

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

Vorwort	IX
1 Einführung	1
1.1 Das Konzept des Buches	3
1.2 Die Form des Buches	4
2 Eigenschaften des Wasserstoffs	6
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 Risspitze ...	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

3	Wirtschaftlichkeit von Wasserstoffprojekten	50
4	Aufgaben und Potenziale des Wasserstoffs	53
4.1	Wasserstoff in der Sektorenkopplung	53
4.2	Wasserstoff als Zusatz in Gasnetzen	56
5	Wasserstofferzeugung	57
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
6	Wasserstofftransport durch Leitungen	72
6.1	Druckverlust in Rohrleitungen	73
6.2	Einspeisung in nachgeschaltete Systeme	76
7	Fluidenergiemaschinen für Wasserstoff	79
7.1	Kolbenverdichter	79
7.2	Gasturbine	80
7.3	Expansionsanlage	82
8	Verflüssigter Wasserstoff	85
9	Wasserstoffspeicher	87
9.1	Wasserstoff in Fahrzeug-Tankbehältern	87
9.2	Wasserstoff in Salzkavernen	89
9.3	Wasserstoff in Metallhydriden	94
10	Wasserstoffanwendungen	95
10.1	Wasserstoff und die Ammoniaksynthese	95
10.2	Wasserstoff und synthetisches Methan	96
10.3	Wasserstoff in lokalen Verteilnetzen	101

11	Lösungen zu allen Aufgabenstellungen	105
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
	Anhang A: Einheiten und deren Umrechnungen	189
	Anhang B: Formelzeichen und Einheiten	191
	Anhang C: Abkürzungen und Eigennamen	198
	Anhang D: Verwendete Naturkonstanten und Bezugsgrößen	200
	Literaturverzeichnis	201
	Index	203

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 Werlte
© 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 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.