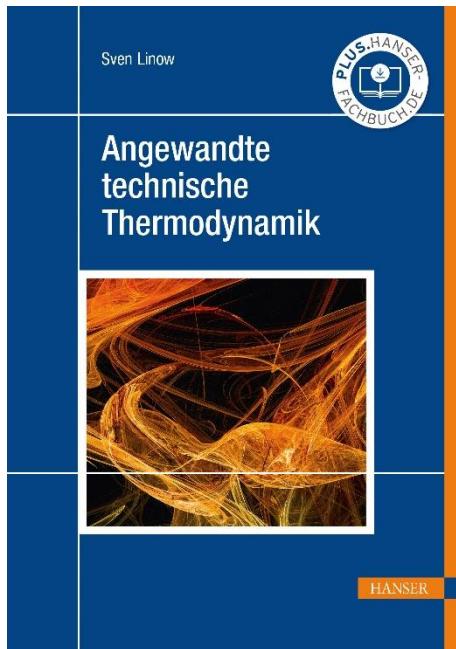


HANSER



Leseprobe

zu

Angewandte technische Thermodynamik

von Sven Linow

Print-ISBN: 978-3-446-47034-7

E-Book-ISBN: 978-3-446-47355-3

Weitere Informationen und Bestellungen unter
<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446470347>
sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Inhaltsverzeichnis

Übersicht HanserPlus	XII
Der Autor	XIV
1 Einführung	1
1.1 Lernziel	2
1.2 Digitale Werkzeuge	5
1.3 Kontext	8
1.4 Danke!	12
Teil I – Grundlagen	15
2 Das System und sein Zustand	17
2.1 System und Systemgrenze	17
2.1.1 Einfache Systeme klassifizieren	18
2.1.2 Systemgrenzen klassifizieren	19
2.2 Zustand eines Systems	22
2.2.1 Mechanische Zustandsgrößen	23
2.2.2 Die Temperatur	26
2.2.3 Energetische Zustandsgrößen	29
2.2.4 Extensive, intensive, molare Zustandsgrößen	30
2.2.5 Zustandsgleichung eines homogenen Stoffes	33
2.3 Das ideale Gas	36
2.3.1 Was ist ein ideales Gas?	36
2.3.2 Warum wir die Zustandsgleichung des idealen Gases verwenden	39
2.3.3 Normzustand	40
2.3.4 Realgasfaktor und andere Zustandsgleichungen	40
2.4 Die ideale Flüssigkeit	43

3 Zustandsänderungen	51
3.1 Zustandsänderungen	51
3.2 Prozessgröße oder Zustandsgröße	55
3.3 Arbeit verrichten	56
3.3.1 Volumenarbeit verrichten	57
3.3.2 Druckarbeit verrichten	59
3.3.3 Verschiebearbeit	60
3.3.4 Druck- und Volumenarbeit hängen zusammen	61
3.3.5 Arbeit verrichten verändert die Energie des Systems	62
3.4 Wärme übertragen	63
3.4.1 Spezifische Wärmekapazität	64
3.4.2 Chemische Energie und Heizwert	65
3.4.3 Temperatur einer Mischung	66
3.5 Wegabhängigkeit	71
3.6 Energie verteilen – Dissipation	72
4 Energie bleibt erhalten	79
4.1 Bilanz der Energie in geschlossenen Systemen	81
4.2 Der erste Hauptsatz für offene Systeme	82
4.3 Technische Arbeit verrichten	82
4.4 Der erste Hauptsatz für stationäre Fließprozesse	83
4.5 Strömungen in Leitungen und Kanälen	90
4.5.1 Massenerhalt und Kontinuitätsgleichung	91
4.5.2 Energieerhaltung	93
4.5.3 Strömungsformen	96
4.6 Druckverlust ist Dissipation	98
5 Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik	107
5.1 Worum geht es?!	108
5.2 Entropie	109
5.3 Entropie berechnen	110
5.4 Entropie als Stoffgröße	113
5.5 Umwandlung von Wärme in Arbeit	118
5.6 Entropie, Energie und vernichtete Arbeit	119
5.7 Was ist Temperatur?	124
5.8 Ausblick	125
5.8.1 Differentiale	126

5.8.2	Thermodynamische Potenziale	126
5.8.3	Innere Energie, Enthalpie und spezifische Wärme	129
5.9	Elektrizität	130
Teil II – Stoffe beschreiben		133
6	Stoffe beschreiben	135
6.1	Zentrale Begriffe	135
6.2	Phasen und Phasenübergänge	136
6.2.1	Phasen	136
6.2.2	Phasenübergänge	139
6.3	Diagramme beschreiben Stoffe	143
6.3.1	Das T-s-Diagramm	144
6.3.2	Das h-s Diagramm	146
6.3.3	Das log p-h Diagramm	147
6.3.4	Nassdampf	148
6.4	Siede- und Sättigungstabellen	150
6.5	Grafische Werkzeuge	154
6.5.1	Zustandsänderungen beschreiben	156
6.5.2	Ideale Fluide	157
6.5.3	Das T-s-Diagramm	158
6.5.4	Das h-s Diagramm	159
6.5.5	Das log p-h Diagramm	162
6.6	Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität	169
6.7	Schallgeschwindigkeit	171
7	Zustandsänderungen des idealen Gases	173
7.1	Ideales Gas	175
7.2	Die isochore Zustandsänderung	176
7.3	Die isobare Zustandsänderung	177
7.4	Die isotherme Zustandsänderung	178
7.5	Die isentrope Zustandsänderung	179
7.6	Zustandsänderungen illustrieren	180
7.7	Polytropen Zustandsänderung des idealen Gases	182
7.7.1	Die polytropen spezifische Wärmekapazität	183
7.7.2	Die polytropen übertragene Wärme und verrichtete Arbeit	184
7.7.3	Polytropen Zustandsänderungen	185

7.8	Isentrope Wirkungsgrade	190
7.8.1	Verdichter	190
7.8.2	Turbine	193
7.8.3	Adiabate polytrope Zustandsänderung und innere Arbeit	195
7.9	Freie Expansion und isenthalpe Expansion	196
7.10	Übersichtstabellen zu den Zustandsänderungen	202
8	Gemische	205
8.1	Gemische beschreiben	208
8.2	Zustandsgrößen	212
8.3	Zustandsgröße Entropie	215
8.4	Gemische als ideales Gas	223
8.5	Formelsammlung für Gemische	226
9	Feuchte Luft	235
9.1	Was ist feuchte Luft?	236
9.2	Trockene Luft	237
9.3	Feuchte Luft beschreiben	238
9.4	Sättigungsdruck berechnen	241
9.5	Zustandsgrößen ungesättigter feuchter Luft	243
9.6	Enthalpie	246
9.7	Das h-x Diagramm	248
9.7.1	Das schiefwinklige h-x Diagramm	250
9.7.2	Zustandsänderungen im h-x Diagramm	251
9.7.3	Nasskühlтурm	258
9.8	Feuchte Luft und Wetter	263
9.8.1	Wind und Feuchtigkeit	265
9.8.2	Barometrische Höhenformeln	269
9.8.3	Barometrische Höhenformel für Wasser	271
9.8.4	Interpretation der Höhenformel für Wasser	273
Teil III – Kreisprozesse		281
10	Was sind Kreisprozesse?	283
10.1	Vergleichsprozesse	285
10.2	Nennleistung	287

11 Vergleichsprozesse des idealen Gases	289
11.1 Joule-Vergleichsprozess	289
11.1.1 Von der Gasturbine zum Vergleichsprozess	289
11.1.2 Komponenten und Grenzen	293
11.1.3 Prozesse und Wirkungsgrad	294
11.1.4 Maximale Leistung im Joule-Prozess	297
11.1.5 Ausblick – Reale Gasturbinen	301
11.2 Kolbenmotoren	308
11.3 Otto-Motor und Gleichraumprozess	310
11.4 Diesel- oder Gleichdruckprozess	322
11.5 Vergleich von Otto- und Diesel-Prozess	325
11.6 Weitere Vergleichsprozesse	327
11.6.1 Linkslaufende Kreisprozesse des idealen Gases	327
11.6.2 Vergleichsprozesse mit isothermer Wärmeübertragung	328
12 Kreisprozesse mit Phasenwechsel	331
12.1 Rechtslaufender Clausius-Rankine-Prozess	331
12.1.1 Von der Dampfturbine zum Vergleichsprozess	332
12.1.2 Eigenschaften und Grenzen	335
12.1.3 Prozesse und Wirkungsgrad	336
12.1.4 Komplexere reale Kreisprozesse	340
12.2 Linkslaufender Clausius-Rankine-Kreisprozess	348
12.3 Gaskältemaschine	362
Teil IV – Chemische Reaktionen	365
13 Einige Grundlagen zur Chemie	367
13.1 Vom Atom zum Molekül	368
13.2 Wichtige Moleküle	370
13.3 Chemische Reaktionen	375
13.4 Energie	378
13.5 Chemisches Gleichgewicht	379
14 Technische Verbrennung	383
14.1 Wärme bereitstellen	383
14.2 Luftmasse bestimmen	384
14.2.1 Fett oder mager?	384

14.2.2	Allgemeine Reaktionsgleichung	386
14.2.3	Sauerstoffbedarf	388
14.2.4	Luftbedarf und Luftzahl	388
14.2.5	Weitere Stoffe	399
14.3	Komplexe Brennstoffe	400
14.4	Adiabate Verbrennungstemperatur	408
14.5	Thermische Apparate	409
14.5.1	Thermischer Apparat ohne Luftvorwärmung	410
14.5.2	Feuerungstechnischer Wirkungsgrad	412
14.6	Brennstoffzellen	417
	Teil V – Wärmeübertragung	421
15	Stationäre Wärmeleitung	423
15.1	Der eindimensionale Fall	423
15.1.1	Die Wärmeleitfähigkeit	424
15.1.2	Wärmeleitwiderstand	427
15.1.3	Mehrere Schichten unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit	428
15.2	Andere Geometrien	429
15.3	Wärmequellen und Wärmeleitung	431
16	Konvektion	435
16.1	Grenzschicht und Wärmeübergangszahl	435
16.2	Die benötigten Größen	437
16.2.1	Physikalische Eigenschaften des Fluides	438
16.2.2	Dimensionsbehaftete Größen	442
16.2.3	Dimensionslose Größen	444
16.2.4	Welche Form von Konvektion liegt vor?	446
16.3	Erzwungene Konvektion	447
16.4	Freie Konvektion	449
17	Strahlung	463
17.1	Elektromagnetische Strahlung	464
17.2	Thermische Strahlung	467
17.2.1	Spektrale Emission – Planck'sches Gesetz	467
17.2.2	Gesamte Emission – Stefan-Boltzmann-Gesetz	469
17.2.3	Maximum und spektrale Verteilung – Wien'sches Verschiebungsgesetz	470

17.3	Strahlung und Materie	472
17.3.1	Opake Medien	474
17.3.2	Semitransparente Medien	475
17.4	Strahlung und Entropie	478
17.5	Netto-Wärmestrom	485
17.5.1	Einfache Spezialfälle	485
17.5.2	Verallgemeinerung zu Sichtfaktoren	487
18	Wärmeübertragung	489
18.1	Wärmedurchgang	489
18.2	Wärmetauscher	491
18.2.1	Regenerator	491
18.2.2	Rekuperator	492
18.3	Ausblick auf instationäre Phänomene	496
18.4	Kombination	499
19	Symbole und Konstanten	505
19.1	Konstanten	505
19.2	Lateinische Symbole	505
19.3	Griechische Symbole	508
19.4	Indizes	509
20	Einheiten	511
20.1	SI-Präfixe	511
20.2	Einheiten der Energie	512
20.3	Imperial Units verstehen?!	512
21	Stoffdaten	515
Index		531

Übersicht HanserPlus

Auf der Seite Hanser-plus <https://plus.hanserfachbuch.de/> gibt es noch viele weitere Aufgaben und Beispiele, die Ihnen helfen mit thermodynamischen Problemstellungen besser zurecht zu kommen. Der Autor zeigt die Lösungswege und kommentiert die einzelnen Schritte.

1 Wie löse ich gut Aufgaben und Probleme?

In diesem Abschnitt finden Sie einiges an Ideen und Anregungen, die nicht nur speziell für die Thermodynamikklausur gelten, sondern eher für alle typischen Ingenieursaufgaben anwendbar sind, in denen Berechnungen relevant sind.

2 Anhang – mehr Beispiele zu den Grundlagen

Ein wichtiges Element für das Lernen ist, ganz früh mit dem Rechnen zu beginnen. Hier am Anfang sind es recht einfache Aufgaben zum idealen Gas und zur Energiebilanz, mit denen wir einsteigen, um grundlegende Zusammenhänge später sicher anwenden zu können.

3 Anhang – mehr Beispiele zum Teil II

In diesem Anhang befindet sich eine Aufgabe, die als einfache Übung den Umgang mit Zustandsänderungen des idealen Gases trainieren soll.

Als zweites wird hier der Unterschied zwischen Zustand und Zustandsgrößen auf der einen Seite und Prozessgrößen auf der anderen Seite dargestellt: Zustandsgrößen beschreiben einen Zustand. Prozessgrößen beschreiben den Prozess von einem Zustand in einen anderen und hängen daher vom Ablauf des Prozesses (seinem Pfad) ab.

4 Anhang – mehr Beispiele zu chemischen Reaktionen

4.1. Was macht einen Vergleichsprozess aus? Dieses Beispiel untersucht das Konzept „Kreisprozess“. Dafür sehen wir uns eine Anlage an, die eigentlich eine stationäre Gasturbine ist. Aber wir beschreiben sie nicht als solche, sondern wir sehen uns ihre Nutzung als Speicher für elektrische Energie an.

4.2 Vergleichsprozesse des idealen Gases: Ein typisches Konzept für die Gestaltung von Klausuraufgaben ist es, als Einstieg einen Vergleichsprozess rechnen zu lassen und diesen dann in weiteren Teilaufgaben zu variieren. Dann könnte die minimale Anforderung an das Bestehen der Klausur sein, dass dieser Vergleichsprozess richtig beschrieben wird. Alles Weitere dient dann dazu, eine Note festzulegen.

4.3 Vergleichsprozesse realer Gase: Im ersten Beispiel „Gasturbine mit Chiller“ geht es um technische Möglichkeiten, die Leistung einer Gasturbine in speziellen Situationen zu erhöhen. Im zweiten Beispiel „Wellnesshotel Zur Mühle“ legen wir eine Kompressionskältemaschine aus, um die Gäste vor sommerlicher Hitze zu bewahren.

5 Anhang – mehr Beispiele zu chemischen Reaktionen

Zwei Aufgaben mit unterschiedlichem Schwierigkeitsgrad: Tischkamin, Hochofen

6 Anhang – mehr Beispiele zur Wärmeübertragung

6.1 Wärmeleitung im Kleinplaneten Pluto – welche Formen von Wasser erwarten wir? Dieses Beispiel ist nicht-technisch, aber die dahinterliegenden Themen und Probleme lassen sich gut auf andere insbesondere kugelförmige Strukturen übertragen. Ein weiterer Aspekt dieses Beispiels ist die recht umfangreiche Vorarbeit, also die Beschreibung des Systems aus wenigen vorhandenen Daten.

6.2 Strahlung: Berechnungen zur Beheizung einer Fabrikhalle

7 Literaturverzeichnis

8 Anhang – mehr Stoffdaten

Der Autor

Sven Linow ist seit 2014 Professor für Thermodynamik und Umwelttechnik an der Hochschule Darmstadt. Er studierte Physik und Vegetationsökologie in Hamburg, promovierte 2000 an der TU Darmstadt in der Energie- und Kraftwerkstechnik und entwickelte danach Produkte für die Elektrowärme. Er ist in der internationalen Normung aktiv. Sein Forschungsinteresse sind technische und energetische Voraussetzungen einer gelingenden Energiewende und die Didaktik einer allgemeinen Energie-Bildung.

1

Einführung

NICHT GLEICH WEITERBLÄTTERN, HIER STEHEN VIELLEICHT EINIGE NÜTZLICHE INFORMATIONEN FÜR LERNEN.

Die Thermodynamik ist kein einfaches Fach. Zumeist kommt sie erst in einem höheren Semester, scheint dann ganz neue Anforderungen und Konzepte einzuführen, benutzt viele neue Begriffe und verlangt ernsthaften Einsatz beim Lernen. Gerade beim Einstieg gibt es sehr viele Möglichkeiten, zu straucheln oder eines der vielen grundlegenden Konzepte erst einmal nicht verstanden zu haben.

Gleichzeitig verändern sich Studium und unser Lernverhalten gerade deutlich: Digitale und virtuelle Werkzeuge sind wichtige Elemente, die an vielen Stellen wie selbstverständlich ihren Platz gefunden haben und die daher hier eingebunden gehören. Die gesellschaftlichen Anforderungen an gute Lehre sind in Bewegung, und wir erwarten heute, dass Absolventinnen und Absolventen befähigt sind, direkt in inter- und transdisziplinären Teams und Projekten zu arbeiten. Damit verschiebt sich der Fokus von etabliertem Wissen hin zu fachlichen und überfachlichen Kompetenzen.

Dazu kommt die fühlbare schnelle Umgestaltung unserer Lebenswelt und unserer Energieinfrastruktur durch die gemeinsam wirkenden Kräfte von digitalen Wirtschaftsformen (die auch zukünftig Energie benötigen), dem absehbaren Ende oder freiwilligen Ausstieg aus fossilen Energieträgern und der damit verbundenen Energiewende, dem regionalen und globalen Klimawandel und seine Auswirkungen auf Lebenswelt und energetische Bedürfnisse sowie ablaufende Veränderungen in Produktionsprozessen und Lieferketten, Warenangeboten und Bedürfnissen. Diese Aspekte sollten sich in der Lehre im genutzten Kontext widerspiegeln.

Diese drei großen Aspekte sind die Leitplanken für die Entwicklung dieses Lernbuches¹.

¹⁾ Es ist ein Buch zum Lernen und für Sie kein Buch zum Belehren – davon haben wir oft mehr, als wir brauchen. Daher dieses stolperige Wort.

■ 1.1 Lernziel

Dieses Lernbuch hat ein klares Lernziel und eine klare Nutzung vor Augen.

Bologna bedenken Inhalte und Umfang ergeben sich aus den Inhalten, die für eine 10-ECTS-Einführung in die Thermodynamik maximal möglich erscheinen und gleichzeitig eine gewisse Schwerpunktsetzung ermöglichen. Damit deckt es insbesondere auch die Inhalte von Einführungen ab, die einen geringeren Umfang haben. Im Fokus stehen die Kompetenzen, durch die die Thermodynamik als Methode angewendet werden kann²⁾.

Das Lernbuch nutzen Dieses Buch ist als Begleiter und Werkzeugkiste gedacht: Ich gehe davon aus, dass Sie es in der Prüfung nutzen (können). Sie sollen sich daher dieses Buch als ein Werkzeug aneignen, also es um Notizen oder Hinweise ergänzen, wichtige eigene Gedanken aufnehmen usw. Es soll Ihnen auch später im Job helfen: Dann haben Sie vermutlich viele Details erst einmal vergessen, aber ich hoffe, dass Sie sich dann schnell wieder erinnern und so schnell wieder ins Arbeiten kommen können.

Ich gehe davon aus, dass Sie den Stoff gerade erlernen. Daher enthält dieses Buch an vielen Stellen Wiederholungen, Hinweise, wo der Stoff bereits vorher eingeführt wurde, sowie detaillierte Erklärungen von Zusammenhängen, die für Experten klar sind. Dies basiert auf vielen Diskussionen und Fragen meiner Studentinnen und Studenten und meinem Versuch, wichtige schwierige Stellen noch zu erkennen. Unklarheiten und Fragen sind die wichtigsten Elemente in einer Lehrveranstaltung - als „Vorlerner“ (also Dozentin oder Dozent) erfahre ich nur so, ob die Lernenden auch soweit sind wie gedacht. Solche Momente sind ideal für Wiederholung und Vertiefung. Drängen Sie als Lernende darauf, dass Ihre Fragen beantwortet und Ihre Unklarheiten beseitigt werden.

Fachliches Lernziel Das konkrete Lernziel und das Prüfungsziel Ihres Kurses gibt die Modulbeschreibung und ganz konkret Ihre Dozentin oder Ihr Dozent vor. Diese beiden Ziele (falls *constructive alignment* angestrebt ist, stimmen beide überein) müssen Sie für Ihren Kurs möglichst frühzeitig abklären. Eine Diskussion über Lern- und Prüfungsziel empfinde ich als sehr nützlich, da sie gut den Raum schafft, die Motivation für bestimmte Inhalte und Zusammenhänge zu erklären, und insbesondere ermöglicht, den *roten Faden* aufzuzeigen.

Das Lernziel dieses Buches richtet sich an Sie als Studentin oder Student und ist

Was?	Sie können Prozesse und Anlagen thermodynamisch analysieren (Anwenden), ...
Womit?	<p>... indem Sie für jedes einzelne Problem</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ das System, seine Systemgrenzen und relevante Zustandsgrößen festlegen, ■ die Zustandsgrößen des Systems ermitteln, ■ die Zustandsänderungen des Systems mit den relevanten Prozessgrößen und Zustandsgrößen berechnen ... <p>... sowie ggf. und je nach Problemstellung</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Verluste durch Dissipation und bei der Energiewandlung bestimmen und analysieren,

²⁾ Wenn ich weiß, wie eine Nut-und-Feder-Verbindung aussieht, dann habe ich noch nicht die Kompetenz, so eine Verbindung passgenau anzufertigen. Das Wissen ist eine Voraussetzung, das Machen die zweite.

	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gemische als Zustand charakterisieren und ihre Zustandsänderung beschreiben – als ideales Gas, als allgemeines Gemisch oder speziell als feuchte Luft, ▪ reagierende Gemische beschreiben, ▪ für zyklisch arbeitende Wärme- und Arbeitsmaschinen die Vergleichsprozesse und realen Kreisprozesse beschreiben und analysieren, ▪ stationäre Wärmeübertragung in einfachen technischen Situationen analysieren können, ▪ eine solide Basis an Grundkompetenzen haben, um neue Probleme angehen zu können,...
Wozu?	... um später als Ingenieurin oder Ingenieur sicher mit der thermodynamischen Methode und diesen thermodynamischen Werkzeugen arbeiten zu können.

Formeln, Gleichungen, Diagramme Eine wichtige Entscheidung betrifft die Nutzung von Gleichungen und allgemeiner von Mathematik in der Darstellung. Hier bin ich davon ausgegangen, dass Sie Gleichungen lesen können. Mir ist bewusst, dass dies eine mutige Entscheidung ist und dass einige von Ihnen hier echte Hürden sehen. Aber da „Thermodynamik anwenden“ als Kompetenz das Arbeiten mit eben diesen Gleichungen und Formeln ist, müssen Sie diese lesen, verstehen und verwenden – daran kommen wir nicht vorbei. Eigentlich haben Sie alles, was Sie hier für das Anwenden benötigen, auch schon einmal gelernt (und vielleicht wieder vergessen). Algebra bleibt eine schwierige Fremdsprache für uns, und wir müssen sie und ihre Vokabeln immer wieder neu auffrischen.

Sie finden zumeist ausführliche Erklärungen, worum es in den Gleichungen geht und was sie beschreiben. Viele wichtige Funktionen sind zudem in Diagrammen abgebildet, damit wir eine Vorstellung bekommen, wie diese Funktionen verlaufen.

Eine besondere Herausforderung stellen die Zustandsdiagramme dar, mit denen wir arbeiten werden. Dies sind spezielle Werkzeuge, mit denen wir umgehen, um Probleme zu lösen. Alle diese Diagramme habe ich für dieses Buch selber neu angefertigt – auch, um Ihnen erklären zu können, wie sie aufgebaut sind und wie wir sie gut lesen können.

Beispiele Einige Beispiele sind bewusst eher als Probleme gestaltet, d. h. oft gäbe es weitere Wege zu einem relevanten Ergebnis, und nicht immer erreichen wir ein exaktes Ergebnis. Die Motivation für diese Vorgehensweise ist, dass in der praktischen Arbeit selten Aufgaben und zumeist Probleme vorliegen.

Aufgaben sind gut für das erste Aneignen der Methoden und das Ausprobieren in einem sicheren Umfeld. Spannend und interessant wird eine Disziplin bzw. ein Fach erst durch seinen Kontext. Kontext meint hier die ganz konkreten weltlichen Rahmenbedingungen, innerhalb derer dann die eigentlichen Probleme angegangen werden. Aus diesem Grund basieren die Beispiele auf Kontext und zeigen, was mit den hier dargestellten Methoden gut angegangen werden kann.

Der Umgang mit Problemen benötigt zusätzliche Vorgehensweisen. Ein Problem wie eine Aufgabe anzugehen, kann schnell schiefgehen. Daher benötigen Sie früh die Auseinandersetzung mit Problemen. In den Beispielen wird jeweils deutlich gemacht, wann der Übergang zum Problem stattfindet und mit welchen zusätzlichen Annahmen dann gearbeitet werden kann. Da das Vorgehen nicht mehr eindeutig festgelegt ist, wird eine wichtige Kompetenz dabei, die eigenen Ergebnisse kritisch zu hinterfragen und soweit möglich selbst zu überprüfen – auch dies ist in den Beispielen diskutiert.

Insgesamt ist die Darstellung des Lösungsweges in den einzelnen Beispielen daher ausgesprochen umfangreich. Dazu enthalten die Beispiele viele wichtige Informationen (disziplinäres Wissen). Die Anwendung der Methoden wird dort diskutiert, und es wird Ihnen gezeigt, wie ich an die benötigten Informationen herangekommen bin und wie ich dabei mit fehlenden Informationen umgehe.

Diese Beispiele sollen Sie neugierig machen: auf den speziellen Kontext, darauf, dass Sie den Stoff selber anwenden, auf eine thermodynamische Betrachtung unserer Welt als eine eigene zusätzliche Möglichkeit der Wahrnehmung.



Aufgabe oder Problem?

Die VDI 2221-1 unterscheidet klar zwischen einer Aufgabe und einem Problem. Tabelle 1.1 arbeitet die grundlegenden Unterschiede heraus, sie basiert unter anderem auf der VDI 2221-1 und auf Rittel & Webber (1973). Diese Unterscheidung ist ausgesprochen hilfreich, wenn wir unser Vorgehen planen: Was ist das Ziel? Wie gehe ich das jetzt an? Wann bin ich fertig?

Aufgaben sind für Lernende und für Lehrende einfach im Umgang. Sie sind essenziell, wenn es um das erste Üben neuer Methoden geht – dafür stellen sie den definierten und abgegrenzten Raum zur Verfügung. Das Verharren auf Aufgaben begrenzt allerdings die Möglichkeiten guter Lehre. Insbesondere wird es schwierig, den Kontext des Faches gut zu vermitteln, und es bereitet nicht auf den später geforderten Umgang mit Problemen vor (Linow 2021).

Tabelle 1.1 Unterscheidung zwischen Aufgabe und Problem.

Aspekt	Aufgabe	Problem
Synonyme (en)	<i>Well-structured problem, Story problem, Word problem</i>	<i>Ill-structured problem</i>
Anforderung (Lastenheft)	Vollständig	Unvollständig, oft widersprüchlich Die Anforderungen festlegen ist Teil der Lösung
Komplexität	Gering, festgelegt	Hoch, zumeist nicht festgelegt, oft unbegrenzt
Systemgrenze	Vollständig, klar definiert, geschlossen	Unvollständig, widersprüchlich, offen Die Systemgrenze festlegen ist Teil der Lösung
Kontext	Kein Kontext oder irrelevant für die Aufgabe	Reale Welt, unvollständig, widersprüchlich enthält Zielkonflikte Den Kontext festlegen ist bereits Teil der Lösung
Zahl der Lösungen	Genau eine	Null, endlich oder unendlich viele

Aspekt	Aufgabe	Problem
Lösungsmethode	Eine (diese ist für Experten offensichtlich) Falls es mehr als eine gibt, dann sind diese mathematisch äquivalent	Nicht offensichtlich Es existiert keine Festlegen der Methode ist Teil der Lösung
Kriterien für den Lösungsweg	Offensichtlich (für Experten), Teil der Aufgabe	Nicht offensichtlich, unbekannt, unvollständig, widersprüchlich Festlegen des Lösungsweges ist Teil der Lösung
Qualität der Lösung	Die Abweichung von der exakten Lösung kann einfach gemessen oder berechnet werden	Unbekannt Festlegen von Kriterien zur Bewertung ist Teil der Lösung
Beteiligte Disziplinen	Genau eine (Silo)	Mehrere, abhängig von der Perspektive
Wechselwirkungen	Keine	Feedback in andere Systeme Feedbacks aus anderen Systemen beeinflusst und verändert das Betrachtete
Erklärung der Ursachen	Offensichtlich Teil der Aufgabenstellung (gegeben)	Viele, auch widersprüchliche Erklärungen sind möglich Angeben einer Erklärung ist Teil der Lösung



Fehler?!

Ja, ich habe wirklich viel Aufwand getrieben, damit das Buch keine Fehler enthält. Aber die Wahrscheinlichkeit ist hoch, dass ich nicht (ganz) erfolgreich war. Bitte teilen Sie uns (Verlag oder mir) mit, wenn Sie etwas finden!

Gerne möchte ich zudem die Inhalte aktuell halten und kann mir daher gut vorstellen – also falls es eine nächste Auflage gibt –, dann nicht nur zu korrigieren, sondern auch aktuelle Entwicklungen und Veränderungen in Beispielen und der Darstellung zu berücksichtigen.

■ 1.2 Digitale Werkzeuge

Die zentrale Frage ist hier, welche digitalen Werkzeuge helfen uns/Ihnen beim Aneignen und Verstehen? Sie finden hier eine ganze Reihe von Links und Hinweisen zu Datenbanken, speziellen Internetseiten oder Lernvideos. Dies ist eine persönliche Auswahl, denn dies

sind die Werkzeuge und Datenbanken, die ich im Laufe meiner Auseinandersetzung mit den Methoden kennengelernt habe und nutze. Es kann sehr gut sein, dass Sie andere Quellen finden, mit denen Sie viel besser arbeiten können. Zentral ist, dass Sie bei allen Quellen überprüfen, ob diese belastbar sind.

So lange wir uns im Bereich der Thermodynamik als Disziplin bewegen, ist es gut sichergestellt, dass Daten und Quellen belastbar, d.h. richtig sind – es sind oft Zahlenwerte und Stoffeigenschaften. Geht es aber darum, sich in den Kontext einer speziellen Fragestellung einzuarbeiten, dann ist von uns große Sorgfalt und die Bereitschaft geboten, nach wissenschaftlich belastbaren Quellen zu suchen, nicht nach solchen, die eine Erwartung bedienen. Mehr zu diesem Thema im parallelen Lernbuch zur Energiewende (Linow 2019).



Thermodynamik lernen

Ich war selber ein schlechter Student, und Thermodynamik (bzw. statistische Physik und Theorie der Wärme) war nicht meins. Daher darf ich mit ein klein wenig Erfahrung über die Frage sprechen, wie Sie jetzt dies hier lernen können.

Lernen ist eine aktive Tätigkeit, die ich selber für mich ausübe. Dies gilt insbesondere, wenn wir nicht mehr über das Vermitteln von abfragbarem Wissen, sondern insbesondere über Kompetenzen als konkrete Befähigung zum eigenen Handeln nachdenken:

Was ist mein Ziel? Seien Sie sich klar über Ihr Ziel. Es macht einen Unterschied, ob Sie gerade so bestehen wollen oder mit Freude tief eintauchen möchten:

Beim „gerade so“ ist die Auseinandersetzung mit den Lernzielen ausgesprochen wichtig, denn schließlich müssen Sie zum Bestehen zeigen, dass Sie „*nahezu alle Lernziele zumindest in einer grundsätzlich akzeptablen Form angegangen sind*“ (Biggs & Tang, 2011). Sie brauchen also ein klares Verständnis, was die *Lernziele* sind und was *eine grundsätzlich akzeptable Form* ausmacht. Punktezählen ist dafür deutlich zu wenig.

Ich bin selber verantwortlich Dinge erlernen müssen wir immer selber. Es langt nicht, in einer Vorlesung zu sitzen. Es kann ausgesprochen interessant oder amüsant sein, Vorlesungen von guten Dozentinnen oder Dozenten zu besuchen. Im Hinblick auf den Lernerfolg ist es aber egal, ob Ihr Prof. es nett macht oder nicht – Vorlesung bleibt Vorlesung (Biggs & Tang, 2011). Erst wenn ich selber aktiv werde, beginne ich zu lernen.

Oder umgekehrt: Es mag ja toll sein, was diese Professorin oder jener Dozent alles an Tricks und Methoden in der Vorlesung vorführt: Methodenwechsel alle 10 min usw. – das ist egal, solange ich einfach dasitze und es vorbeirauschen lasse. Ich mache in der Lernveranstaltung das Laptop zu (Sportwetten usw. können warten). Ich lege das Mobilphon für die gesamte Zeit beiseite, im Flugzeugmodus (oder besser noch: ich lasse es gleich daheim, dann ist auch die Versuchung geringer)³⁾.

³⁾ OK, dann muss der arme Showmaster – äh, also Dozentin oder Dozent – wieder zu Umfragen zurückkehren, statt Smartphone-Apps zur Aktivierung einzusetzen. Aber wenn ich eh aktiv dabei bin, dann kann ich mich auch einfach melden ...

Ich bin selber aktiv Im Zentrum steht hier das sichere Anwenden der Methoden, d.h. Lernen bedeutet, dass ich diese Methoden selber sicher anwenden kann. Die Möglichkeiten sind:

- Ich rechne selber! Dafür brauche ich eine Studi-Gruppe, in der ich dann alle meine Fragen besprechen kann (ohne meine Studi-Gruppe hätte ich mein Studium nicht geschafft – wofür ich Katja und Markus sehr dankbar bin).
- Ich lerne, meine Ergebnisse selber zu überprüfen: Das eigene Überprüfen (kann mein Ergebnis angehen?) ist eine zentrale Kompetenz guter Ingenieurinnen und Ingenieure.
- Ich diskutiere den Stoff, meine Fragen, die zentralen Punkte, wichtige Ideen mit meiner Lerngruppe.
- Ich rede darüber; ich erkläre, was mich gerade umtreibt oder bewegt. Dabei ist es hilfreich, dies in meiner Studi-Gruppe zu machen, aber es ist auch wichtig, dies Fachfremden erklären zu können: Kinder stellen tolle Fragen, die mich gerne direkt auf die fiesen Grundlagen bringen⁴ ...
- Ich entwickle eigene Fragen, Probleme, Gedanken und ich versuche, diese selber zu lösen!
- Ich suche mir andere Perspektiven: Wie gehen das die Nachbardisziplinen an? Kann ich das auch auf Probleme anderer Disziplinen anwenden? Stimmt das, was da in diesem Text steht? Funktioniert das wirklich so, wie das hier beschrieben ist?

Ich bau mir ein Gerüst Ein spannendes Konzept ist „*scaffolding*“. Dies meint, dass wir nicht einfach draufloslernen können, sondern dass wir neues Wissen in unser Gerüst an Ideen und Konzepten einfügen müssen, um es für uns nutzbar zu machen. Ausgehend von einer Basis benötigen wir Stützen und Verbindungen hin zu den neuen Inhalten. Dieses Gerüst können wir dann verstärken und umbauen. Dafür ist die Basis zentral, also das Verstehen der grundlegenden Konzepte und Methoden. Aus diesem Grund stehen diese Grundlagen hier im Fokus und werden auch beherzt wiederholt.

- Wenn ich mich unsicher fühle, überprüfe ich meine Grundlagen. Dabei können mich diese Fragen leiten: Habe ich verstanden, worauf das hier aufsetzt? Sind mir die Begriffe klar? Kann ich diese Methode auch selber anwenden? Warum verwende ich hier diese Methode? Welche Annahmen stecken hier gerade drin?

Ich spreche ausreichend Algebra Erstaunlich vieles in der Thermodynamik wird durch Gleichungen und Formeln ausgedrückt (diese Zusammenhänge stattdessen in Sprache zu gießen, wäre auch nicht besser). Daher muss ich meine Algebra abstauben und auffrischen. Das ist eine (am Anfang unangenehme) Übungssache: Jede einzelne Gleichung ganz bewusst lesen und verstehen.

⁴⁾ Wenn ich etwas so Kompliziertes wie ein Problem aus der Thermodynamik so erklären kann, dass Kinder es verstehen, dann habe ich es solide verstanden.

Lernhilfen in diesem Buch In diesem Lernbuch finden Sie viele Hinweise in unterschiedliche Richtungen; diese sollen Ihnen Möglichkeiten geben, selber aktiv zu sein:

- Lernvideos sind eine gute Möglichkeit, etwas zu verstehen: 10 min echte Aufmerksamkeit klappt viel besser als 90 min passives Zuschauen! Und Sie können das Video unterbrechen, noch mal abspielen, schneller laufen lassen, beschimpfen, teilen, dissen usw. Versuchen Sie das mal mit einem Prof.
- Das Internet ist eine tolle Quelle für echte Fachinformationen. Hier sind daher Hinweise für gute Datenbanken und Datenquellen, aber auch Werkzeuge enthalten.
- Nutzen Sie moderne Technik: Führen Sie Ihre Berechnungen in einem Tabelenkalkulationsprogramm oder mit Computeralgebra aus; machen Sie sich ihre eigenen Diagramme; beschaffen Sie sich eigene Daten ...
- Nutzen Sie alte und bewährte Technik: Machen Sie einfache Skizzen (wie ist das aufgebaut? Wie funktioniert das?); nutzen Sie ein Buch aus Papier und verwandeln dies in ein eigenes Werkzeug (durch Anmerkungen, Hinweise, Korrekturen) ...
- Thermodynamik ist sperrig, da die technischen Prozesse, um die es geht, oft versteckt oder unzugänglich sind: Wir können sie uns nicht einfach mal eben ansehen. Nutzen Sie daher alle Möglichkeiten, sich doch mit solchen Prozessen vertraut zu machen. Unabhängig davon habe ich einiges an Beispielen aus unserer Lebenswelt hier eingebaut⁵.

Der Aufwand Dieses Lehrbuch ist für eine 10-ECTS-Einführung in die technische Thermodynamik dimensioniert. 10 ECTS entsprechen einem Netto-Lernaufwand von 300 h. Netto bedeutet einschließlich meiner aktiven Zeiten in der Vorlesung, aber nach Abzug der Wegezeiten und nach Abzug aller ablenkenden Aktivitäten, wie E-Mails checken (OK, ich bin schon etwas älter) oder auch WhatsApp, Insta, Telegram, YouTube, Sportwetten & Bundesliga, Shopping usw.

Schnappatmung

Diesen Aufwand benötigen Sie, um gut auf die Prüfung vorbereitet zu sein und um die hier erworbenen Kompetenzen später schnell wieder aktivieren zu können. Je nach Prüfungsgestaltung und persönlichem Anspruch kann es ggf. auch mit deutlich weniger gehen – dazu wenden Sie sich vertrauensvoll an Ihre Fachschaft.

■ 1.3 Kontext

Ihre Ausbildung soll Sie befähigen, viele relevante und grundlegende Kompetenzen zu erwerben. Auch Ihr Kurs in Thermodynamik hat dieses Ziel. Dabei findet Ihr Studium gerade in Zeiten großer Umbrüche und Veränderungen statt. Eine Hoffnung ist, dass gute technolo-

⁵ Und ertrage dabei gerne den Vorwurf, dies sei ja nicht der wahren Thermodynamik als Disziplin entnommen.

gische Lösungen einen wesentlichen Teil dazu beitragen können, dass wir auch in Zukunft am Ort unserer Wahl ein angemessenes Leben führen können. Dafür wird Thermodynamik – oder vielleicht etwas konkreter „*energy literacy*“ (also die Befähigung, energetische Fragen sinnvoll und konsistent auch innerhalb des Systems Erde zu verstehen und anzugehen) – eine wesentliche Grundlage bleiben. Erst aus dieser Perspektive heraus werden einige Schwerpunkte und Aspekte dieses Lernbuches klar.

Systemisch denken Die thermodynamische Methode und das systemische Denken sind sehr gut geeignet, um für die aktuellen und zukünftigen Fragen von Energiewende und Energienutzung Lösungsansätze zu finden und zu bewerten. Sie werden sich mit diesen Themen vermutlich später indirekt, vielleicht auch ganz konkret auseinandersetzen. Die Thermodynamik ist die Wissenschaft von der Energie und ihrer Verteilung in der Welt – in technischen Systemen genauso wie in natürlichen. Viele Beispiele diskutieren daher heute absehbare Elemente oder Aspekte auf einer technischen Ebene. Wenn Sie sich deutlich tiefer mit diesem Thema auseinandersetzen wollen oder müssen, dann gibt es dazu ein zweites Lernbuch (Linow 2019).

System Erde Unsere Technik – so viel ist inzwischen klar – existiert nicht einfach so, sondern innerhalb unseres Systems Erde. Beide sind intensiv miteinander verflochten und beeinflussen sich gegenseitig⁶. Gleichzeitig stellen viele Prozesse innerhalb des Systems Erde großartige und aufregende Beispiele für thermodynamische Prozesse dar. Aus diesem Grunde finden Sie hier an einigen Stellen Inhalte und Beispiele, die über eine klassische, rein technische Darstellung hinausgehen. Diese Inhalte stellen jeweils relevante thermodynamische Grundlagen für ein zukünftiges menschliches Wirtschaften im System Erde dar und haben daher ihre Berechtigung in einer Einführung in die Thermodynamik. Außerdem sind es einfach wunderbare Möglichkeiten, die Methoden anzuwenden. Gleichzeitig gibt dies die Möglichkeit, ggf. einfacher mit den Geowissenschaften interdisziplinär zu arbeiten.

Gesellschaftliche Erwartungen Hochschulen, Fachbereiche, Disziplinen bekommen gerade deutliche Impulse, ihre Lehre interdisziplinär und transdisziplinär auszurichten, damit zukünftige Absolventinnen und Absolventen so arbeiten können. Interdisziplinäre Arbeit meint, dass verschiedene Disziplinen (Fächer) gemeinsam an Problemen arbeiten und ihre Lösung deutlich erkennbar über eine Summe rein disziplinärer Lösungen hinausgeht⁷. Daher finden Sie hier in den Beispielen immer wieder den Blick aus dem Thermo-Silo hinaus.

⁶⁾ Das zeigt uns gerade unsere aktuelle Pandemie, siehe auch Harper K (2021) *Plagues Upon the Earth. Disease and the Course of Human History*. Princeton University Press. In dieser Darstellung spielt Energie und ihre Verteilung zugleich eine prominente Rolle.

⁷⁾ Wenn unterschiedliche Fächer jeweils nur ihren Teil abarbeiten, damit man dann am Ende alles zusammensteckt, dann ist das polydisziplinär, denn „*inter*“ verlangt echten Austausch.



Thermodynamik dekarbonisieren?!

LÄSST SICH DIE TECHNISCHE THERMODYNAMIK ÜBERHAUPT DEKARBONISIEREN?
UND LOHNT SICH DAS?

Die Frage entwickeln

Rückblick Der historische Auslöser für die Entwicklung der Thermodynamik ist Kohle: Diese wurde schon lange z. B. in China, aber in besonderem Maße im modernen England als Brennstoff verwendet. Dadurch befreite sie die verfügbare Biomasse für andere Nutzungen und erlaubte so große Städte mit mehr Industrie. Im Jahr 1713 nimmt die allererste Dampfmaschine ihre Arbeit auf (Newcomen): Das erste Mal gelingt es, aus Wärme in einer zyklisch arbeitenden Maschine nutzbare Arbeit zu erzeugen. Aus dieser Maschine entwickelt sich innerhalb von 120 Jahren durch die Beiträge vieler begnadeter Handwerker und Erfinder (z. B. James Watt), basierend auf robustem handwerklichem Geschick und technischer Kunstfertigkeit, die erste rein mechanische nutzbare Lokomotive (Stevenson). Damit kann Biomasse, die bisher für Zugtiere benötigt wurde, für andere Zwecke eingesetzt werden.

Mit Öl aus Walen steht im 19. Jahrhundert eine günstige Lichtquelle zur Verfügung (Moby Dick); die Rolle des Wal-Öls übernimmt mit der raschen Abnahme der Wale⁸ dann Kerosin aus Erdöl. Nebenprodukte der mit Kohle und Eisenbahn stark anwachsenden Eisenverhüttung sind Gase, die als Lichtquelle und Wärmequelle zunehmend genutzt werden. Benz und Diesel gelingt es, Antriebsmaschinen zu bauen, die ganz ohne Dampf auskommen. Dies sind wichtige Startpunkte der Nutzung von Erdöl und Erdgas, siehe Smil (2017).

Theoriebildung Gleichzeitig werden Experimente und ihre Ergebnisse beschrieben (Boyle, Mariotte, Joule und sehr viele andere), die nach Erklärung und Einordnung verlangen. Eine der zentralen Ideen von Wissenschaft ist Konsistenz, also die Forderung, dass sich alle einzelnen Theorien nicht gegenseitig widersprechen. Langsam beginnt um 1800 eine geordnete Theoriebildung. Die Schrift von Carnot (1824) kann noch nicht gleich eingeordnet werden. Aber nur wenige Jahre später ist hier eine kritische Masse erreicht, der es gelingt, die Phänomene, Beobachtungen und die existierenden und funktionierenden Maschinen geordnet zu beschreiben (Clausius, Gibbs, Helmholtz, Kelvin und viele weitere).

Ausgehend von diesen Grundlagen explodieren dann die technischen Möglichkeiten, nutzbare Theorien und Anwendungen, nicht zuletzt mit der Nutzung der Elektrizität. Dieser Zeitraum schneller technologischer Fortschritte reicht bis zum Ende des Zweiten Weltkriegs. Letzte spannende und große Konzepte (Gasturbine, Mondflug) werden noch umgesetzt – danach sehen wir eher eine Evolution des Vorhandenen hin zum technologischen Optimum.

⁸⁾ Das erste Peak-Oil.

Zustand Die technische Thermodynamik wird kanonisiert. Sie beschreibt robust und genau die Nutzung fossiler Energieformen. Es entsteht innerhalb dieser Disziplin der Eindruck der Alternativlosigkeit dieser Verbindung von fossil und Energie.

Ende des fossilen Zeitalters Dieses fossile Zeitalter geht jetzt zu Ende. Entweder freiwillig und mit Vernunft, um das System Erde in einem Zustand zu erhalten, der für unser menschliches Wirtschaften, Leben und Überleben geeignet ist, oder schlicht, weil die fossilen Reserven erschöpft sind. Auch im zweiten Falle eher noch in diesem Jahrhundert (McGlade & Ekins). Daher ist diese Frage berechtigt: Was bleibt dann von der technischen Thermodynamik? Ist Thermodynamik ein Bestandteil der fossilen Welt und wird mit ihr verschwinden?

Und damit verbunden die Frage:

Lohnt es sich noch, Thermodynamik zu lernen? Habe ich dieses Buch umsonst gekauft?

Eine (persönliche) Antwort

Naturgesetze Thermodynamik ist heute eine in sich sehr konsistente Beschreibung von grundlegenden Naturgesetzen der Energie. Diese Beschreibung ist unabhängig vom konkreten Anwendungsfall, also insbesondere einer konkreten Technik oder ihren konkreten Maschinen und Anlagen (ihren Artefakten).

Naturgesetze sind nicht verhandelbar (denn mit wem wollte ich meinen Diskurs führen?).

Der fossile Mindset Die fossilen Energien haben einen seltsamen Mindset erzeugt: Fossile Energie ist (oder war) billige und immer verfügbare Energie. So billig, dass ihr spezieller Wert in Vergessenheit geraten ist. Heutige gesellschaftliche Diskurse ignorieren zumeist Grenzen der Verfügbarkeit von Energie. Manchmal gelangt der Diskurs noch bis zu seltsam anmutenden Forderungen nach billiger Energie (so, als ob dies ein Grundrecht wäre). Oft aber werden die beeindruckenden energetischen Rahmenbedingungen jeder wirtschaftlichen und materiellen Grundlage einfach ausgeblendet (z.B. Hall, Klitgaard 2019 oder bezogen auf Deutschland Holler et al. 2021).

Dies ist jedoch nie Teil der technischen Thermodynamik gewesen – in der Thermodynamik als Theorie ist der besondere Wert und die Begrenztheit von Energie genauso zentral angelegt wie die (unerwünschten) Umweltauswirkungen der Energiewandlung und -bereitstellung. Der fossile Mindset war immer eine Form von magischem Denken, losgelöst von irdischen Realitäten.

Die Zukunft der Thermodynamik Die Thermodynamik als Methode ist hochaktuell. Sie wird sich als Disziplin ein wenig anpassen und neu orientieren müssen. Nicht alle heutigen Inhalte, die ja z.T. spezielle Maschinen beschreiben, deren Zukunft ungewiss ist, werden in Zukunft noch so eine prominente Rolle einnehmen. Dafür werden andere Themen wichtiger werden (mehr Wärmepumpe und weniger Otto-Motor).

Die Thermodynamik bekommt neue Aufgaben. Insbesondere brauchen wir sie als Lotsensystem in eine Zukunft, in der Energie wertvoll ist, variabel und zumeist nur angebotsorientiert zur Verfügung steht. Auch deshalb hat dieses Lehrbuch einen Begleiter, der uns helfen soll, genau diese Fragen für uns zu klären (Linow 2019).

Um es deutlich zu sagen: Wir brauchen mehr Thermodynamik und mehr thermodynamischen Verstand, gerade auch mitten in unserer gesellschaftlichen Diskussion. Daher lernen Sie gerade genau das Richtige!

■ 1.4 Danke!

Dieses Buch startete als Idee im Jahr 2020. Die intensiven Diskussionen im (letzten) Fachprogramm Lehreⁿ dazu, wie wir unsere Hochschulen verändern können und wie nachhaltige Entwicklung ein integraler Teil von Studiengängen sein kann, hat mir sehr geholfen, meine Gedanken zu sortieren. Allen Teilnehmerinnen und Teilnehmern dieses disziplin- und statusgruppenübergreifenden Programms gilt daher mein erster Dank! Den relevanten Anstoß, das Projekt wirklich zu wagen, gab dann Nicole Saenger in mehreren langen Reisen zum Fachprogramm: Ohne ihre (interdisziplinäre) Ermutigung wäre ich nicht losgegangen!

Fachlich zehrt dieses Projekt auch von meiner langen Zeit in der Industrie und meinem Team und Umfeld dort, in dem wir viel und leidenschaftlich viele thermodynamische Probleme diskutiert haben – ihnen allen gilt mein herzlichster Dank für die großartige Zusammenarbeit und die Basis, mit der ich in die Lehre starten durfte.

Die fachlichen und didaktischen Diskussionen mit meinem Kollegen Bernhard Schetter hier an der Hochschule Darmstadt sind für mich wunderbar anregend und haben an sehr vielen Stellen in meiner Lehre und hier Eingang gefunden. Ich danke ihm für seine Begeisterung und seine Perspektiven, z.B. als erfahrener Didaktiker. Lukas Fischer hat aus studentischer Perspektive dieses Buch begleitet: Er hat unklare Stellen und unverständliche Sprünge gefunden, und er hat alle Aufgaben im Detail nachgerechnet. Seinem wachen Blick und seinen Anregungen verdanke ich auch hier viel.

Meinen Studentinnen und Studenten aus allen Thermodynamik-Kursen an der Hochschule Darmstadt gilt ein besonderer Dank; insbesondere allen, die Fragen gestellt haben! Viele ihrer Fragen sind hier eingegangen, und die Darstellung und die Struktur versucht, möglichst viele Antworten auf Ihre Fragen zu geben. Nachdem mich Antonia Wunderlich in einem Seminar zur kompetenzorientierte Lehre völlig neu verortet hatte, nehme ich studentischen Fragen als zentral für meine Lehre auf.

Von großem Wert sind die vielen Diskussionen und gemeinsamen Aktivitäten in der Initiative Nachhaltige Entwicklung an der h_da (i:ne) und innerhalb des Forschungsprojekts Systeminnovation Nachhaltige Entwicklung (s:ne). Silke Kleihauer hält dieses Netz zusammen, und sie ist für mich prägend über unsere vielen guten Diskussionen. Ihr und allen aus diesem Umfeld danke ich sehr herzlich!

Dem Hanser Verlag gilt Dank, dass er dieses Projekt wagt. Dem ganzen Verlagsteam um Volker Herzberg danke ich herzlich für die gute Unterstützung und Umsetzung.

So ein Projekt frisst beeindruckend viel Zeit und braucht Platz. Meine Familie hat mich jetzt viele Monate hinter meinem Rechner ertragen, sie kommt mit abwesendem Gebrumme zurecht, sie übersteht Bücherberge, die durch unser Wohnzimmer wandern, sie erträgt Papierdünen, die den Esstisch unter sich begraben wollen. Ohne euch klappt so etwas nicht, eure Unterstützung ist großartig – Danke!

Literatur

Biggs J & Tang C (2011) *Teaching for Quality Learning at University*. McGraw-Hill, Maidenhead.

Hall CAS, Klitgard K (2018) *Energy and the Wealth of Nations*. Springer, Cham.

Holler C, Gaukel J, Lesch H, Lesch F (2021) *Erneuerbare Energien. Zum Verstehen und Mitreden*. Bertelsmann, München.

Linow S (2019) *Energie – Klima – Ressourcen*. Hanser, München.

Linow S (2021) *Understanding Scale in Wicked Problems of Sustainable Development: Who Needs Dedicated Courses in Higher Education?* In Leal Filho W, Salvia AL, Brandli L, Azeiteiro UM, Pretorius R (eds) *Universities, Sustainability and Society: Supporting the Implementation of the Sustainable Development Goals*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-63399-8_4.

McGlade C, Ekins P (2015) *The geographical distribution of fossil fuels unused when limiting global warming to 2 °C*. Nature 517: 187-190.

Rittel HWJ, Webber MM (1973) *Dilemmas in a General Theory of Planning*. Policy Sciences 4: 155 – 169.

Smil V (2017) *Energy and Civilization. A History*. MIT Press, Cambridge.

VDI 2221-1, *Entwicklung technischer Produkte und Systeme – Modell der Produktentwicklung*