

# HANSER



## Leseprobe

zu

## Wasserstofftechnik

von Thomas Schmidt

Print-ISBN: 978-3-446-47227-3

E-Book-ISBN: 978-3-446-47354-6

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446472273>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

# Inhalt

<b>Vorwort</b> .....	<b>IX</b>
<b>1 Einführung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Das Konzept des Buches .....	3
1.2 Die Form des Buches .....	4
<b>2 Eigenschaften des Wasserstoffs</b> .....	<b>6</b>
2.1 Thermodynamische Zustandsberechnung .....	7
2.1.1 Wasserstoff als ideales Gas .....	8
2.1.2 Wasserstoff als reales Gas .....	10
2.1.3 Wasserstoff und die Wärmekapazität .....	12
2.1.4 Dissipation und Effizienz .....	14
2.1.5 Viskosität und Wärmeleitfähigkeit .....	17
2.1.6 Anteile und Konzentrationen in Mischungen .....	19
2.1.7 Anwendung von Mischungsregeln .....	23
2.2 Permeationsverhalten von Wasserstoff .....	26
2.2.1 Permeation durch Metalle .....	27
2.2.2 Permeation durch Kunststoffe .....	29
2.3 Metallversprödung unter Wasserstoffeinfluss .....	30
2.3.1 Versprödung bei quasistationärem Betriebszustand ....	31
2.3.1.1 Spannungsberechnung an einer Rissspitze ...	31
2.3.1.2 Anwendung des Leck-vor-Bruch-Kriteriums ...	32
2.3.2 Risswachstum unter zyklischer Beanspruchung .....	37
2.4 Sicherheit von Gemischen mit Wasserstoff .....	41
2.5 Thermodynamik der Wasserelektrolyse .....	44
2.6 Verbrennung mit Wasserstoff .....	47

<b>3</b>	<b>Wirtschaftlichkeit von Wasserstoffprojekten</b> .....	<b>50</b>
<b>4</b>	<b>Aufgaben und Potenziale des Wasserstoffs</b> .....	<b>53</b>
4.1	Wasserstoff in der Sektorenkopplung .....	53
4.2	Wasserstoff als Zusatz in Gasnetzen .....	56
<b>5</b>	<b>Wasserstofferzeugung</b> .....	<b>57</b>
5.1	Wasserstoff aus fossilen Quellen .....	58
5.1.1	Dampfreformierung .....	58
5.1.2	Thermische Pyrolyse .....	62
5.2	Wasserstoff aus regenerativen Quellen .....	63
5.2.1	Elektrolytische Wasserstoffproduktion .....	63
5.2.2	Biologische Wasserstoffproduktion .....	69
<b>6</b>	<b>Wasserstofftransport durch Leitungen</b> .....	<b>72</b>
6.1	Druckverlust in Rohrleitungen .....	73
6.2	Einspeisung in nachgeschaltete Systeme .....	76
<b>7</b>	<b>Fluidenergiemaschinen für Wasserstoff</b> .....	<b>79</b>
7.1	Kolbenverdichter .....	79
7.2	Gasturbine .....	80
7.3	Expansionsanlage .....	82
<b>8</b>	<b>Verflüssigter Wasserstoff</b> .....	<b>85</b>
<b>9</b>	<b>Wasserstoffspeicher</b> .....	<b>87</b>
9.1	Wasserstoff in Fahrzeug-Tankbehältern .....	87
9.2	Wasserstoff in Salzkavernen .....	89
9.3	Wasserstoff in Metallhydriden .....	94
<b>10</b>	<b>Wasserstoffanwendungen</b> .....	<b>95</b>
10.1	Wasserstoff und die Ammoniaksynthese .....	95
10.2	Wasserstoff und synthetisches Methan .....	96
10.3	Wasserstoff in lokalen Verteilnetzen .....	101

<b>11</b>	<b>Lösungen zu allen Aufgabenstellungen</b>	<b>105</b>
11.1	Die Eigenschaften des Wasserstoffs	105
11.2	Wirtschaftlichkeit von Wasserstoffprojekten	143
11.3	Aufgaben und Potenziale des Wasserstoffs	147
11.4	Wasserstofferzeugung	149
11.5	Wasserstofftransport durch Leitungen	161
11.6	Fluidenergiemaschinen für Wasserstoff	165
11.7	Verflüssigter Wasserstoff	168
11.8	Wasserstoffspeicher	169
11.9	Wasserstoffanwendungen	175
	<b>Anhang A: Einheiten und deren Umrechnungen</b>	<b>189</b>
	<b>Anhang B: Formelzeichen und Einheiten</b>	<b>191</b>
	<b>Anhang C: Abkürzungen und Eigennamen</b>	<b>198</b>
	<b>Anhang D: Verwendete Naturkonstanten und Bezugsgrößen</b>	<b>200</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>201</b>
	<b>Index</b>	<b>203</b>



# Vorwort

Die Idee zu einem Aufgabenbuch ist mir bei der Überarbeitung der Erstausgabe meines Buches *Wasserstofftechnik* (ebenfalls erschienen im Carl Hanser Verlag, München) gekommen. Ursprünglich waren im Anhang dieses Fachbuches Übungsaufgaben mit der Angabe der numerischen Lösungen zu finden. Doch um den Leserinnen und Lesern einen vollständigen Blick in die weite Welt der Wasserstofftechnik zu gewährleisten, sollte der Lösungsweg dazukommen. Dies hätte ab der Zweitausgabe den Umfang des Fachbuches gesprengt. Und so lag es nahe, einen ergänzenden Buchteil mit Aufgabenstellungen und ausgearbeiteten Lösungen herauszugeben. Ich bin Herrn Volker Herzberg und Frau Rebecca Wehrmann vom Carl Hanser Fachbuchverlag, München, sehr dankbar für ihre Hilfe und Unterstützung.

Die Entwicklung einer Wasserstoffwirtschaft vollzieht sich heute einerseits auf der Ebene der Verbesserung bestehender und der Erforschung neuer Technologien, wie beispielsweise der Wasserstoffverwendung in der Stahlerzeugung. Andererseits liegt der Fokus auf der Entwicklung einer dem Charakter des Wasserstoffs angemessenen Infrastruktur aus Erzeugung, Transport und Speicherung oder der Einbindung des Wasserstoffs in einem Mehrklang verschiedener regenerativer Technologien, beispielsweise zur Wärmeerzeugung. Aus meiner persönlichen Überzeugung sollte ein Credo sein, so weit wie möglich, bestehende Energiesysteme für Wasserstoff zu ertüchtigen und weiter zu nutzen.

Um die große Aufgabe der Umgestaltung unserer Energie- und Industrielwelt auf regenerative Energieformen und nicht fossile Grundstoffe zu schaffen, müssen neue Fachkräfte ausgebildet, aber auch Menschen umgeschult werden, die zuvor in der fossilen Energie- und Industrielwelt gearbeitet haben. Das bedarf einer umfangreichen Ausbildung und Weiterbildung. Und hier biete ich der Leserin und dem Leser an, für die gestellten Aufgaben einen eigenen Lösungsweg zu suchen und ihn mit der Lösung des Autors zu vergleichen. Dieses Konzept führt konsequent umgesetzt aus meiner Perspektive eines Ingenieurs, der zuvor über 20 Jahre im Gastransport und der Gasspeicherung tätig war, und aus der Erfahrung eines Hochschullehrers, der seit nahezu 20 Jahren Erwachsene ausbildet, zu fruchtbaren

Erkenntnissen. Selbst rechnen fördert die fachlichen Erkenntniszuwächse. Mit Zahlen und Formeln umgehen, hilft bei der Plausibilitätskontrolle von digitalen Instrumenten und den damit produzierten Lösungen. Selbst zu den richtigen Lösungen zu kommen, ist eine besondere Art der Befriedigung. Man hat es geschafft. In diesem Sinn wünsche ich allen Leserinnen und Lesern viel Erfolg mit diesem Buch und erlaube mir noch den Hinweis auf die zweite Ausgabe des Buches *Wasserstofftechnik*, welche den fachlichen Hintergrund für dieses Aufgabenbuch bildet.

Steinfurt, März 2022

*Thomas Schmidt*

# 1

## Einführung

Wir beobachten auch in unserer unmittelbaren Umgebung die rasante Veränderung unserer Umwelt. Untrügliche Zeichen sind einerseits die Zunahme von Dürreperioden und andererseits Starkregen mit teilweise verheerenden Folgen sowie ein Rückgang der Artenvielfalt. In den vor uns liegenden Jahrzehnten kommen aufgrund des dramatischen Klimawandels und der angespannten ökologischen Situation auf die Menschen gewaltige Veränderungen zu.

Weltweit müssen die menschlichen Gesellschaften sich, so schnell es geht, von den fossilen Energieträgern verabschieden, um das im Pariser Klimaabkommen 2015 vereinbarte Ziel, die globale Temperaturerhöhung auf deutlich unter 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen, zu erreichen. Deutschland will zu diesem Zweck bis 2045 Treibhausgasneutralität erreichen. Dies bedeutet, dass dann ein Gleichgewicht zwischen den Emissionen von Treibhausgasen und deren Abbau in der Natur herrscht.

Zu den hierfür notwendigen Maßnahmen zählen die Erneuerung oder die Außerbetriebnahme vorhandener Infrastruktur im Industrie- und Energiebereich und der Bau neuer an die Klimavorgaben angepasste Anlagen- und Leitungssysteme.



**Bild 1.1**

Anlage der Ela Industriegas GmbH zur Erzeugung von synthetischem Methan aus Wasserstoff und Kohlendioxid im emsländischen Werlte © ela Industriegas GmbH und Timo Lutz Werbefotografie

Die nationale Wasserstoffstrategie der Bundesregierung, die im Herbst 2021 verstärkt wurde, gibt die Richtung vor. So gehen Kohlekraftwerke und Kernkraftwerke in Deutschland vom Netz und sollen für den Fall, dass die regenerativen Stromerzeugungsanlagen witterungsbedingt nicht für die erforderlichen Strommengen ausreichen, durch Gaskraftwerke ersetzt werden, die wasserstoffkompatibel sind. Inwieweit zukünftig der Einsatz und der Zubau von Gaskraftwerken im Lichte des laufenden Krieges in der Ukraine und der damit verbundenen Versorgungssituation auf dem europäischen Gasmarkt realistisch ist, kann bei Drucklegung dieses Buches noch nicht sicher prognostiziert werden. Leitungssysteme müssen einerseits für die Versorgung der Kunden mit Strom und Gas zukunftssicher gemacht werden und andererseits für Wasserstoff umgerüstet bzw. neu gebaut werden. Das Beispiel einer industriellen Anlage, mit deren Hilfe man anfallende Treibhausgase in synthetische Energieträger umwandeln kann, zeigt Bild 1.1. Es handelt sich um eine Anlage zur Erzeugung von synthetischem Methan aus Wasserstoff und Kohlendioxid aus der Biogasproduktion.

Für alle zuvor genannten Aufgaben benötigt die zivile Gesellschaft Menschen, die ein ausreichendes Fachwissen und technisch fundiertes Urteilsvermögen zu Wasserstofftechnologien besitzen. Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter im Bereich der Energie- und Grundstoffversorgung, in der Chemie, der Metallerzeugung und -verarbeitung und in anderen betroffenen Bereichen sowie Studentinnen und Studenten in den Ingenieurfächern sollen daher für Wasserstoff fit gemacht werden. Sie

sollten beispielsweise im Zusammenhang mit der Erzeugung von Wasserstoff die Frage nach dem Wasserverbrauch in einer Elektrolyseanlage, wie sie in Bild 1.2 abgebildet ist, beantworten können. Dieses Thema wird in diesem Aufgabenbuch in der Aufgabenstellung 30 im Abschnitt 5.2.1 behandelt.



**Bild 1.2** Alkalische Elektrolyseanlage (AEL) der ela Industriegas GmbH zur Erzeugung von Wasserstoff im emsländischen Werlitz  
© ela Industriegas GmbH

## ■ 1.1 Das Konzept des Buches

Das Buch wendet sich an alle, die bislang mit dem Element Wasserstoff und den begleitenden Verfahren der Erzeugung, des Transports, der maschinellen Behandlung, der Verflüssigung, der Speicherung und der Wasserstoffnutzung nicht ausreichend oder gar nicht vertraut sind. Das Buch ist ein Aufgabenbuch mit ausgearbeiteten Lösungen und verfolgt auch in der Verbindung mit dem in der zweiten Auflage erschienenen Fach- und Lehrbuch *Wasserstofftechnik* mehrere Ziele.

1. Dieses Aufgabenbuch mit Lösungen ermöglicht die Behandlung einer großen Bandbreite von praxisbezogenen Aufgabenstellungen. Damit soll das Verständnis für das stoffliche Verhalten des Wasserstoffs und für das Funktionieren der angewandten Techniken bei der Leserin und beim Leser geweckt werden.

2. Es ist eine Ergänzung des Fach- und Lehrbuches. Dort werden in praxisbezogenen Berechnungsbeispielen die zuvor gegebenen fachlichen Inhalte vertieft. Diese Beispiele sind Blaupausen für verschiedene Aufgabenstellungen und Lösungen in diesem Aufgabenbuch. So kann die Vorgehensweise in der Aufgabe 1 im Abschnitt 2.1.1 dieses Buches am Beispiel der Anwendung des realen Gasgesetzes im Abschnitt 2.2.1 des Fach- und Lehrbuches gespiegelt werden.
3. Lösungen zu Aufgabenstellungen in diesem Buch bilden die Grundlage verschiedener Aussagen im Fach- und Lehrbuch. Als Beispiel sei die Angabe der freigesetzten  $\text{CO}_2$ -Mengen der Dampfreformierung, einem der wesentlichen Verfahren der heutigen Wasserstoffproduktion, im Fach- und Lehrbuch im Abschnitt 5.1.1 genannt. Der dort aufgeführte Wert wird auf das Ergebnis der Aufgabe 26 in diesem Aufgabenbuch zurückgeführt.

## ■ 1.2 Die Form des Buches

Der strukturelle Aufbau dieses Aufgabenbuches spiegelt sich an den Inhalten des Fach- und Lehrbuches *Wasserstofftechnik*.

In den einzelnen Abschnitten werden in zusammengefasster Form die für die Bearbeitung der einzelnen Aufgaben relevanten Inhalte dargestellt und die zur Lösung erforderlichen Formeln und stoffspezifischen Werte angegeben.

### ■ Hinweise in jedem Abschnitt

In jedem Abschnitt wird an geeigneter Stelle auf die eingehende Darstellung des thematischen Zusammenhanges im Fach- und Lehrbuch hingewiesen. Hier kann der fachliche Hintergrund der Aufgabenstellung vertieft und Beispielrechnungen eingesehen werden. Darüber hinaus stehen in diesem Buch umfangreiche Tabellen, Diagramme, weiterführende Darstellungen, Fließschemas und Bilder zur zusätzlichen Information zur Verfügung.

### ■ Empfehlung zur Vorgehensweise bei der Aufgabenberechnung

Der Leserin und dem Leser wird empfohlen, die Aufgabenstellung selbstständig zu lösen. Dabei ist von Vorteil, die jeweils ausgearbeitete Lösung in Kapitel 11 zunächst nicht einzusehen.

### ■ Lösungen in Kapitel 11

Der systematische Lösungsweg und die numerische Lösung jeder Aufgabenstellung ist in Kapitel 11 gegeben, sodass möglichst im Anschluss an die eigenständig erarbeitete Lösung eine Kontrolle der eigenen Ergebnisse vorgenommen werden kann.

- **Der Umgang mit gerundeten Zwischenergebnissen in Kapitel 11**  
Um die Einheitlichkeit der Berechnungen zu wahren, werden auch Zwischenergebnisse gerundet. Der dann folgende Rechenschritt wird mit den zuvor gerundeten Zwischenergebnissen weitergeführt.
- **Schlussfolgerungen aus den Lösungen in Kapitel 11**  
Da, wo es angebracht ist, gibt der Autor eine Interpretationshilfe zu den Ergebnissen der vorangestellten Berechnung.
- **Informationen im Anhang**  
Die erforderlichen physikalischen Einheiten und deren Möglichkeit der Umrechnung, die eingesetzten Formelzeichen und Abkürzungen sowie eine Aufstellung der verwendeten Naturkonstanten und Bezugsgrößen sind in den Anhängen A bis D am Ende des Buches zu finden.

# 2

## Eigenschaften des Wasserstoffs

Im Rahmen der Ablösung von fossilen Energieträgern wird der zukünftige Einsatz von molekularem Wasserstoff geplant und bereits im begrenzten Umfang in sogenannten Microgrids praktiziert. Dabei stehen verschiedene Fragestellungen im Raum. Hierzu zählt beispielhaft das thermodynamische Verhalten des Gases Wasserstoff ( $H_2$ ) unter den herrschenden Druck- und Temperaturbedingungen.

In die Abschätzung erforderlicher Durchmesser von Pipelines und des Druckverlustes beim rohrleitungsgebundenen Transport gehen die Dichte und die Viskosität des Wasserstoffs ein. Die unangenehme Eigenschaft des Wasserstoffs, durch Behälterwände in die Atmosphäre zu gelangen und bei metallischen Werkstoffen Schäden zu hinterlassen, die im Extremfall zu einem Werkstoffversagen führen, machen es erforderlich, die dafür verantwortlichen Mechanismen zu kennen und die projektbezogenen Werte zu bestimmen.

Wenn Wasserstoff elektrolytisch gewonnen wird, fällt gleichzeitig Sauerstoff an. Beide Elemente müssen anlagentechnisch voneinander getrennt ihrer weiteren Nutzung zugeführt werden. Der erzeugte Sauerstoff wird meist an die Umgebung abgegeben. Ein Teil gelangt indessen bereits bei seiner Entstehung in der elektrolytischen Zelle in den Wasserstoffstrom. Dieser darf nur einen begrenzten Grad an Verunreinigung aufweisen, um in Brennstoffzellen möglichst verlustarm in Wasser, Strom und Wärme umgewandelt zu werden. Die Bestimmung der Parameter von Mischungen aus unterschiedlichen Komponenten ist daher für die Wasserstofftechnik bedeutsam.

Wasserstoff ist ein explosionsfähiger und energiereicher Stoff. Es ist daher von großem Interesse, sein Reaktionsverhalten unter Einwirkung von Luft zu kennen. Hierzu zählt der Umgang mit den Explosionsgrenzen und verschiedenen Fundamentalgrößen wie der Enthalpie und der Entropie.

Mit den vorgenannten Themen beschäftigen sich die in den nächsten Teilabschnitten vorgestellten Aufgaben.

## ■ 2.1 Thermodynamische Zustandsberechnung

Die Umrechnung von gemessenen Größen wie Druck und Temperatur oder Dichte in eine andere Zustandsgröße ist in der betrieblichen Praxis ein alltäglicher Vorgang. Dies geschieht beispielsweise im Rahmen einer Abrechnungsmessung. Hier wird vom gemessenen Betriebszustand in den Normzustand umgerechnet. Stehen betriebliche Anlagen im Freien, wie beispielsweise ein Druckbehälter unter dem Einfluss der Witterung wie in Bild 2.1, so werden sich in einem geschlossenen System Druck und Temperatur ändern. In diesem Fall kann es zweckmäßig sein, mithilfe von berechneten Werten fehlende Messdaten zu ergänzen.



**Bild 2.1** Speicherbehälter für Wasserstoff in einer chemischen Anlage  
© H&R ChemPharm GmbH

Grundlage der weiteren Berechnung sind neben den thermodynamischen Formeln die stoffspezifischen Werte des Wasserstoffs und weiterer Stoffe. Sie können beispielsweise mit der Software REFPROP nach Lemmon et al. (2018) berechnet werden und sind auszugsweise in Tabelle 2.1 aufgeführt.

**Tabelle 2.1** Physikalische Eigenschaften des n-H<sub>2</sub> und anderer Fluide im Vergleich 1)

Stoff	$M$	$R$	$\varrho_n$	$z_n$	$c_{p,n}$	$10^6 \eta_n$	$\lambda_n$	$\kappa$	$P_c$	$T_c$
	$\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$	$\frac{\text{J}}{\text{kg K}}$	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	-	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$	$\frac{\text{kg}}{\text{m s}}$	$\frac{\text{W}}{\text{m K}}$	-	bar	K
n-H <sub>2</sub>	2,0158	4124,5	0,08989	1,0006	14,198	8,377	0,173	1,41	13,150	33,19
CH <sub>4</sub>	16,043	518,26	0,7175	0,997	2,181	10,255	0,031	1,32	45,980	190,56
Erdgas	18,258	455,39	0,7800	0,997	2,0803	10,136	0,029	1,30	59,681	207,64
CO	28,010	296,84	1,2505	0,999	1,0420	16,596	0,023	1,40	34,935	132,85
CO <sub>2</sub>	44,010	188,92	1,9768	0,993	0,8268	13,709	0,015	1,31	73,770	304,13
O <sub>2</sub>	31,999	259,84	1,4290	0,999	0,9167	19,143	0,024	1,40	50,430	154,58
N <sub>2</sub>	28,013	296,81	1,2504	0,999	1,0414	16,629	0,024	1,40	33,991	126,26
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30,069	276,50	1,355	0,990	1,6635	8,4903	0,0177	1,21	48,714	305,33
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44,096	188,55	2,0105	0,9785	1,5841	7,4445	0,016	1,15	42,477	369,85
Luft	28,958	287,11	1,2927	0,999	1,0059	17,258	0,024	1,40	38,520	132,83
Anm.		2)			3)	3)	3)	3)		

Anmerkungen: 1) siehe auch Tabelle 2.1 und 2.2 im Buch *Wasserstofftechnik*; 2) abgeleitet aus Formel  $R = R_m / M$  mit der universellen oder molaren Gaskonstante  $R_m$  nach Anlage D; Werte sind gerundet

### 2.1.1 Wasserstoff als ideales Gas

Nach H. Sicius (2016) hat Wasserstoff zusammengefasst Eigenschaften, die im weitesten Sinne an ein Modellgas erinnern. Es hat die kleinste Größe und die geringste Dichte aller im Periodensystem versammelten Elemente. Sein Siedepunkt und sein Erstarrungspunkt liegen sehr nahe am absoluten Nullpunkt. Das Wasserstoffatom und das zweiatomige Wasserstoffmolekül ist aufgrund seines Diffusionsvermögens in der Lage, durch alle technischen Werkstoffe zu permeieren. Nach H. Herwig und Ch. H. Kautz (2007) ist ein ideales Gas ein Modellgas aus Molekülen ohne Eigenvolumen, die untereinander keine Wechselwirkung ausüben.

Die allgemeine Zustandsgleichung für Gase, die dieser Beschreibung Rechnung trägt, lautet:

$$pV = mRT \quad \text{Formel 2.1}$$

In der Formel 2.1 ist  $p$  der Absolutdruck in bar<sub>a</sub> und setzt sich aus dem Betriebsdruck  $p_{\text{ü}}$  in bar<sub>ü</sub> und dem Umgebungsdruck  $p_0$  in bar zusammen.

$$\frac{p}{\text{bar}_a} = \frac{p_{\text{ü}}}{\text{bar}_{\text{ü}}} + \frac{p_0}{\text{bar}} \quad \text{Formel 2.2}$$

**Hinweis**

Die Bezeichnung Betriebsdruck beispielsweise in den Aufgaben kennzeichnet in jedem Fall den Überdruck oberhalb des Umgebungsdruckes  $p_0$ .

Die Temperatur  $T$  ist die thermodynamische Temperatur in der Einheit Kelvin. Der Zusammenhang mit der Temperatur  $\vartheta$  in der Einheit Celsius ist:

$$\frac{T}{\text{K}} = \frac{\vartheta}{^{\circ}\text{C}} + \frac{273,15}{\text{K}} \quad \text{Formel 2.3}$$

Mit der Gasdichte  $\rho$  und der Verknüpfung von Masse  $m$  und Volumen  $V$  über

$$m = \rho V \quad \text{Formel 2.4}$$

kann die Formel 2.1 verändert werden:

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad \text{Formel 2.5}$$

In der Thermodynamik ist die Stoffmenge  $n$  in Verbindung mit der molaren Masse  $M$  (Tabelle 2.1) eine elementare Größe zur Bestimmung der Masse  $m$

$$m = nM \quad \text{Formel 2.6}$$

Referenzzustände können der Normzustand

$$p_n = 1,01325 \text{ bar}, T_n = 273,15 \text{ K} \quad \text{Formel 2.7}$$

und der Standardzustand

$$p^\theta = 1 \text{ bar}, T^\theta = 298,15 \text{ K} \quad \text{Formel 2.8}$$

sein.

**Hinweis**

Weitere Auskünfte über den thematischen Zusammenhang finden Sie im Buch *Wasserstofftechnik* im Abschnitt 2.2.1 (Zustandsgrößen und 1. Hauptsatz der Thermodynamik).

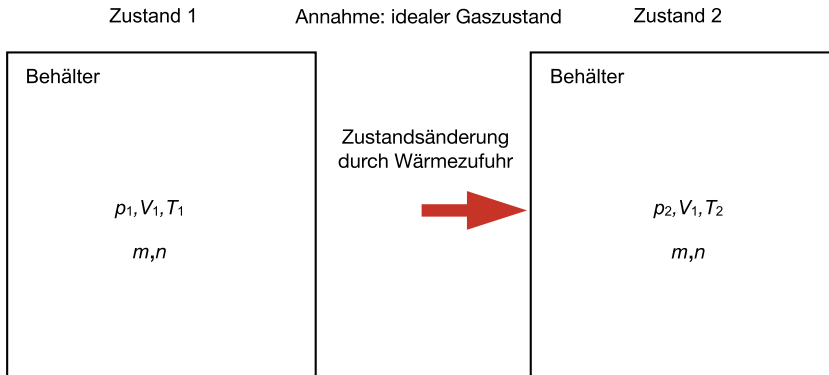
**Aufgabe 1**

Wasserstoff wird in einem geschlossenen Behälter mit einem Rauminhalt  $V_1 = 25 \text{ m}^3$  zwei unterschiedlichen thermodynamischen Zuständen ausgesetzt. Es wird ein idealer Gaszustand angenommen. Der Umgebungsdruck ist  $p_0 = 1 \text{ bar}$ .

Der Behälterdruck  $p_1$  beträgt nach Manometer-Anzeige an der Behälterwand  $p_1 = 4 \text{ bar}_i$ , die Temperatur im Behälter ist  $\vartheta_1 = 45^{\circ}\text{C}$ .



Dann steigt die Temperatur im Behälter durch Wärmezufuhr auf  $\vartheta_2 = 65^\circ\text{C}$ .



**Bild 2.2** Ideales Gasverhalten von Wasserstoff in einem geschlossenen Behälter

Es werden

1. die Masse  $m$ ,
2. die Stoffmenge  $n$  und
3. der Betriebsdruck  $p_2$  im Zustand 2

gesucht.

Die Ergebnisse sind jeweils auf zwei Dezimalstellen zu runden.

Die Lösungen sind im Abschnitt 11.1 zu finden.

### 2.1.2 Wasserstoff als reales Gas

In der Praxis wird insbesondere bei einem hohen Betriebsdruck das Wasserstoffgas als reales Gas behandelt und dies über die Einführung einer Realgaszahl  $z$  in der Formel 2.1 berücksichtigt.

$$pV = z m R T \quad \text{Formel 2.9}$$

Die Bestimmung von  $z$  kann nach A. Pfennig (2004) nach der von Peng und Robinson vorgeschlagenen Gleichung (PR-Gleichung) erfolgen.

$$z = \frac{v}{v-b} - \frac{a(T)}{(v+2b-b^2/v)RT} \quad \text{Formel 2.10}$$

Für die Parameter  $a(T)$  und  $b$  gelten folgende Beziehungen:

$$\frac{a(T)}{\text{m}^5 / (\text{s}^2 \text{kg})} = a_c \alpha(T) \quad \text{Formel 2.11}$$

mit

$$\alpha(T) = \left[ 1 + m \left( 1 - \sqrt{T_r} \right) \right]^2 \quad \text{Formel 2.12}$$

und mit der reduzierten Temperatur

$$T_r = \frac{T}{T_c} \quad \text{Formel 2.13}$$

und mit dem spezifischen Volumen

$$v = \frac{1}{\rho} \quad \text{Formel 2.14}$$

In Formel 2.10, Formel 2.11 und Formel 2.12 sind  $m$ ,  $a_c$  und  $b$  stoffspezifische Parameter und können hier für n-Wasserstoff und Methan Tabelle 2.2 entnommen werden.

**Tabelle 2.2** Spezifische Stoffdaten der PR-Gleichung des n-Wasserstoffs und des Methans

Stoff	$m$	$a_c$	$b$
	-	$\text{m}^5/(\text{s}^2 \text{ kg})$	$\text{m}^3/\text{kg}$
n-H <sub>2</sub>	0,0289	6515,92	0,00810
CH <sub>4</sub>	0,3931	969,87	0,00167



#### Hinweis

Weitere Auskünfte über den thematischen Zusammenhang finden Sie im Buch *Wasserstofftechnik* im Abschnitt 2.2.1 (Zustandsgrößen und 1. Hauptsatz der Thermodynamik).

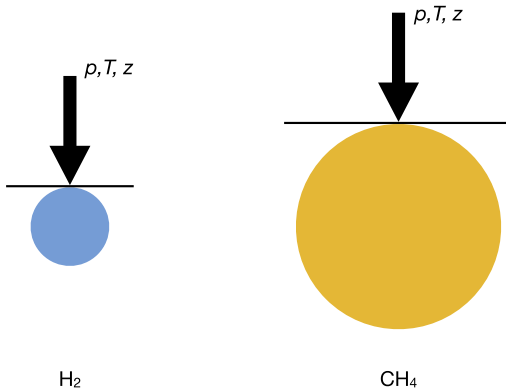
Im Mittelpunkt der folgenden Aufgabe steht die Frage, wie sich der Wasserstoff im Vergleich zu einem Kohlenwasserstoff wie Methan unter der Einwirkung von Druck und Temperatur verhält.

### Aufgabe 2

In einem thermodynamischen System soll für einen Betriebsdruck von  $p = 50 \text{ bar}_i$  und eine Temperatur von  $\vartheta = 80^\circ\text{C}$  mithilfe der Peng-Robinson-Gleichung für

1. Wasserstoff und
2. Methan

die Realgaszahl  $z$  bestimmt werden. Der Umgebungsdruck ist  $p_0 = 1 \text{ bar}$ .

**Bild 2.3**

Thermodynamisches Verhalten von Wasserstoff und Methan unter der Einwirkung von Druck und Temperatur

Die Ergebnisse sind bis auf maximal vier Dezimalstellen anzugeben.

Die Lösungen sind im Abschnitt 11.1 zu finden.

Die Auswirkung des Realgasverhaltens von Wasserstoff auf die Dichte unter den Bedingungen eines erhöhten Betriebsdruckes ist dem Ergebnis der Aufgabe 3 zu entnehmen.

### Aufgabe 3

Berechnen Sie mithilfe der allgemeinen Zustandsgleichung für Gase die Dichte von Wasserstoff in einem Druckbehälter für einen Absolutdruck von  $p = 5 \text{ bar}_a$  und für eine Temperatur von  $T = 298,15 \text{ K}$  unter den zwei unterschiedlichen Bedingungen eines

1. idealen Gasverhaltens und
2. realen Gasverhaltens.

Die Ergebnisse sind auf vier Dezimalstellen zu runden.

Die Lösungen sind im Abschnitt 11.1 zu finden.

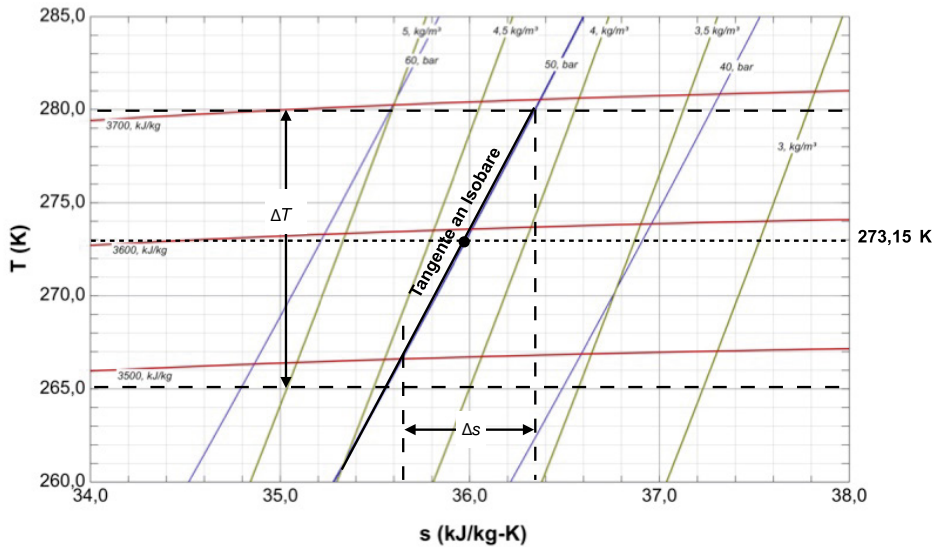
### 2.1.3 Wasserstoff und die Wärmekapazität

Die Kenntnis der spezifischen isobaren Wärmekapazität  $c_p$  ist zur Abschätzung von auszutauschender Wärme und Arbeit in einem Wasserstoffsystem von Bedeutung. Der Zusammenhang mit den fundamentalen spezifischen Größen Enthalpie  $h$  und Entropie  $s$  ist über die Beziehung

$$\frac{c_p}{T} = \left( \frac{\partial s}{\partial T} \right)_p$$

Formel 2.15

und über das  $T,s$ -Diagramm (Bild 2.4) möglich.



**Bild 2.4**  $T,s$ -Diagramm für n-Wasserstoff zur Ermittlung der spezifischen isobaren Wärmekapazität  $c_p$



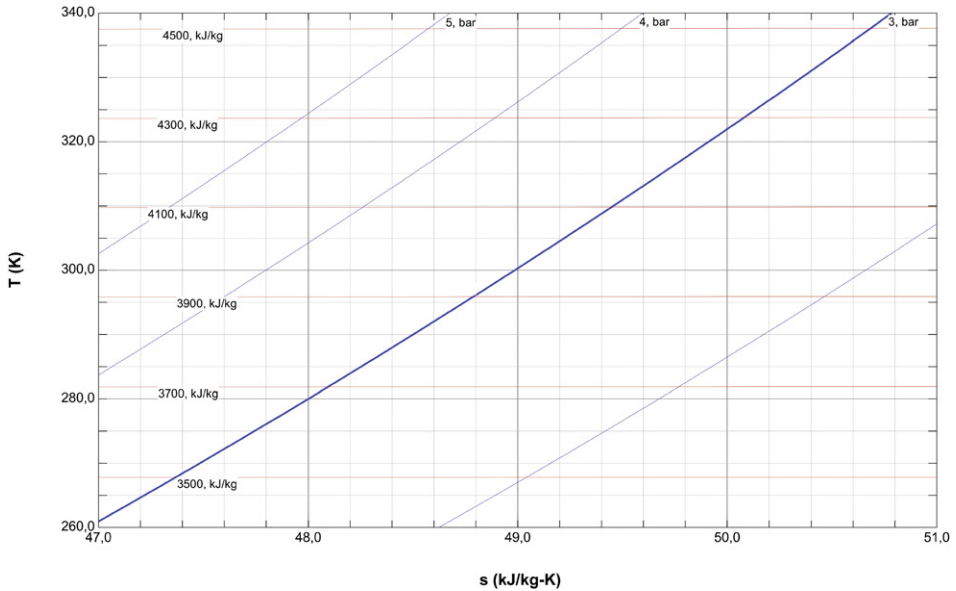
#### Hinweis

Weitere Auskünfte über den thematischen Zusammenhang finden Sie im Buch *Wasserstofftechnik* im Abschnitt 2.2.4 (Die spezifische Wärmekapazität).

In der folgenden Aufgabe 4 soll die Wärmekapazität mit der Hilfe des  $T,s$ -Diagramms bestimmt werden.

#### Aufgabe 4

Für ein thermodynamisches System aus n-Wasserstoff, welches unter den Betriebsbedingungen Temperatur  $T = 300\text{ K}$  und Absolutdruck  $p = 3\text{ bar}_a$  steht, soll die spezifische isobare Wärmekapazität  $c_p$  mithilfe des  $T,s$ -Diagramms (Bild 2.5) ermittelt werden.



**Bild 2.5**  $T,s$ -Diagramm für n-Wasserstoff zur Bestimmung der spezifischen isobaren Wärmekapazität  $c_p$

Das Ergebnis ist auf drei Dezimalstellen zu runden.

Die Lösung ist im Abschnitt 11.1 zu finden.

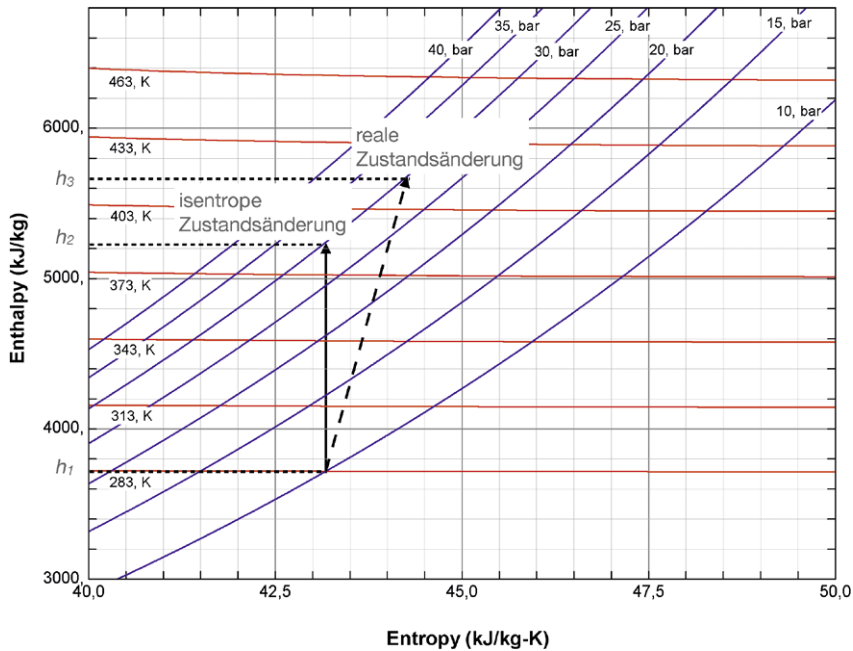
### 2.1.4 Dissipation und Effizienz

Eine zentrale Rolle bei der Planung technischer Anlagen spielt die Frage nach der Effizienz der eingesetzten Technologien. Wie groß ist der Anteil der Dissipation, oder anders ausgedrückt, wie groß sind die Verluste gegenüber dem adiabaten, reversiblen Fall? Dies können beispielsweise Wärmeverluste über die Systemgrenzen oder Verluste durch mechanische Reibung sein. Im Umgang mit technischen Fluiden wie dem Wasserstoff kann das  $h,s$ -Diagramm bei der Beantwortung der Frage nach der Effizienz helfen. So ist in Bild 2.6 ein Verdichtungsprozess isentrop, also ohne Verluste, und real mit Verlusten dargestellt.

Aus dem  $h,s$ -Diagramm kann die spezifische isobare Wärmekapazität ermittelt werden.

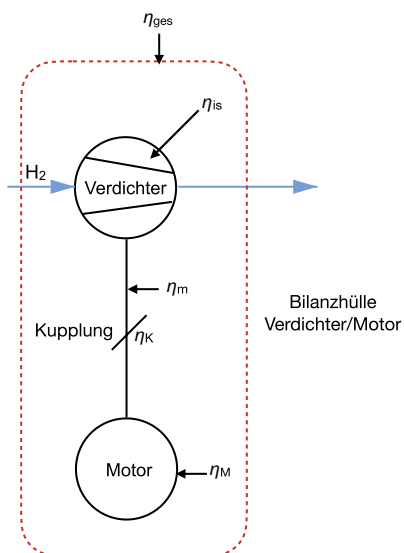
$$c_p dT = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p dT$$

Formel 2.16



**Bild 2.6**  $h,s$ -Diagramm für  $n$ -Wasserstoffs mit isentroper und realer Zustandsänderung eines Verdichtungsprozesses

Eine Verdichtereinheit zur Kompression des Wasserstoffs besteht in unserer Betrachtung nach Bild 2.7 aus dem Verdichter, einer Kupplung und dem Verdichterantrieb. Weitere Nebenaggregate wie Kühler und Schmierölsystem werden an dieser Stelle nicht betrachtet.



**Bild 2.7**

Wirkungsgrade einer Verdichtereinheit aus drehzahlgezieltem Antriebsmotor, Kupplung und Verdichter

# Index

## A

Anteil

- Masse 19, 112, 182, 184
- Stoffmenge 19, 112, 182, 184
- Volumen 19, 112, 182

## B

Biologische Wasserstoffherzeugung  
69, 158

- Dunkle Fermentation 70, 159
- Photofermentation 70, 159

## C

CCS 60

- Speicherkapazität 61, 153

## D

Dampfreformierung 58

- Erdgasverbrauch 60, 149
- Kohlendioxid 149
- Reaktionsgleichung 59
- Wirkungsgrad 60, 152

## E

Elektrolyse 63

- alkalische 44
- Enthalpie 66, 155
- Faraday-Wirkungsgrad 67, 158
- freie Enthalpie 66, 155

- Hochtemperatur 44

- PEM 44

- Reaktionsgleichung 63

- Spannungs-Wirkungsgrad 67, 158

- Stack-Wirkungsgrad 67, 158

- VE-Wasser 63, 154

- Wasserbedarf 63, 65, 154

- Wirkungsgrad 67, 157

- Zellspannung 66, 156

## F

Fluidenergiemaschine 79

- Expander 82, 167

- Gasturbine 80, 166

- Kolbenverdichter 79, 165

## K

Konzentration

- Masse 21, 114, 187

- Stoffmenge 21, 114, 187

- Volumen 21, 114, 187

## M

Microgrid 6

- örtliches Verteilnetz 101

- Permeation 29

- zyklische Beanspruchung 38

Mischung 23

- Mischungsregeln 23, 117

## N

- Näherungsverfahren
- Regula Falsi 17
- Normzustand 9

## O

- Odorierung 101, 184, 187

## P

- Permeation 26
- durch Kunststoffe 29, 124
- durch Metalle 27, 121 f.
- Pyrolyse 62
- Kohlenstoff 153
- Reaktionsgleichung 62

## R

- Reaktion
- Enthalpie 44, 138, 176
- Entropie 44
- freie Enthalpie 44, 138
- Satz von Hess 44, 65, 138, 155, 176

## S

- Speicher 87
- gravimetrische Energiedichte 87, 170, 174
- Metallhydrid 94, 174
- Salzkaverne 89, 171 f.
- Tankbehälter 88, 169 f.
- volumetrische Energiedichte 87, 170, 174
- Standardzustand 9

## T

- Transport 72
- Druckverlust 73, 161
- Einspeiseanlage 76, 164
- Netzberechnungssoftware 73, 163
- Netzentwicklungsplan 72

## V

- Verdichter 15, 109
- Viskosität
- dynamisch 17, 111

## W

- Wärmekapazität
- isobare 12, 14, 109
- Wärmeleitfähigkeit 18, 111
- Wasserstoff
- blauer 60
- Brennwert 54
- Explosionsgrenzen 42, 136 f.
- flüssig 85, 168
- grauer 58
- grüner 69
- Heizwert 54
- Modellgas 8
- Reinheit 101, 182
- Speicherpotenzial 55, 147
- stoffspezifische Werte 7, 11
- THG-Einsparpotenzial 56, 147
- türkiser 58, 62
- Verbrennung 47, 141
- Wasserstoffanwendung 95
- Ammoniaksynthese 95, 175
- synthetisches Methan 96, 176 ff.
- Wasserstoffversprödung 30, 125
- Hauptnormalspannungen 32, 125
- Leck-vor-Bruch-Kriterium 33, 129
- quasistationärer Betriebszustand 31
- Spannungsintensitätsfaktor 32, 126
- zyklische Beanspruchung 37 f., 132 f.
- Wirkungsgrad 14 f.
- an der Kupplung 111
- der Elektrolyse 57, 149
- Elektrolyse 67
- gesamt 111
- isentroper 16, 109, 111
- mechanischer 111



Wirtschaftlichkeit 50, 143  
– dcf-Verfahren 52  
– Kapitalwertmethode 52  
– Kreislaufwirtschaft 51  
– Nettobarwertmethode 50

## Z

Zustandsänderung  
– isentrop 15  
Zustandsgleichung  
– ideales Gasverhalten 8, 105, 108  
– Peng Robinson 10, 106, 108, 119  
– reales Gasverhalten 10, 106