlung von mechanischer Rotationsenergie in innere Energie; Bestimmung mechanisches Wärmeäquivalent, spezifische Wärmekapazität, Entropieproduktion, Exergievernichtung.

Exkursion 1: Biomasse-Heizkraftwerk Ilmenau und Ilmenauer Wärmeversorgung GmbH, siehe www.bhi-ilmenau.de und www.waermeversorgung-ilmenau.de.

Exkursion 2: IL Metronic Sensortechnik GmbH, siehe https://il-metronic.com.

Exkursion 3: N3 Engine Overhaul Services GmbH & Co., siehe www.n3eos.com.

ZUSAMMENFASSUNG

Im vorliegenden Beitrag wurden die Aussagen der Hauptsätze der Thermodynamik auf ihren Gehalt zur Erklärung des Begriffs Nachhaltigkeit diskutiert. Zentrale Aspekte sind in diesem Zusammenhang die thermodynamischen Größen Temperatur, Entropie und Exergie bzw. die abgeleiteten Größen Entropieerzeugung und Exergievernichtung. In Kurzform lauten die wichtigsten Schlüsse:

Zum Antrieb von technischen Prozessen ist der Einsatz einer energetischen Ressource notwendig.

Die Gesamtenergie bleibt bei Umwandlungsprozessen konstant. Die Ressource wird aufgebraucht.

Umwandlungsprozesse werden limitiert durch den thermomechanischen und chemischen Zustand der natürlichen Umgebung und die Unerreichbarkeit des absoluten Nullpunkts.

Bei realen irreversiblen Prozessen werden stets Entropie erzeugt und Exergie vernichtet. Es findet unweigerlich eine Ressourcenverschwendung statt.

Technische Prozesse sind thermodynamisch als besonders nachhaltig und ressourcenschonend zu bewerten, wenn die Entropieerzeugung und die Exergievernichtung möglichst gering bleiben.

In der Ingenieurpraxis wird meist mittels thermoökonomischen Methoden ein Kompromiss zwischen thermodynamischer Effizienz, technischer Machbarkeit und finanziellem Aufwand gewählt.

Verpflichtende Laborversuche und technische Exkursionen sind sinnvolle Instrumente, die vorwiegend theoretisch geprägte und auf Gedankenexperimenten beruhende universitäre Ingenieurausbildung in der Technischen Thermodynamik anwendungsnäher und für die Studierenden attraktiver zu gestalten.

Dank

Der Verfasser dankt seinem Institutskollegen Sebastian Sachs und seiner Institutskollegin Jasmin Calmbach für die kritische Durchsicht des Manuskripts und anregende Diskussionen. Ein Dank geht zudem an die Vorsitzende der IPW, Gudrun Kammasch, die den Verfasser zu dieser schriftlichen Berichterstattung eingeladen hat. Nicht zuletzt sei ein Dank an Silke Frye für die Organisation und die Betreuung während der IPW-Jahrestagung 2022 an der TU Dortmund ausgesprochen.

Referenzen

Aydemir, Ali (2015). Wärmepumpen. In: Wietschel, M., Ullrich, S., Markewitz, P., Schulte, F., Genoese, F. (eds) Energietechnologien der Zukunft. Springer Vieweg, Wiesbaden, p. 383-397.
Boltzmann, Ludwig (1877). Über die Beziehung zwischen dem zweiten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung respektive den Sätzen über das Wärmegleichgewicht. In: Wissenschaftliche Abhandlungen von Ludwig Boltzmann, Band II., p. 164–223.
Bryant, John (2012). Thermoeconomics - A Thermodynamic Approach to Economics. VOCAT International, Limited, Harpenden.
Carnot, Sadi (1872). Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance. In: Annales scientifiques de l'É.N.S., Vol. 2(1), p. 393-457.
Clausius, Rudolf (1850). Ueber die bewegende Kraft der Wärme und die Gesetze, welche sich daraus fuer die Wärmelehre selbst ableiten lassen. In: Poggendorffs Annalen, Vol. 79, p. 368–397 und p. 500–524.
Dumont, Olivier; Frate, Guido F.; Pillai, Aditya; Lecompte, Steven; De paepe, Michel; Lemort, Vincent (2020). Carnot battery technology: A state-of-the-art review. Journal of Energy Storage, Vol. 12, Article 101756.
Joule, James P. (1854): Ueber das mechanische Waerme-Aequivalent. In: Annalen der Physik und Chemie, Band 4, Verlag J. A. Barth, p. 601 ff.
Moran, Michael J.; Shapiro, Howard N. (2005). Fundamentals of Engineering Thermodynamics. John Wiley & Sons, Hoboken.
Nernst, Walther (1905). In: Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften IV, p. 88.
Rant, Zoran (1956): Exergie, ein neues Wort für »technische Arbeitsfähigkeit«. Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens, Vol. 22(1), p. 36–37.
Rummich, Erich (2009). Energiespeicher: Grundlagen, Komponenten, Systeme und Anwendungen. Expert-Verlag, Tübingen.
Stirling, Robert (1816). Improvements for Diminishing the Consumption of Fuel and in Particular an Engine Capable of being Applied to the Moving of Machinery on a Principle Entirely New. English Patent 4081.