

Sven Linow



# Aufgaben zur angewandten technischen Thermodynamik



HANSER



## Aufgaben zur angewandten technischen Thermodynamik



### Ihr Plus – digitale Zusatzinhalte!

Auf unserem Download-Portal finden Sie zu diesem Titel kostenloses Zusatzmaterial. Geben Sie dazu einfach diesen Code ein:

plus-Kayxs-8KcE8

[plus.hanser-fachbuch.de](https://plus.hanser-fachbuch.de)



### Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

[www.hanser-fachbuch.de/newsletter](https://www.hanser-fachbuch.de/newsletter)



Sven Linow

# **Aufgaben zur angewandten technischen Thermodynamik**

HANSER

Der Autor:

*Prof. Dr.-Ing. Sven Linow*, Hochschule Darmstadt



Print-ISBN: 978-3-446-47413-0

E-Book-ISBN: 978-3-446-47837-4

Alle in diesem Werk enthaltenen Informationen, Verfahren und Darstellungen wurden zum Zeitpunkt der Veröffentlichung nach bestem Wissen zusammengestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Werk enthaltenen Informationen für Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht. Ebenso wenig übernehmen Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt also auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benützt werden dürften.

Die endgültige Entscheidung über die Eignung der Informationen für die vorgesehene Verwendung in einer bestimmten Anwendung liegt in der alleinigen Verantwortung des Nutzers.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Werkes, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 UrhG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2023 Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München

[www.hanserfachbuch.de](http://www.hanserfachbuch.de)

Lektorat: Julia Stepp

Herstellung: Melanie Zinsler

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, [www.rebranding.de](http://www.rebranding.de), Munich

Covergestaltung: Max Kostopoulos

Titelmotiv: © [gettyimages.de/weltreisendertj](http://gettyimages.de/weltreisendertj)

Satz: Eberl & Koesel Studio GmbH, Kempten

Druck und Bindung: CPI books GmbH, Leck

Printed in Germany

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einführung</b> .....	<b>1</b>
1.1	Zum Arbeiten mit diesem Buch .....	2
1.2	Dieses Buch zielt auf Ihre Kompetenzen .....	3
1.3	Lernen – von der Aufgabe zum Problem .....	5
1.4	Herangehensweise: Wie bearbeite ich Aufgaben und Probleme lösungsorientiert? .....	6
1.5	Level 4: Eigene Aufgaben erzeugen .....	9
1.6	Danksagung .....	10
	<b>TEIL I Aufgaben</b> .....	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>Thermodynamische Grundlagen</b> .....	<b>15</b>
2.1	Konzepte und Definitionen .....	15
2.2	Rechenaufgaben .....	17
2.3	Komplexere Probleme .....	21
<b>3</b>	<b>Homogene Stoffe beschreiben</b> .....	<b>27</b>
3.1	Konzepte und Definitionen .....	27
3.2	Rechenaufgaben .....	29
3.3	Komplexere Probleme .....	34
<b>4</b>	<b>Gemische</b> .....	<b>42</b>
4.1	Konzepte und Definitionen .....	42
4.2	Rechenaufgaben .....	44
4.3	Komplexere Probleme .....	47

<b>5</b>	<b>Feuchte Luft</b> .....	<b>52</b>
5.1	Konzepte und Begriffe verstehen .....	52
5.2	Rechenaufgaben .....	54
5.3	Komplexere Probleme .....	57
<b>6</b>	<b>Vergleichsprozesse und Kreisprozesse</b> .....	<b>62</b>
6.1	Konzepte und Definitionen .....	62
6.2	Rechenaufgaben .....	65
6.3	Komplexere Probleme .....	67
<b>7</b>	<b>Chemische Reaktionen</b> .....	<b>76</b>
7.1	Konzepte und Definitionen .....	76
7.2	Rechenaufgaben .....	78
7.3	Komplexere Probleme .....	80
<b>8</b>	<b>Wärmeübertragung</b> .....	<b>83</b>
8.1	Konzepte und Definitionen .....	83
8.2	Rechenaufgaben .....	86
8.3	Komplexere Probleme .....	88
	<b>TEIL II Lösungen</b> .....	<b>93</b>
<b>2</b>	<b>Thermodynamische Grundlagen</b> .....	<b>95</b>
	Problem 2.1: Was ist 1 Gt Kohlendioxid? .....	95
	Problem 2.2: Heißluftballon .....	97
	Problem 2.3: Mischbatterie und Entropieerzeugung .....	99
	Problem 2.4: Produktionshalle .....	101
	Problem 2.5: Meeresspiegelanstieg .....	103
	Problem 2.6: Ammoniak als Wasserstoff-Speicher .....	106
<b>3</b>	<b>Homogene Stoffe beschreiben</b> .....	<b>109</b>
	Problem 3.1: Carbon Capture and Storage (CCS) .....	109
	Problem 3.2: Wasserstoff-Pipeline .....	113
	Problem 3.3: Bleed-Air .....	117
	Problem 3.4: Wasserstoff-Tankstelle .....	121

Problem 3.5: Eisenbahnunglück .....	124
Problem 3.6: Aufräumen und entsorgen .....	126
Problem 3.7: Was kostet Druckluft? .....	128
Problem 3.8: Erdgaspipeline warten .....	131
<b>4 Gemische .....</b>	<b>135</b>
Problem 4.1: Schrott .....	135
Problem 4.2: Rezeptur für das Fensterglas .....	138
Problem 4.3: Meerwasser entsalzen .....	143
Problem 4.4: Carbon Capture and Storage .....	149
<b>5 Feuchte Luft .....</b>	<b>154</b>
Problem 5.1: Klimatisierung .....	154
Problem 5.2: Lacktrocknung .....	160
Problem 5.3: Brennwert ausnutzen .....	165
Problem 5.4: Stausee .....	168
Problem 5.5: Das ausgetrocknete Mittelmeer .....	172
<b>6 Vergleichsprozesse und Kreisprozesse .....</b>	<b>177</b>
Problem 6.1: Rolls-Royce Merlin .....	177
Problem 6.2: Diesellokomotive für Lhasa Hauptbahnhof .....	181
Problem 6.3: TP400-D6 .....	184
Problem 6.4: Argon-Gasturbine .....	188
Problem 6.5: Parabolrinnen-Kraftwerk Andasol 3 .....	192
Problem 6.6: Kohlekraftwerk Maasflakte 3 .....	196
Problem 6.7: Druckluftspeicher .....	199
Problem 6.8: Lokales Wärmenetz .....	204
Problem 6.9: Ammoniakabscheidung .....	208
<b>7 Chemische Reaktionen .....</b>	<b>218</b>
Problem 7.1: Oxyfuel .....	218
Problem 7.2: Schutzgasatmosphäre .....	221
Problem 7.3: Katalytische Abgasreinigung .....	223
Problem 7.4: Wasserstoff-Direktverbrenner .....	228

<b>8</b>	<b>Wärmeübertragung</b>	<b>239</b>
	Problem 8.1: Zwischenspeicher	239
	Problem 8.2: Todesstern	242
	Problem 8.3: Brennt es im Container?	244
	Problem 8.4: Klausur schreiben?	249
	Problem 8.5: Drehrohrofen	252
	Problem 8.6: Klausur im Zelt	257
	Problem 8.7: Fenster stehen unter Denkmalschutz	263
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>270</b>

Die Thermodynamik ist kein einfaches Fach. Zumeist wird sie erst in einem höheren Semester gelehrt, 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 zunehmend in die Lehre eingebunden werden. Die gesellschaftlichen Anforderungen an gute Lehre sind in Bewegung, und wir erwarten heute, dass Absolvent:innen 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.

Hinzu kommt die fühlbare und schnelle Umgestaltung unserer Lebenswelt und unserer Energieinfrastruktur

- durch die gemeinsam wirkenden Kräfte digitaler Wirtschaftsformen (die auch zukünftig Energie benötigen),
- durch das absehbare Ende oder den freiwilligen Ausstieg aus fossilen Energieträgern und die damit verbundene Energiewende,
- durch den regionalen und globalen Klimawandel und seine Auswirkungen auf unsere Lebenswelt und auf energetische Bedürfnisse

sowie daraus folgende Veränderungen in Produktionsprozessen und Lieferketten, Warenangeboten und Bedürfnissen. Diese Aspekte sollten sich in der Lehre im genutzten Kontext widerspiegeln.



Diese drei großen Aspekte waren die Leitplanken für die Entwicklung meines Lehrbuches *Angewandte technische Thermodynamik* (ISBN 978-3-446-47034-7), das 2022 im Carl Hanser Verlag erschienen ist. Die vorliegenden *Aufgaben zur angewandten technischen Thermodynamik* sind die ideale Ergänzung zum Lehrbuch, können jedoch auch unabhängig davon eingesetzt werden. Als Aufgabensammlung erklärt dieses Buch konsequenterweise nur wenig. Deshalb wird an den entsprechenden Stellen mit dem Kürzel „Lehrbuch“ auf weiterführende Erläuterungen verwiesen.

## ■ 1.1 Zum Arbeiten mit diesem Buch

Ziel Ihrer Arbeit mit diesem Buch sollte nicht sein, die Aufgaben einfach nur entlang der Musterlösung durchzurechnen, denn dann ist die Gefahr groß, dass Sie an allen schwierigen Stellen direkt zur Musterlösung blättern, ohne selbst aktiv zu werden. Beim Studium technischer Fächer – und damit auch beim Studium der Thermodynamik – kommen mehrere aufeinander aufbauende Lernstufen (Level) zum Einsatz:

1. **Die Konzepte selbst sicher verstehen (Level 1):** Sie haben ein Konzept dann sicher verstanden, wenn Sie es anderen spontan erklären können. Dies üben Sie hier durch die Beantwortung von Fragen.
2. **Einfache Aufgaben lösen, bei denen der Lösungsweg eindeutig ist (Level 2):** Auf dieser Lernstufe geht es darum, das grundlegende Handwerkszeug korrekt verwenden zu können. Wenn Sie z. B. einen Engländer benutzen sollen, dann müssen Sie wissen, wie ein Engländer aussieht, was Sie damit machen und wie Sie ihn richtig ansetzen. Dies üben Sie, übertragen auf die Werkzeuge der Thermodynamik, auf Level 2.
3. **Komplexe Probleme bearbeiten (Level 3):** Hier ist nicht vorgegeben, welches Werkzeug Sie benutzen müssen, um zum Erfolg zu kommen. In diesem Fall versuchen Sie im ersten Schritt, sicher zu einer eigenen Beschreibung des Problems zu gelangen, also Konzepte anzuwenden, um dann selbst festzulegen, welche Werkzeuge Sie für die Lösung verwenden wollen.

Durch all diese Lernstufen (Level) zieht sich als verbindendes Element das Verstehen wichtiger technischer Probleme sowie typischer technischer Anlagen und Prozesse. Es handelt sich dabei um Probleme, Anlagen und Prozesse, die in der Thermodynamik im Fokus stehen, d. h., Sie erlernen wichtige grundlegende Eigenschaften dieser Prozesse und Anlagen. Dieser Kontext ist wichtig, damit Sie die Qualität Ihrer eigenen Ergebnisse selbst bewerten können („Kann das Ergebnis jetzt stimmen?“). Diese verbindenden Elemente beantworten die Frage, **wozu** Sie dies lernen.

In diesem Aufgabenbuch sind die Inhalte der Thermodynamik in folgende sieben Themenbereiche aufgeteilt:

- Thermodynamische Grundlagen (Kapitel 2)
- Homogene Stoffe beschreiben (Kapitel 3)
- Gemische (Kapitel 4)
- Feuchte Luft (Kapitel 5)
- Vergleichs- und Kreisprozesse (Kapitel 6)
- Chemische Reaktionen (Kapitel 7)
- Wärmeübertragung (Kapitel 8)

Jedes Kapitel fokussiert sich auf einen Themenbereich und folgt dieser Logik der drei Lernstufen (Level). Dafür ist jedes Kapitel in folgende drei Abschnitte gegliedert:

1. **Konzepte und Definitionen (Level 1):** Die Beantwortung der Fragen, die sich mit wichtigen Konzepten und Definitionen beschäftigen, gehen Sie am besten im Team, also mit Ihrer Lerngruppe, an.

2. **Rechenaufgaben (Level 2):** Die Aufgaben rechnen Sie idealerweise allein durch.
3. **Komplexere Probleme (Level 3):** Bei den komplexeren Problemen können Sie in Ihrer Lerngruppe diskutieren, wie Sie am besten vorgehen, also gemeinsam den Lösungsweg festlegen. Das eigentliche Rechnen erledigen Sie dann wieder allein.

Nutzen Sie daher alle Abschnitte der Kapitel. Es gibt keine Abkürzung!

Die benötigten Stoffdaten sind oft nicht angegeben. Diese finden Sie in jedem guten Lehrbuch zur Thermodynamik und für dieses Buch unter *plus.hanser-fachbuch.de*. Ein Lernziel dieses Buches ist es, dass Sie sich das von Ihnen verwendete Lehrbuch aktiv als Werkzeugkasten aneignen. Mein Lehrbuch ist hier die Referenz, denn sämtliche Gleichungen und Stoffwerte sind daraus entnommen. Alle wichtigen Konzepte, Begriffe, Symbole und Konstanten sind dort definiert.

Das Buch besteht aus zwei Teilen. Teil I enthält das Lernmaterial und Teil II die Lösungen. Der im Buch enthaltene Lösungsteil beschränkt sich auf die komplexen Probleme (Level 3), deren Lösungswege auf ausführliche Weise erläutert werden. Zu den Fragen (Level 1) gibt es ganz bewusst keine Musterlösungen. Bei Bedarf können Sie die Antworten in Ihrem Lehrbuch nachschlagen. Die Lösungen zu den Rechenaufgaben (Level 2) sind unter *plus.hanser-fachbuch.de* zu finden. Zudem finden Sie dort Stoffwerte, die beim Lösen der Aufgaben unterstützen, und die im Buch enthaltenen Diagramme in einem größeren Format. Im Lehrbuch finden Sie darüber hinaus weitere nützliche Stoffwerte sowie Hinweise, wie Sie an Stoffwertdiagramme herankommen. Weitere Erläuterungen zu den Lösungen finden Sie in Abschnitt 1.2.



### Fehler?!

Ja, ich habe viel Aufwand betrieben, damit dieses Buch keine Fehler enthält. Doch die Wahrscheinlichkeit ist hoch, dass ich nicht (ganz) erfolgreich war. Bitte teilen Sie dem Verlag oder mir mit, wenn Sie etwas Verbesserungswürdiges finden. Zudem möchte ich die Inhalte gerne aktuell halten. Falls es weitere Auflagen geben wird, kann ich mir daher gut vorstellen, darin nicht nur Korrekturen vorzunehmen, sondern das Buch auch um zusätzliche Problemstellungen zu aktuellen Entwicklungen und Themen zu erweitern.

## ■ 1.2 Dieses Buch zielt auf Ihre Kompetenzen

Es gibt einen großen Unterschied zwischen Wissen und Kompetenzen. Dieses Arbeitsbuch und das dazugehörige Lehrbuch setzen den Fokus auf Ihren Kompetenzerwerb. Der Unterschied wird deutlich, wenn wir uns die Ziele, die mit Kompetenzen, und die, die mit Wissen verbunden sind, ansehen: Wissen und Wissensvermittlung zielt auf das Einhalten von vorgegebenen Prozessen und Abläufen. Es gibt eine klare Hierarchie und eine klare Richtung. Kompetenzen zielen auf Eigenständigkeit und gemeinsame Erkenntnisse, wie Tabelle 1.1 zusammenfasst.

Kompetenzen in Lehrbüchern zu vermitteln ist nicht ganz einfach, da ein Buch nur eine Richtung hat. Damit Sie diesem Buch mehr als nur Wissen entnehmen können, habe ich mich ganz bewusst für die Aufteilung der Kapitel in Lernstufen (Level), für die Verwendung möglichst realer Probleme aus der aktuellen technischen Diskussion und für den Versuch, Probleme so zu gestalten, dass mehrere Lösungswege zum Ziel führen, entschieden. Darüber hinaus finden Sie in Abschnitt 1.5 eine Anregung, wie Sie eigene Probleme gestalten können (Level 4).

**Tabelle 1.1** Die Unterschiede zwischen Wissen und Kompetenz  
(Quelle: <https://robm.me.uk/2021/08/competence-not-literacy>)

Wissen	Kompetenz
passiv, Vorgaben von oben	aktiv, Entwicklung von unten
Lösen künstlicher Probleme (Aufgaben)	Lösen von Problemen der realen Welt
ein (festgelegter) Blick auf die Welt	viele unterschiedliche Perspektiven
Es sollen Konsument:innen geschaffen werden.	Menschen sollen dazu angeregt werden, selbst kreative Urheber:innen zu sein.
vorgegebene (externe) Motivation	Anregung zu eigener Motivation
Prozesse einhalten	Ergebnisse selbst erzeugen

## Lösungen zu den Aufgaben dieses Buches

Dieser Fokus auf Kompetenzen und auf das tiefere Verstehen der Methoden hat zur Folge, dass die Lösungen in diesem Buch teils viel Raum einnehmen:

- 1. Konzepte und Definitionen (Level 1):** Ich habe mich ganz bewusst dafür entschieden, dass es zu den Fragen keine Musterlösungen gibt. Wenn Sie unsicher sind, dann schauen Sie in Ihr Lehrbuch oder fragen andere Menschen, bis Sie die Frage selbst beantworten können. Die Fragen sind also als Anregung für die Diskussion in Ihrer Lerngruppe gedacht.
- 2. Rechenaufgaben (Level 2):** Musterlösungen zu den Aufgaben finden Sie unter *plus.hanser-fachbuch.de*. Dies ist schlichtweg dadurch begründet, dass ich das Buch nicht unnötig aufblähen wollte, da der Lösungsweg in der Regel naheliegend sein sollte, d. h., Sie sollten die Musterlösung eigentlich nicht benötigen.
- 3. Komplexere Probleme (Level 3):** Zu allen Problemstellungen ist eine ausführlich diskutierte Lösung in Teil II des Buches enthalten. Hierbei handelt es sich oft eher um Lösungsvorschläge, da Sie das Ziel häufig auch auf anderen Wegen erreichen könnten. Im Fokus der Lösungsvorschläge steht dabei das Warum: Warum verwende ich diese Gleichung? Darf ich jene Gleichung hier verwenden? Wie genau wird mein Ergebnis sein? Die Problemstellungen sind bewusst so gestaltet, dass Sie auf Schwierigkeiten stoßen oder dass es mehrere Lösungswege gibt. Manchmal fehlen auch Informationen, sodass Sie improvisieren müssen. Ich habe versucht, interessante und – zumindest für mich – spannende aktuelle Fragestellungen für die Probleme zu verwenden. So ergibt sich die Möglichkeit, dass Sie auf dem Weg zu Ihrem Ergebnis reale Fragen beantworten können, wodurch Ihnen die Probleme und ihre möglichen Lösungswege hoffentlich noch lange in Erinnerung bleiben werden.

## ■ 1.3 Lernen – von der Aufgabe zum Problem

Lernen für eine Prüfung unterscheidet sich vom selbstbestimmten freien Lernen:

- Die Prüfung hat ein fixes Datum (Sie müssen zum Zeitpunkt X optimal vorbereitet sein), ein klares Ziel (= Bestehen der Prüfung und idealerweise eine gute Note erreichen) und in der Regel klar definierte Prüfungsthemen. Wenn Sie ein Studium oder eine Ausbildung absolvieren, werden Sie in regelmäßigen Abständen geprüft. Darauf müssen Sie sich stets vorbereiten. Dieses Buch soll Sie dabei unterstützen.<sup>1</sup>
- Freies Lernen verfolgt andere Ziele. Wir machen es in unserer Freizeit, aber auch im Beruf. Auch hier gibt es Momente, in denen wir gut vorbereitet sein sollten oder in denen uns die Arbeit gut von der Hand gehen muss, da uns das Ergebnis am Herzen liegt. Im besten Fall können Sie die Motivation und Freude des freien Lernens mit in die Prüfungsvorbereitung nehmen. Dies gelingt eher, wenn Sie das Thema persönlich interessiert und Sie neugierig auf die Ergebnisse sind.

Ein Ansatz für erfolgreiches Lernen beginnt mit Interesse und Begeisterung für das Fach. Lesch und Forstner<sup>2</sup> nennen dies „*Romantik*“. Diese erste Phase des Lernens lässt sich mit dem Schlagwort „Entdecken“ beschreiben und geht z. B. mit folgenden Gedanken einher: „Wow, das alles kann man mit Thermodynamik machen!?“<sup>3</sup> Welche anderen (aktuellen/drängenden/wichtigen) Themen kann ich damit noch bearbeiten? Welche überraschenden Erkenntnisse über meine Welt bekomme ich dadurch?“ Diese Phase kann im besten Fall das Interesse erzeugen, das wir benötigen, um leicht und mit Freude bis zur Prüfung durchzukommen.<sup>4</sup>

Zentral für die zweite Phase ist die notwendige Präzisierung, die durch das Aneignen der fachlichen Basis, der Begriffe und Definitionen sowie der speziellen Methoden und zentralen Vorgehensweisen erfolgt. In den Technikwissenschaften zielen Methoden immer darauf ab, quantitative Aussagen treffen und diese quantitativen Aussagen ganz konkret auf die Welt beziehen zu können. Diese Phase benötigt Disziplin. Damit wir diese Disziplin gerne aufbringen, ist Neugier und Begeisterung für das Fach aus der ersten Phase erforderlich. Gemeint ist damit Ihre intrinsische Motivation.<sup>5</sup>

Leider kommt dann – Zack – die Prüfung und – Zack – müssen Sie sich schon dem nächsten Fach widmen. Eigentlich könnten Sie in der nun anschließenden dritten Phase – ausgehend von der frisch angeeigneten Basis an Kompetenzen – frei eigene Themen untersuchen und dabei Ihre Kenntnisse erweitern, vertiefen und verallgemeinern. Dies wäre Level 4 in der bereits eingeführten Taxonomie der Lernstufen: Wenn Sie selbst herausfinden wollen, wie etwas funktioniert, dann lernen Sie spielerisch, mit Spaß und am wirksamsten. Doch leider sieht das unsere enge Studiengangs-Planung nicht vor ...

<sup>1</sup>) Ich bin da ganz eigennützig. Mir bereitet es große Freude, gute Prüfungen zu lesen oder abzunehmen.

<sup>2</sup>) Lesch, H./Forstner, U.: Wie Bildung gelingt. Ein Gespräch. WGB, Darmstadt 2021

<sup>3</sup>) Thermodynamik steht für ein beliebiges Fach, das Sie gerade lernen.

<sup>4</sup>) Diese Beschreibung setzt natürlich voraus, dass wir (ich und Sie) uns begeistern und neugierig machen lassen wollen, also empfänglich dafür sind.

<sup>5</sup>) Falls Studieren nur ein notwendiges Übel, eine Art freudloser Verrichtung ist, dann braucht es einen anderen Antrieb für die immer notwendige Disziplin. Woher Sie diesen Antrieb dann bekommen können? Das überlasse ich Ihnen ...

Was Sie aus diesem Abschnitt mitnehmen sollten: Da Disziplin besser gelingt, wenn wir wissen wofür, sollten wir dieses „Wofür“ gleich zu Beginn für uns herausfinden.

## ■ 1.4 Herangehensweise: Wie bearbeite ich Aufgaben und Probleme lösungsorientiert?

Um Aufgaben und Probleme lösungsorientiert bearbeiten zu können, benötigen wir eine Methode, mit der wir zielgerichtet loslegen können. Einfach auf die Klausur zu starren und Panik zu bekommen, ist keine gute Idee. Allein deshalb lohnt es sich, geordnet und in kleinen Schritten loszulegen. Eine Möglichkeit nach George Pólya<sup>6</sup> ist folgende:

1. Ich verstehe die Aufgabenstellung: Was wird gefragt?
2. Ich mache einen Plan: Dazu versuche ich, einen Weg zu definieren, wie ich mit einzelnen Teilschritten zum Ziel komme. Ich zerlege das Problem in einzelne Aufgaben, für die ich z. B. jeweils geeignete Gleichungen aufstelle.
3. Ich führe den Plan aus.
4. Ich schaue mir Lösung und Lösungsweg an und reflektiere sie.

Das klingt erst einmal offensichtlich und einfach, doch in der Umsetzung ist es das häufig nicht. Pólya war Mathematiker und dachte vorrangig an komplexe Probleme, d. h., einige seiner Ideen sind erst für das Verfassen einer Abschlussarbeit wirklich von Bedeutung, doch viele können wir auch schon für die Vorbereitung auf eine Thermo-Prüfung nutzen.

**Aufgabenstellung verstehen:** Der erste Schritt ist, auch in einer Prüfungssituation, ausgesprochen wichtig. Scheitern kann oft auf diesen Schritt zurückgeführt werden. Zum ersten Schritt gibt es mit Fokus auf die Aufgabenstellung einige zentrale Leitfragen:

- Was soll ich ganz konkret herausfinden oder berechnen? Oft lässt sich dies konkreter fassen als die Frage danach, was die Unbekannte ist, was die Randbedingungen sind und was die bekannten Daten sind.
- Kann ich die Aufgabenstellung mit meinen eigenen Worten beschreiben?
- Verstehe ich alle Begriffe aus der Aufgabenstellung?
- Enthält die Aufgabenstellung alle benötigten Informationen, um eine Lösung zu finden? Falls nicht: Woher könnte ich diese Informationen jetzt bekommen?
- Gibt es eine Darstellung oder ein Diagramm, mit dem ich die Aufgabenstellung gut erfassen kann? Gibt es das Diagramm schon oder soll ich selbst eines anfertigen?
- Muss ich noch Fragen stellen, um die Aufgabenstellung zu verstehen?

Gerade in der Prüfungssituation müssen Sie klären, was von Ihnen erwartet wird. Nehmen Sie sich die Zeit dafür.

---

<sup>6)</sup> Pólya, G.: *How to solve it*. Princeton University Press 1945. Siehe auch: [https://en.wikipedia.org/wiki/How\\_to\\_Solve\\_It](https://en.wikipedia.org/wiki/How_to_Solve_It)

**Plan aufstellen:** Der zweite Schritt ist zentral, denn hier zeigen Sie, dass Sie sich die Methoden angeeignet haben. Wenn die Aufgabenstellung bereits aus vielen detaillierten Teilaufgaben besteht, dann wurde ein wesentlicher Teil dieses Schritts bereits für Sie erledigt und Sie müssen vorrangig den Plan verstehen, der Sie zum Ziel führen will. Oft genügt es zum Bestehen, nur die ersten leichteren Schritte umzusetzen. Wenn Sie nicht bis zum Schluss dabeibleiben, entgeht Ihnen bei realen Problemen allerdings leider der Clou des Problems.

Gerade bei Prüfungen, in denen ein Problem als Aufgabenstellung verwendet wird oder bei denen die qualitative Bewertung eine wichtige Rolle spielt, steht Ihr eigener Plan weit im Vordergrund der Bewertung. Kompetenten Expert:innen stehen viele robuste Ansätze zur Verfügung, mit denen sie auf unterschiedlichen Wegen zum Ziel gelangen können. Für Sie als Noviz:innen ist dies oft der schwierigste Teil. Leider kommt die Expertise erst durch häufiges eigenständiges Lösen von Problemen (die vorangehend bereits genannte Disziplin).

Für das Absolvieren einer Thermodynamik-Prüfung sind folgende Strategien besonders hilfreich:

- Stellen Sie eine geordnete Liste mit sinnvollen (aufeinander aufbauenden) Schritten auf.
- Fertigen Sie eine Skizze an, die den Prozess/die Anlage/den Gegenstand und die Aufgabenstellung abbildet.
- Stellen Sie Gleichungen auf, mit denen das System oder der Prozess beschrieben werden, und untersuchen Sie, ob das Ziel mit diesen Gleichungen erreicht werden kann. (Spoiler: Das geht in Thermo fast immer.)
- Gehen Sie von hinten nach vorne vor (Was bedeutet es für das System, wenn ich das Ziel bereits erreicht hätte?) oder starten Sie in der Mitte.
- Eliminieren Sie mögliche Vorgehensweisen (Wenn ideales Gas nicht eingesetzt werden kann, darf ich dann ein h-s Diagramm verwenden?).
- Was weiß ich über das System oder den Prozess? Wo erwarte ich das Ziel? Warum?
- Kenne ich ein ähnliches Problem? Was davon kann ich auf das vorliegende Problem übertragen und was nicht?
- Welche mir bekannten Probleme haben dieselben Unbekannten? Kann und darf ich diese nutzen oder übertragen?
- Kann ich das Problem anders formulieren, also so, dass es mir zugänglicher wird?

Für all diese Strategien (und die vielen anderen) ist Ihre Kenntnis und Erfahrung erforderlich.

**Plan ausführen:** Beim Ausführen des Plans muss jeder Schritt überprüft werden: Ist der Schritt richtig ausgeführt? Ist das Ergebnis richtig? Ist das Ergebnis für die Zielerreichung sinnvoll? Dieser Teil kann recht einfach ablaufen, wenn der Plan in Ordnung war. Leider kann es passieren, dass wir mittendrin feststellen, dass der Plan in eine Sackgasse führt. Dann müssen wir mit dem Wissen und der Erfahrung, die wir bis hierher gesammelt haben, wieder zurückgehen und einen neuen Plan aufstellen. Dieses Buch enthält Musterlösungen, die bewusst eine Sackgasse aufzeigen.

**Ergebnis reflektieren:** Kann ich das Ergebnis überprüfen? Ist der ermittelte Wert sinnvoll und richtig? Ist die Argumentation (also z. B. die Kette der verwendeten Formeln) richtig? Kann ich das Ergebnis (im Rückblick) auch anders erhalten oder abschätzen? In der Prüfung zeigen Sie an dieser Stelle, ob Sie einordnen können, was Sie gerade berechnet haben. Gerade wenn Sie in eine Sackgasse gelaufen sind oder sich auf dem Weg verrechnet haben (was durchaus vorkommt), dann zeigen Sie jetzt Ihren Überblick und Ihre Kompetenz. Dieser Schritt ist bei der Vorbereitung besonders wichtig: Warum hat meine Vorgehensweise so gut geklappt? Was habe ich richtig gemacht und was kann ich woanders vielleicht wieder verwenden?



### Ich möchte mehr wissen!

Wenn Sie als Student:in mehr über lösungsorientiertes Arbeiten erfahren möchten, dann sei Ihnen der Wikipedia-Eintrag oder das Buch von George Pólya empfohlen. Wer sich in die Themen Didaktik und Prüfungsgestaltung einlesen will, findet im Buch von Biggs und Tang sowie in dem von Lesch und Forstner hilfreiche Informationen.

*Biggs, J./Tang, C.: Teaching for Quality Learning at University. McGraw Hill, Maidenhead 2021*

*Lesch H./Forstner, U.: Wie Bildung gelingt. Ein Gespräch. WGB, Darmstadt 2021*

*Pólya, G.: How to solve it. Princeton University Press 1945. Siehe auch: [https://en.wikipedia.org/wiki/How\\_to\\_Solve\\_It](https://en.wikipedia.org/wiki/How_to_Solve_It)*

Als gute Ingenieur:innen werden Sie weitere Strategien brauchen, mit denen Sie arbeiten können. Einiges wird Ihnen dann (als Expertise) ganz einfach von der Hand gehen, aber anderes wird nach wie vor neu und ungewohnt sein. Für diese Fälle brauchen Sie gute Problemlösungsstrategien – zumindest, wenn Sie mit Freude arbeiten und gerne Verantwortung übernehmen wollen.

In den Technikwissenschaften zerlegen wir Probleme in eine Reihe von Elementen und Einzelschritten (= der Plan). Ein wesentlicher Grund hierfür ist, dass sich dann ganz viele einzelne dieser Elemente auf diese Weise wie eine Aufgabe lösen lassen und dass es so für das einzelne Element nur eine richtige Antwort gibt. Trotzdem bleibt die Herausforderung bestehen, das Problem in seiner Gesamtheit zu lösen. Dies bleibt deutlich, denn unser Plan ist einer von mehreren unterschiedlichen Lösungswegen, die (das ist die Eigenschaft eines Problems) zu unterschiedlichen Lösungen führen können. Hinzu kommt, dass jede Bewertung letztendlich subjektiv ist und z. B. kritisch von den dafür verwendeten Kriterien abhängt.

Fazit: Aufgaben lösen zu können (Level 2), ist ein wichtiges Lernziel. Doch gleichzeitig genügen Aufgaben nicht, denn sie bereiten uns nicht darauf vor, Probleme zu lösen (Level 3). Dies ist jedoch von entscheidender Bedeutung, da zumindest die guten und besser bezahlten Ingenieur:innen wissen, wie sie Probleme angehen.

## ■ 1.5 Level 4: Eigene Aufgaben erzeugen

Wenn Sie nach dem Durcharbeiten dieses Buches den Eindruck haben, dass es nicht genug Aufgaben oder Probleme enthält, dann können Sie sich jederzeit eigene ausdenken. Der Nachteil ist, dass Sie die Musterlösung nirgends nachschlagen können und Sie daher nicht mit absoluter Sicherheit wissen, ob das Ergebnis richtig ist. Genau dies ist übrigens auch mein Problem beim Verfassen dieses Buches.

Der Vorteil ist, dass Sie sich viel intensiver mit dem Thema auseinandersetzen müssen, denn plötzlich zählt es richtig! Da Sie vermutlich noch nie eigene Aufgabenstellungen erzeugt haben, gebe ich Ihnen im Folgenden meine Erfahrungen weiter.

**Rechenaufgaben (Level 2):** Aufgaben sind recht einfach zu erzeugen, denn es geht darum, eine Methode konkret anzuwenden. Sie könnten vorhandene Aufgaben verwenden und darin z. B. folgende Parameter variieren:

- Verwendung eines anderen Stoffs: Wasserstoff statt Luft, Alkohol statt flüssigen Wassers usw.
- Verwendung anderer Abmessungen: Variieren Sie Volumen, Masse, Durchmesser, Oberfläche, Temperatur usw. und probieren Sie aus, was dies für einen Einfluss hat.
- Verwendung eines ähnlichen Beispiels: Betrachten Sie z. B. einen anderen Stausee oder rechnen Sie eine ähnliche Gasturbine durch.

Dabei bleibt der Lösungsweg gleich oder zumindest ähnlich. Gleichzeitig bekommen Sie ein gutes Gefühl dafür, wie sich diese Variationen auf das Ergebnis auswirken. Auf Level 2 werden Sie kritisch Ihren Lösungsweg durchgehen, um zu schauen, ob alles in Ordnung ist. Sie sollten Ihr Ergebnis unbedingt auf Plausibilität hin prüfen. Die von mir verwendeten Quellen können Ihnen eine kleine Anregung geben, wo Sie die benötigten Daten gegebenenfalls selbst finden können.

**Probleme (Level 3):** Das Vorgehen für Probleme ist ähnlich, aber gleichzeitig herausfordernder, denn jetzt suchen Sie selbst nach einem Lösungsweg. Sie benötigen dafür Folgendes:

- Sie müssen zunächst eine eigene Fragestellung finden. Diese sollten Sie aus Ihrem eigenen Interesse heraus entwickeln. Gute Quellen für Ihre eigenen Fragestellungen sind aktuelle Medienberichte oder Technikmuseen. Die Frage „Warum genau funktioniert das so?“ ist ein idealer Startpunkt. Oder Ihr „Cranky Uncle“ (<https://crankyuncle.com>) nervt mal wieder und Sie wollen ihm beweisen, was er für einen Bullshit<sup>7</sup> verzapft.
- Außerdem benötigen Sie reale Daten. Das Internet bietet sehr viel Material. Insbesondere Wikipedia ist als Einstieg oft gut geeignet. In meinem Lehrbuch finden Sie sehr viele Hinweise, wo Sie Stoffwerte und spezielle Eigenschaften recherchieren können. Unterschätzen Sie den Aufwand nicht, den Sie für die Datenrecherche betreiben müssen. Damit ist schnell die eine oder andere Stunde vergangen. Doch diese Suche hilft Ihnen ganz konkret beim Lernen, denn Sie eignen sich so nebenbei viele grundlegende Konzepte an bzw. vertiefen diese.

<sup>7)</sup> Zur Einordnung von Bullshit verweise ich auf folgendes Buch: *Frankfurt, H. G.: Bullshit. Suhrkamp, Frankfurt 2020*

- Planen Sie viel Geduld für die Suche nach dem Lösungsweg ein. Der Lösungsweg ist auf Level 3 nicht mehr klar, und es kann Ihnen gut passieren, dass Sie in Sackgassen laufen. Diese Sackgassen selbst zu erkennen ist großartig für Ihr Lernerlebnis.
- Führen Sie regelmäßig kritische Abschätzungen durch, um (Zwischen-)Ergebnisse zu überprüfen (Kann das so angehen?). Solche Fragen bauen im Hintergrund Ihre Kompetenzen auf, denn dafür nutzen Sie Ihre bisher erlangten Fähigkeiten.

Sehr hilfreich ist auch eine geordnete Fehlersuche, insbesondere wenn Ihnen das Ergebnis seltsam vorkommt:

1. Habe ich die richtigen Werte verwendet?
2. Habe ich richtig gerechnet?
3. Habe ich die Zustände wirklich richtig beschrieben?
4. Durfte ich diese Gleichung hier verwenden? Gilt jene Gleichung an dieser Stelle?
5. Habe ich einen wichtigen Effekt übersehen?
6. Unterbrechen Sie die Arbeit, indem Sie spazieren gehen, Freunde treffen oder eine Nacht drüber schlafen.

Wenn Sie sich eigene Aufgaben oder Probleme ausdenken, ist der Nutzen für Sie sehr hoch. Aus dem trockenen und abstrakten Lehrbuchwissen wird mit einem Mal Ihre ganz persönliche Erfahrung. Vieles stellt sich Ihnen plötzlich ganz anders dar. Wo vorher ein Abgrund gähnte, werden Zusammenhänge offensichtlich. Sie selbst verknüpfen Ihr Wissen mit Ihren dabei schnell wachsenden Kompetenzen. Wenn etwas klappt, gewinnen Sie echtes Selbstbewusstsein.

Methodisch gesehen befinden Sie sich an dieser Stelle im Bereich der (Wieder-)Entdeckung Ihres Interesses am Thema (die schon erwähnte „Romantik“) und zugleich in Phase 3, in der es um die Aneignung Ihrer Disziplin geht. Das ist gerade am Anfang durchaus mühsam, da Sie die Sicherheit von vorgegebenen Aufgaben bewusst verlassen. Doch es ist auch ein echter Schritt hin zu Ihrer Selbstermächtigung, die durch spielerische Aneignung, durch eigenes Entdecken und Forschen sowie durch zumindest phasenweise vorhandene Freude (Flow) entsteht.

Spätestens in Ihrer Abschlussarbeit sollten Sie diese Fähigkeiten besitzen, daher dürfen Sie damit jetzt schon beginnen. Ich wünsche Ihnen viel Erfolg dabei!

## ■ 1.6 Danksagung

Dieses Arbeitsbuch ist auf Anregung von Volker Herzberg aus dem Carl Hanser Verlag entstanden. Ihm, dem gesamten Verlagsteam und insbesondere seiner Nachfolgerin Julia Stepp sowie Tim Borck danke ich sehr für das Vertrauen, die Sorgfalt und die großartige Unterstützung bei diesem Projekt.

Die Anregungen für die Probleme, Aufgaben und Fragen kommen in erster Linie von meinen Student:innen der Hochschule Darmstadt. Ihnen, insbesondere wenn Sie mir Fragen stellen, wenn Sie sich trauen, offenzulegen, wo sie Dinge nicht verstehen, und wenn Sie mir

Anregungen gegeben haben, gilt mein großer Dank. Weitere Anregungen für Problemstellungen kommen aus interessanten Abschlussarbeiten, die ich betreuen durfte.

Eine zusätzliche Quelle für Inhalte sind Diskussionen in der Nachbarschaft, spannende Projekte an der Hochschule Darmstadt und in der Stadt, zu denen ich beitragen darf, Fragen und Ideen engagierter Menschen, die eine gute Zukunft gestalten wollen, aber auch technische Diskussionen der letzten Jahrzehnte. Einige der Beispiele in diesem Buch geben Antworten auf Eure wichtigen Fragen. Diese Themen aufzunehmen, sie in die Sprache meiner Disziplin zu übersetzen und zu zeigen, wie sie gut beantwortet werden können, bzw. zu zeigen, wie zukünftige Ingenieur:innen sie möglicherweise beantworten werden, ist mein Weg, mich für Eure Ideen und Anregungen zu bedanken.

Lukas Fischer hat für dieses Buch die meisten Problemlösungen akribisch nachgerechnet. Dafür danke ich ihm sehr herzlich.

Ohne die Unterstützung und das Interesse meiner Familie wäre ein Projekt wie dieses nicht möglich. Ihr ertragt all die Rahmenbedingungen, die solch ein Projekt mit sich bringt: Interesse für seltsame Themen, abseitige Diskussionen beim Abendessen, Stapel von Büchern und Papier. Ich danke Euch für Eure Unterstützung sowie für den Raum und die Zeit, die ich in dieses Projekt stecken konnte.

Und Ihnen, liebe Nutzer:innen dieses Büchleins, danke ich für das Vertrauen. Ich wünsche Ihnen ganz viel Erfolg bei der Prüfung und viel Spaß mit der Thermodynamik!

Darmstadt im Juli 2023

*Sven Linow*



# **TEIL I**

## **Aufgaben**

Teil I dieses Arbeitsbuches enthält Aufgaben zu allen wesentlichen Inhalten, die üblicherweise in Thermodynamik-Kursen gelehrt werden. Der Aufbau folgt meinem Lehrbuch *Angewandte technische Thermodynamik* (ISBN 978-3-446-47034-7), auf das im Laufe dieses Buches mit dem Kürzel „Lehrbuch“ verwiesen wird. Die Übungen sind in folgende thematische Blöcke gegliedert:

- Kapitel 2 Das Lernmaterial in Kapitel 2 soll Sie in die Lage versetzen, die essenziellen Grundlagen der technischen Thermodynamik zu verstehen und zu nutzen. Dies ist die Grundlage für alle weiteren Kapitel.
- Kapitel 3 In Kapitel 3 erfahren Sie, wie Sie Stoffe im Allgemeinen und Fluide im Speziellen beschreiben können. Hierbei geht es insbesondere um den Umgang mit realen Fluiden und den dafür verwendeten Diagrammen sowie insbesondere um den Spezialfall des idealen Gases.
- Kapitel 4 In Kapitel 4 eignen Sie sich an, wie sie Gemische charakterisieren.
- Kapitel 5 In Kapitel 5 lernen Sie, feuchte Luft zu beschreiben und technische Probleme zu lösen, bei denen Eigenschaften feuchter Luft angewendet werden.
- Kapitel 6 In Kapitel 6 erfahren Sie, wie Sie Kreis- und Vergleichsprozesse für Motoren, Dampfturbinen und Kältemaschinen nutzen können.
- Kapitel 7 In Kapitel 7 lernen Sie, chemische Reaktionen und im Speziellen die Verbrennung zu beschreiben.
- Kapitel 8 In Kapitel 8 lernen Sie, die stationäre Wärmeübertragung zu beschreiben und die speziellen Werkzeuge auf technische Probleme anzuwenden.

Sehr viele Lehrbücher und Kurse unterteilen die Inhalte der Thermodynamik auf diese Weise, sodass die Struktur des Buches allgemein verwendbar ist und Ihnen sofort Orientierung verschafft.

Innerhalb der Kapitel sind die Aufgaben nach Lernstufen (Level) sortiert. In Abschnitt 1.1 und Abschnitt 1.2 wird erläutert, was unter Lernstufen (Level) zu verstehen ist. Folgende Level kommen pro Kapitel zum Einsatz:

- Level 1 Auf Level 1 geht es darum, die wichtigen Konzepte der Thermodynamik sicher zu verstehen. Deshalb enthalten diese Abschnitte Fragen zu genau diesen Konzepten.
- Level 2 Auf Level 2 werden Aufgaben gelöst, bei denen der benötigte Lösungsweg eindeutig ist.
- Level 3 Auf Level 3 werden komplexere Probleme bearbeitet, bei denen oft mehrere Wege zu einer Lösung führen.

Wenn Sie die Fragen auf Level 1 sicher beantworten können und die Rechenaufgaben auf Level 2 gelöst haben, dann bietet Ihnen die Bearbeitung der Probleme auf Level 3 die Möglichkeit, mehrere Themen und Ebenen miteinander zu verknüpfen. Gehen Sie also geordnet vor und arbeiten die jeweiligen Abschnitte chronologisch durch.

# 2

## Thermodynamische Grundlagen

An den Grundlagen führt kein Weg vorbei. Energie und Entropie, Arbeit verrichten und Wärme übertragen, ein System und sein Zustand sowie Zustandsänderungen sind Kernbegriffe, die wir benötigen, um zu verstehen, was die Thermodynamik ausmacht oder wofür wir ihre Methoden nutzen können. In diesem Kapitel trainieren Sie die Fähigkeit, thermodynamische Grundlagen zu erläutern, und üben das Rechnen mit zentralen Gleichungen. Die Aufgaben, die benötigten Gleichungen und die verwendeten Symbole beziehen sich auf Teil I, „Grundlagen“, des Lehrbuches. Die hier vermittelten Inhalte ziehen sich durch alle anderen Themen und Aspekte der Thermodynamik und werden dort immer wieder benötigt.

### ■ 2.1 Konzepte und Definitionen



Typischerweise scheitern Student:innen in Prüfungen daran, dass sie die grundlegenden Konzepte nicht verstanden haben. Dadurch fällt es ihnen schwer, das Ziel der Aufgaben zu verstehen oder sicher die passenden Methoden zu finden, um die Aufgabe zu lösen.

Bevor Sie sich in den folgenden Abschnitten den Rechenaufgaben (Level 2) und dem Lösen komplexer Probleme (Level 3) widmen, geht es in diesem Abschnitt zunächst einmal darum, anhand von Fragen (Level 1) zu überprüfen, ob Sie die zentralen Konzepte und Begriffe schon sicher verstehen. Am besten ist es, wenn Sie ohne Zuhilfenahme des Lehrbuches, aber mit der Unterstützung Ihrer Lerngruppe loslegen und erst nach Beantwortung der

Fragen kritisch prüfen, ob Ihre Ideen richtig sind. Schreiben Sie Ihre Antworten und Definitionen auf, denn erst, wenn Sie diese formulieren, werden die Ideen für Sie wirklich greifbar und zudem überprüfbar.

### **Frage 2.1: Zustand oder Zustandsänderung?**

Zustand und Zustandsänderung sind **die** Kernkonzepte der Thermodynamik und es sind **zwei**. Beschreiben Sie, was der Unterschied ist.

### **Frage 2.2: Prozessgröße oder Zustandsgröße?**

Jede Größe in der Thermodynamik ist entweder eine Zustandsgröße oder eine Prozessgröße. Sie ist niemals beides. Eine Größe wechselt niemals einfach so diese Kategorien. Beschreiben Sie, was ist was? Finden Sie möglichst viele Beispiele.

### **Frage 2.3: Extensiv, intensiv, molar, spezifisch oder volumetrisch?**

Jede thermodynamische Größe können wir den Kategorien extensiv, intensiv, spezifisch, molar oder volumetrisch zuordnen. Viele können wir einfach umrechnen (also z.B. von spezifisch nach volumetrisch) und einige können wir nicht umrechnen (Temperatur). Erklären Sie, wozu wir diese Konzepte benötigen und wann wir die unterschiedlichen Kategorien jeweils verwenden.

### **Frage 2.4: Druck**

Wie ist der Druck definiert und was ist seine Verbindung in die Mechanik?

### **Frage 2.5: Ideales Gas**

Was ist die Definition eines idealen Gases?

### **Frage 2.6: Arbeit, Wärme und Energie**

Arbeit, Wärme und Energie sind drei unterschiedliche Konzepte, obwohl wir sie alle drei in Joule angeben. Was sind die Unterschiede?

### **Frage 2.7: Heizwert und Brennwert**

Was sind die Definitionen der beiden Zustandsgrößen Heizwert und Brennwert? Sind sie extensive, intensive, spezifische, volumetrische oder molare Größen?

### **Frage 2.8: Leistung oder Arbeit?**

Die beiden Begriffe Leistung und Arbeit meinen nicht dasselbe. Was ist der Unterschied?

### **Frage 2.9: Enthalpie und innere Energie**

Was beschreibt die innere Energie und was die Enthalpie? Wie können Sie die beiden ineinander umrechnen?

**Frage 2.10: Energie, Entropie und Dissipation**

Die drei Konzepte Energie, Entropie und Dissipation gehören zusammen. Doch was genau beschreiben sie jeweils? Was sind die relevanten Unterschiede zwischen ihnen? Und wie genau gehören sie zusammen, d. h., was verbindet sie?

**Frage 2.11: Temperatur oder Wärme?**

Versuchen Sie, die Temperatur zu definieren, und grenzen Sie diese von Wärme ab.

**Frage 2.12: Wärmekapazität**

Was ist die Definition der Wärmekapazität? Was ist die spezifische Wärmekapazität?

**Frage 2.13: Die Hauptsätze der Thermodynamik**

Welche Hauptsätze der Thermodynamik gibt es? Wie lauten sie? Was beschreiben sie jeweils genau?

**Frage 2.14: Zustandsänderungen**

Definieren Sie die relevanten Zustandsänderungen Isobar, Isochor, Isotherm, Isentrop und Isenthalp. Finden Sie jeweils zumindest ein Beispiel aus Ihrem täglichen Leben.



Überprüfen Sie, was Sie gut hinbekommen haben und was nicht. Seien Sie kritisch und hinterfragen Sie sich genau. Klären Sie die Fragen, die Sie sich dabei gestellt haben.

## ■ 2.2 Rechenaufgaben



Die in diesem Abschnitt enthaltenen Aufgaben (Level 2) sind auf eine Gleichung oder wenige miteinander verbundene Methoden fokussiert. Ausführliche Musterlösungen zu den Aufgaben finden Sie unter [plus.hanser-fachbuch.de](http://plus.hanser-fachbuch.de). Bitte sehen Sie sich diese nur dann an, wenn Sie wirklich nicht weiterkommen. Diskutieren Sie stattdessen mit Ihren Kommiliton:innen oder tauschen Sie sich idealerweise in Ihrer Lerngruppe aus.

**Aufgabe 2.1: Dusche**

Durch Linows Dusche fließen in 30 s 3,8 l Wasser. Das Wasser strömt mit 10 °C aus der städtischen Leitung in einen Durchlauferhitzer und hat 35 °C am Duschkopf. Der Durchlauferhitzer hat einen Wirkungsgrad von 98 %.

- Berechnen Sie den benötigten Wärmestrom an das Wasser.
- Berechnen Sie die benötigte Wärme für eine 10-minütige Dusche.
- Wie viel Elektrizität benötigt eine 10-minütige Dusche?
- Was ist die Fließgeschwindigkeit des Wassers in einem gängigen Kupferrohr mit einem Innendurchmesser von etwa 13 mm beim Duschen?

**Aufgabe 2.2: Wasserstoff-Speicher**

Wasserstoff-Speicher für das Eigenheim bestehen aus Flaschenbündeln. So ein Bündel setzt sich aus zwölf miteinander verbundenen Flaschen zusammen. Jede Flasche hat ein Volumen von 50 l und einen Nenndruck von 300 bar bei 25 °C. Es können bis zu drei Bündel als ein Speicher aufgestellt werden.

Berechnen Sie unter der Annahme des idealen Gases

- das gesamte Volumen der drei Bündel,
- die darin maximal speicherbare Masse an Wasserstoff,
- die maximal gespeicherte Stoffmenge und
- die im Wasserstoff als Heizwert gespeicherte Energie.

**Aufgabe 2.3: Pkw**

Mein erster Pkw war ein VW Passat erster Baureihe mit einem Leergewicht von 680 kg und einer Tankfüllung von 50 l Benzin. Ich wog damals 70 kg. Der Wirkungsgrad des Motors lag bei 25 % (Tank to Wheel).

Berechnen Sie

- welche chemische Energie (Heizwert) in einem vollen Tank enthalten ist,
- welche maximale Höhe bei absolut reibungsfreier Fahrt erreicht werden könnte und
- welche maximale Geschwindigkeit bei reibungsfreier Fahrt möglich wäre.
- Reflektieren Sie, warum Sie welche Masse für das Benzin angesetzt haben.

**Aufgabe 2.4: Argon-Tank**

Auf dem Gelände der Darmstädter Glühlampenfabrik befindet sich ein Tank für Argon. Der Tank hat ein Volumen von 12,50 m<sup>3</sup>. An einem Sommerabend nach Schichtende beträgt die Temperatur des Gases 43 °C und der Druck 49,6 bar. Bis in den frühen Morgen kühlt das Gas auf 14,5 °C ab.

Berechnen Sie für das Argon

- die Masse und das Volumen bei Normbedingung,
- die übertragene Wärme beim Abkühlen und
- die damit verbundene Entropieänderung.
- Wessen Entropie ändert sich dabei?

### Aufgabe 2.5: Nudeln kochen

Während Sie daheim Nudeln kochen, stellen sich Ihnen viele thermodynamische Fragen. In Ihrer Küche beträgt die Temperatur  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Sie bereiten  $1,0\text{ kg}$  Pasta zu. Dazu verwenden Sie  $3,0\text{ l}$  Wasser, und der Topf wiegt  $2,1\text{ kg}$ . Ihre Internetrecherche ergibt als spezifische Wärmekapazität für Nudeln  $1,8\text{ kJ kg}^{-1}\text{ K}^{-1}$  und für den Stahl  $1.4301$  etwa  $0,51\text{ kJ kg}^{-1}\text{ K}^{-1}$ .

Beantworten Sie folgende Fragen:

- Welche Wärme führen Sie zu?
- Welche Entropie erzeugen Sie?
- Welche Temperatur stellt sich ein, wenn Sie die Nudeln in das siedende Wasser geben und den Topf hierbei vernachlässigen?
- Warum dürfen Sie den Topf vernachlässigen?

### Aufgabe 2.6: Bewässerungslandbau

Bauer Linow benötigt zukünftig eine Bewässerung. Aktuell fehlen ihm in Südhessen etwa  $250\text{ mm}$  Niederschlag im Sommer (Mai bis September), die er auf seinen  $25\text{ ha}$  Sonderlandbau ausgleichen muss. Dazu kann er das Wasser in  $75\text{ m}$  Tiefe sicher aus einem Grundwasserleiter entnehmen. Die schicke neue Bewässerungsmaschine spritzt das Wasser  $10\text{ m}$  hoch,  $50\text{ m}$  weit und dabei gleichmäßig über das Land. Die Pumpe hat einen Wirkungsgrad von  $80\%$ . Der Druckverlust in den Leitungen beträgt  $1,2\text{ bar}$ .

Berechnen Sie folgende Aufgaben:

- Welches Volumen an Wasser wird benötigt?
- Wie hoch muss das Wasser gefördert werden, um den Druckverlust mit auszugleichen?
- Welche Arbeit muss die Pumpe verrichten?
- Welche Leistung muss die Pumpe mindestens haben?
- Welche Menge an Elektrizität benötigt Bauer Linow dafür im Jahr?

### Aufgabe 2.7: PSK Geesthacht

Über das Pumpspeicherkraftwerk in Geesthacht lesen wir bei Wikipedia:

*„Über drei Rohrleitungen sind drei Sätze aus je einer Pumpe und einer Turbine mit dem etwa  $80\text{ m}$  höher gelegenen Speichersee verbunden. Die Turbinen haben eine Leistung von je  $40\text{ MW}$ , insgesamt also  $120\text{ MW}$ , die Pumpen von je  $32\text{ MW}$ . Insgesamt hat der Speichersee ein Volumen von  $3\,800\,000\text{ m}^3$ , davon sind  $3\,300\,000\text{ m}^3$  nutzbar. Der bei Geesthacht direkt an der Bundesstraße 5 gelegene Speichersee wird direkt aus der Elbe gespeist. Seine Wasseroberfläche liegt bei vollem Becken auf  $90,6\text{ m}$  über NN, das Absenksziel auf  $76,6\text{ m}$  über NN. Die von der Staustufe Geesthacht aufgestaute Elbe dient als Unterbecken. Dieses hat einen Speicherraum von  $8\,210\,000\text{ m}^3$ . Die mittlere Fallhöhe beträgt  $83\text{ m}$ .“<sup>1)</sup>*

- Bestimmen Sie damit den Volumenstrom bei Nennleistung einer Pumpe und einer Turbine. Beide haben einen Wirkungsgrad von  $90\%$ .
- Wie lange kann das Kraftwerk bei Nennleistung Elektrizität produzieren?

<sup>1)</sup> [https://de.wikipedia.org/wiki/Pumpspeicherkraftwerk\\_Geesthacht](https://de.wikipedia.org/wiki/Pumpspeicherkraftwerk_Geesthacht)