



Leseprobe

zu

„Bilanzierung in der Verfahrenstechnik“

von Anja R. Paschedag

Print-ISBN: 978-3-446-45410-1
E-Book-ISBN: 978-3-446-46200-7

Weitere Informationen und Bestellungen unter
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-45410-1>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Vorwort

Die Bilanzierung ist ein elementares Handwerkszeug jedes Ingenieurs in der stoffwandelnden Industrie. Egal, ob ein Wärmeübertrager oder eine Rektifikationskolonne auszulegen ist, ob der Umsatz in einem kontinuierlichen Reaktor zu bestimmen ist oder ob für eine Anlage der CO_2 -Fußabdruck berechnet werden muss – immer führt der Lösungsweg über Bilanzen.

In der Lehre an Universitäten und Hochschulen ist aber festzustellen, dass es vielen Studierenden schwerfällt, dieses grundlegende Handwerkszeug anzuwenden. Das mag unter anderem daher rühren, dass die Bilanzen, die zu betrachten sind, sehr vielfältig sein können. Auch wenn man sich auf integrale Stoff- und Energiebilanzen beschränkt, ergibt sich aus chemischen und physikalischen Wandlungsprozessen eine große Variabilität der Formulierungen. Die Berücksichtigung instationären Verhaltens führt zu Differentialgleichungen, deren Lösung aufwendig werden kann. Ein anderer Grund ist, dass Bilanzen in den einzelnen Teildisziplinen der Verfahrenstechnik nur selten methodisch behandelt, sondern meistens vorausgesetzt werden. Ein Blick in verschiedene Lehrbücher zeigt, wie oft Bilanzen zur Erklärung von verfahrenstechnisch relevanten Phänomenen, zur Auslegung von Apparaten und zur sicherheitstechnischen Beurteilung herangezogen werden. Dabei kann man sich auf das Gebiet der Thermischen Verfahrenstechnik [Mer05, Swi14], der Mechanischen Verfahrenstechnik [Boh12, Kra04], der Reaktionstechnik [BHR92, MEr07] oder der Sicherheitstechnik [Ste95] begeben. Zum Vorgehen bei der Bilanzierung findet man in diesen Büchern aber nur wenige Anhaltspunkte.

Hier ist das vorliegende Buch als Ergänzung zu verstehen. Es referiert nicht die Inhalte der genannten Disziplinen, diese werden vorausgesetzt. Es setzt an der Stelle an, an der in den meisten Büchern steht „Über eine Bilanz erhält man dafür ...“ und stattet Studierende und Ingenieure mit einer Methode aus, mit der sie die hier erforderliche Bilanz erstellen und lösen können. Damit sind sie auch in der Lage, an anderen Stellen in Studium und Beruf dieses Werkzeug zu verwenden. In der Lehre und zum eigenen Lernen eignet sich das Buch als Begleitung in den Fächern, in denen Bilanzen angewendet werden. Die Aufgaben müssen dann nicht in der vorgegebenen Reihenfolge bearbeitet werden, sondern können passend zum behandelten Thema ausgewählt werden. Auf den verfahrenstechnischen Kontext der als Beispiel herangezogenen Fragestellungen gehe ich nicht weiter ein. Durch die Fächer, die ich lehre, liegt der Schwerpunkt im Bereich Reaktionstechnik. Die Übertragbarkeit auf andere Gebiete der Verfahrenstechnik wird aber an vielen Stellen deutlich gemacht.

Das Lehr- und Übungsbuch „Bilanzierung in der Verfahrenstechnik“ stellt kompakt und verständlich eine systematische Methode vor, mit der Bilanzen für verfahrenstechnische Anwendungen bearbeitet werden können. Es bietet zum einen eine formale Struktur, mit der Bilanzen konsistent aufgestellt werden können, und zum anderen einen Überblick über die Besonderheiten einzelner Bilanzierungsprobleme. Darüber hinaus werden exemplarisch Lösungswege demonstriert. Auf diese Weise wird ein Werkzeugkasten bereitgestellt, der auf eine Vielzahl von Fragestellungen anwendbar ist.

Nach einer allgemeinen Einführung, die Gemeinsamkeiten zwischen den verschiedenen Bilanzen aufzeigt, wird die Anwendung auf Gesamtmassenbilanzen, Einzelstoffbilanzen und

Energiebilanzen diskutiert. Im Anschluss wird auf eine mögliche Kopplung verschiedener Bilanzen eingegangen. Als Ausblick wird gezeigt, wie komplex verknüpfte Bilanzen und differentiell formulierte Bilanzen mit numerischen Werkzeugen gelöst werden können. Die wichtigsten Punkte werden am Ende der Kapitel als Merksätze zusammengestellt. Neben dem theoretischen Verständnis ist für die Lösung von Bilanzproblemen sehr viel Übung erforderlich. Diese kommt in der Universitäts- und Hochschullehre manchmal etwas kurz. Das vorliegende Buch will Lehrende und Lernende dabei unterstützen, diese Lücke zu schließen. Zu jeder Gruppe von Bilanzen gibt es daher eine umfangreiche Sammlung von Übungsaufgaben mit Kurzlösungen, wobei am Beginn jedes Aufgabenblocks eine Aufgabe mit detailliertem Lösungsweg vorgestellt wird.

Begriffe, die im Text eingeführt wurden, und solche, die beim Leser vorausgesetzt werden, sind in einer Begriffserklärung mit kurzen Definitionen zusammengestellt. Auch die für die Lösung erforderlichen mathematischen Werkzeuge, die vielleicht nicht jeder gleich parat hat, sind am Ende des Buches aufgeführt.

Die Anwendung der vorgeschlagenen Methode führt bei allen Aufgaben zu einem richtigen Ergebnis, sofern sie konsequent verfolgt wird. Für erfahrene Bilanzierer ist dieser Weg aber vielfach zu umständlich. Wer also auf einem anderen, von ihm als einfacher empfundenen Weg zum gleichen Ergebnis gelangt, kann davon ausgehen, dass er die Methode des Bilanzierens so verinnerlicht hat, dass er kreativ und effizient mit ihr umgehen kann. Es wäre schön, wenn viele Leser im Laufe der Bearbeitung der Aufgaben dieses Niveau erreichen.

Die meisten Aufgaben sind im Rahmen meiner langjährigen Lehrtätigkeit an der Beuth-Hochschule für Technik Berlin als Übungs- oder Klausuraufgaben entstanden. Da sie primär der Vermittlung der Methode dienen sollen, haben sie nicht den Anspruch, die als Beispiel herangezogenen Prozesse genau zu beschreiben. Die verwendeten Stoffwerte sind in der Regel richtig. Kinetische Parameter sind in der Literatur nur sehr eingeschränkt zu finden, sodass ich hier die Werte nur grob abgeschätzt habe. Diese Werte dürfen nicht übernommen werden, wenn es darauf ankommt, den entsprechenden Prozess richtig zu beschreiben.

Damit die Aufgaben nicht dazu verführen, den im Muster vorgegebenen Lösungsweg gedankenlos auf die folgenden Aufgaben zu übertragen, enthalten manche von ihnen Stolpersteine wie Inkonsistenzen in den angegebenen Einheiten oder eine größere Zahl gegebener Werte, als für die Lösung der Aufgaben erforderlich ist.

Mein Dank gilt meinem Kollegen Rainer Geike, der mir lange Jahre mit fachlichen und didaktischen Hinweisen zur Seite stand, der die Aufgaben 5.1 und 5.8 bereitgestellt hat und mit seinen Hinweisen zum Manuskript die Qualität des Buches befördert hat. Vielen Dank auch an die Kollegen Reinhard Sperling und Wolfgang Seifert, die es auf sich genommen haben, das Manuskript auf inhaltliche Konsistenz zu prüfen und mir viele fruchtbare Anregungen gegeben haben. Viele Studierende, die die Aufgaben im Rahmen von Lehrveranstaltungen bearbeitet haben, haben mich auf Inkonsistenzen oder Rechenfehler in den Musterlösungen aufmerksam gemacht. Ohne meinen Mann Norbert wäre das Buch nicht machbar gewesen. Er hat sämtliche Abbildungen zu den Aufgaben erstellt, mich beim Layout unterstützt und mir zeitliche Freiräume zum Schreiben zugestanden.

Für die in diesem Buch enthaltenen Fehler und Mängel bin ich allein verantwortlich. Scheinbar geschlechtsspezifische Formulierungen sind generisch zu verstehen.

Inhalt

Liste der Aufgaben	9
Symbolverzeichnis	11
1 Grundlagen der Bilanzierung	15
1.1 Erhaltungssätze	17
1.2 Allgemeine Bilanzgleichung	18
1.3 Integrale und differentielle Bilanzen.....	21
1.4 Modelle idealer Apparate	21
1.5 Herangehensweise an Bilanzierungsaufgaben	23
1.6 Merksätze	27
2 Gesamtmassenbilanzen	29
2.1 Herangehensweise	31
2.2 Merksätze	32
2.3 Aufgaben	32
2.3.1 Stationäre Bilanzen	32
2.3.2 Instationäre Bilanzen	39
3 Einzelstoffbilanzen	43
3.1 Herangehensweise	45
3.2 Merksätze	50
3.3 Aufgaben	51
3.3.1 Stationäre Bilanzen	51
3.3.2 Instationäre Bilanzen	66
4 Energiebilanzen	75
4.1 Herangehensweise	76
4.1.1 Zu- und Abströme	78
4.1.2 Wandlung	83
4.2 Merksätze	86
4.3 Aufgaben	86
4.3.1 Stationäre Bilanzen	86
4.3.2 Instationäre Bilanzen	97

5	Verknüpfte Bilanzen	101
5.1	Herangehensweise	102
5.2	Merksätze	104
5.3	Aufgaben	105
5.3.1	Mehrere Einzelstoffbilanzen	105
5.3.2	Einzelstoff- und Energiebilanzen	109
5.3.3	Bilanzen und thermodynamische Gleichungen	115
6	Numerische Simulation	119
6.1	Prozesssimulation	120
6.1.1	Mathematisches Modell	121
6.1.2	Numerische Lösung	123
6.2	CFD	124
6.2.1	Mathematisches Modell	125
6.2.2	Diskretisierung und numerische Lösung	128
6.3	Merksätze	130
7	Hilfsmittel	131
7.1	Begriffe	131
7.2	Referenzzustände	133
7.3	Mathematische Werkzeuge	133
	Literatur	135
	Index	137

Liste der Aufgaben

Aufgabe 2.1:	Ideal gemischter Rührkessel – Volumenstrom.....	32
Aufgabe 2.2:	Rektifikation.....	33
Aufgabe 2.3:	T-Mischer.....	34
Aufgabe 2.4:	Mischer mit Entgasung.....	35
Aufgabe 2.5:	Meersalzgewinnung.....	36
Aufgabe 2.6:	Reaktor mit Abscheider.....	37
Aufgabe 2.7:	Abwasserreinigung eines Kraftwerks.....	38
Aufgabe 2.8:	Mischung im Klärwerk.....	38
Aufgabe 2.9:	Herstellung schwefliger Säure.....	39
Aufgabe 2.10:	Belüfteter Fermenter.....	41
Aufgabe 3.1:	Ideal gemischter Rührkessel – Konzentration.....	51
Aufgabe 3.2:	Fällung von Bariumsulfat.....	53
Aufgabe 3.3:	Ammoniaksynthese.....	56
Aufgabe 3.4:	Entschwefelung von Erdöl.....	58
Aufgabe 3.5:	Reaktor mit vollständigem Umsatz.....	58
Aufgabe 3.6:	Heizung einer Hütte.....	59
Aufgabe 3.7:	Schwefelwasserstoff-Verbrennung.....	60
Aufgabe 3.8:	Reaktor mit Parallelreaktionen.....	60
Aufgabe 3.9:	Reaktion und Inhibition.....	62
Aufgabe 3.10:	Methanverbrennung in einem Kraftwerk.....	63
Aufgabe 3.11:	Reaktor mit nachgeschalteter Rektifikation.....	63
Aufgabe 3.12:	Fermentation von Glukose.....	64
Aufgabe 3.13:	Rührkesselkaskade.....	65
Aufgabe 3.14:	Spaltung von Saccharose.....	66
Aufgabe 3.15:	Reaktionszeit im Batch-Reaktor.....	66
Aufgabe 3.16:	Berechnung der Geschwindigkeitskonstanten.....	68
Aufgabe 3.17:	Spaltung von Cellobiose.....	68
Aufgabe 3.18:	Dimerisierung von Essigsäure.....	69
Aufgabe 3.19:	Halbierung der Konzentration.....	69
Aufgabe 3.20:	Spülen eines Reaktors.....	70
Aufgabe 3.21:	Umsatz im Batch-Reaktor.....	70
Aufgabe 3.22:	Dioxanherstellung.....	71

Aufgabe 3.23:	Weingärung.....	71
Aufgabe 3.24:	Milchsäuregärung	72
Aufgabe 3.25:	Sterilisation von Milch	72
Aufgabe 3.26:	Wirbelschicht und Festbettreaktor	73
Aufgabe 4.1:	Rohrleitung zwischen zwei Apparaten	86
Aufgabe 4.2:	Reaktor mit Kühlmantel	87
Aufgabe 4.3:	Crash-Eis.....	89
Aufgabe 4.4:	Rohrbündel-Wärmeübertrager	90
Aufgabe 4.5:	Gegenstrom-Wärmeübertrager.....	90
Aufgabe 4.6:	Rohrreaktor mit Temperiermantel	91
Aufgabe 4.7:	Beheizter Batch-Reaktor.....	92
Aufgabe 4.8:	Katalytischer Zerfall	93
Aufgabe 4.9:	Reaktionswärme einer Zersetzung	93
Aufgabe 4.10:	Dampferzeuger	94
Aufgabe 4.11:	Katalytische Abluftreinigung.....	95
Aufgabe 4.12:	Herstellung eines Aromastoffs	96
Aufgabe 4.13:	Dampfsterilisation von Milch.....	96
Aufgabe 4.14:	Anfahren eines Rührapparats.....	97
Aufgabe 4.15:	Temperaturanstieg in einem Ammoniaktank	99
Aufgabe 4.16:	Gedämmter Laborreaktor	99
Aufgabe 4.17:	Goldschmidt-Verfahren	100
Aufgabe 5.1:	Synthese von Acetaldehyd.....	105
Aufgabe 5.2:	Methylierung von Benzol.....	108
Aufgabe 5.3:	Bromierung von Ethylen.....	109
Aufgabe 5.4:	Temperierung eines Reaktors	110
Aufgabe 5.5:	Ausfall der Reaktorkühlung	113
Aufgabe 5.6:	Dimerisierung von Stickstoffdioxid	113
Aufgabe 5.7:	Acetonsynthese	114
Aufgabe 5.8:	Wassergas-Shift-Reaktion	115
Aufgabe 5.9:	Mischung von Säuren	117

Liste der Aufgaben

Aufgabe 2.1:	Ideal gemischter Rührkessel – Volumenstrom.....	32
Aufgabe 2.2:	Rektifikation.....	33
Aufgabe 2.3:	T-Mischer.....	34
Aufgabe 2.4:	Mischer mit Entgasung.....	35
Aufgabe 2.5:	Meersalzgewinnung.....	36
Aufgabe 2.6:	Reaktor mit Abscheider.....	37
Aufgabe 2.7:	Abwasserreinigung eines Kraftwerks.....	38
Aufgabe 2.8:	Mischung im Klärwerk.....	38
Aufgabe 2.9:	Herstellung schwefliger Säure.....	39
Aufgabe 2.10:	Belüfteter Fermenter.....	41
Aufgabe 3.1:	Ideal gemischter Rührkessel – Konzentration.....	51
Aufgabe 3.2:	Fällung von Bariumsulfat.....	53
Aufgabe 3.3:	Ammoniaksynthese.....	56
Aufgabe 3.4:	Entschwefelung von Erdöl.....	58
Aufgabe 3.5:	Reaktor mit vollständigem Umsatz.....	58
Aufgabe 3.6:	Heizung einer Hütte.....	59
Aufgabe 3.7:	Schwefelwasserstoff-Verbrennung.....	60
Aufgabe 3.8:	Reaktor mit Parallelreaktionen.....	60
Aufgabe 3.9:	Reaktion und Inhibition.....	62
Aufgabe 3.10:	Methanverbrennung in einem Kraftwerk.....	63
Aufgabe 3.11:	Reaktor mit nachgeschalteter Rektifikation.....	63
Aufgabe 3.12:	Fermentation von Glukose.....	64
Aufgabe 3.13:	Rührkesselkaskade.....	65
Aufgabe 3.14:	Spaltung von Saccharose.....	66
Aufgabe 3.15:	Reaktionszeit im Batch-Reaktor.....	66
Aufgabe 3.16:	Berechnung der Geschwindigkeitskonstanten.....	68
Aufgabe 3.17:	Spaltung von Cellobiose.....	68
Aufgabe 3.18:	Dimerisierung von Essigsäure.....	69
Aufgabe 3.19:	Halbierung der Konzentration.....	69
Aufgabe 3.20:	Spülen eines Reaktors.....	70
Aufgabe 3.21:	Umsatz im Batch-Reaktor.....	70
Aufgabe 3.22:	Dioxanherstellung.....	71

Aufgabe 3.23:	Weingärung.....	71
Aufgabe 3.24:	Milchsäuregärung	72
Aufgabe 3.25:	Sterilisation von Milch	72
Aufgabe 3.26:	Wirbelschicht und Festbettreaktor	73
Aufgabe 4.1:	Rohrleitung zwischen zwei Apparaten	86
Aufgabe 4.2:	Reaktor mit Kühlmantel	87
Aufgabe 4.3:	Crash-Eis.....	89
Aufgabe 4.4:	Rohrbündel-Wärmeübertrager	90
Aufgabe 4.5:	Gegenstrom-Wärmeübertrager.....	90
Aufgabe 4.6:	Rohrreaktor mit Temperiermantel	91
Aufgabe 4.7:	Beheizter Batch-Reaktor.....	92
Aufgabe 4.8:	Katalytischer Zerfall	93
Aufgabe 4.9:	Reaktionswärme einer Zersetzung	93
Aufgabe 4.10:	Dampferzeuger	94
Aufgabe 4.11:	Katalytische Abluftreinigung.....	95
Aufgabe 4.12:	Herstellung eines Aromastoffs	96
Aufgabe 4.13:	Dampfsterilisation von Milch.....	96
Aufgabe 4.14:	Anfahren eines Rührapparats.....	97
Aufgabe 4.15:	Temperaturanstieg in einem Ammoniaktank	99
Aufgabe 4.16:	Gedämmter Laborreaktor	99
Aufgabe 4.17:	Goldschmidt-Verfahren	100
Aufgabe 5.1:	Synthese von Acetaldehyd.....	105
Aufgabe 5.2:	Methylierung von Benzol.....	108
Aufgabe 5.3:	Bromierung von Ethylen.....	109
Aufgabe 5.4:	Temperierung eines Reaktors	110
Aufgabe 5.5:	Ausfall der Reaktorkühlung	113
Aufgabe 5.6:	Dimerisierung von Stickstoffdioxid	113
Aufgabe 5.7:	Acetonsynthese	114
Aufgabe 5.8:	Wassergas-Shift-Reaktion	115
Aufgabe 5.9:	Mischung von Säuren	117

2

Gesamtmassenbilanzen



Nichts geht verloren

Die Gesamtmassenbilanz ist das Kernstück der verfahrenstechnischen Bilanzierung. Mit ihrer Hilfe können die häufig verwendeten Volumenströme oder auch Strömungsgeschwindigkeiten berechnet werden. Sie kann helfen, Probleme im Betrieb, wie etwa Leckagen, zu finden. Häufig wird sie von Verfahreningenieuren unbewusst eingesetzt – aber da schlummern Gefahren, derer man sich bewusst werden sollte.

Dieses Kapitel zeigt,

- wie vielfältig die Anwendung von Gesamtmassenbilanzen ist und
- wie einfach sie aufgestellt werden können.

Die Erhaltung der Gesamtmasse ist einer der am häufigsten verwendeten verfahrenstechnischen Grundsätze. Da die Gesamtmasse wandlungsfrei ist, gilt hier im engeren Sinn „Was reingeht, muss auch wieder rauskommen – oder drin bleiben.“ Dieser Grundsatz lässt sich leicht verinnerlichen und in vielen Fällen auch gut prüfen. Sei es bei der Berechnung von Strömen im Inneren einer Anlage, sei es bei der Suche nach Leckagen – die Gesamtmassenbilanz über den betrachteten Apparat oder Anlagenteil kann Antworten liefern oder zumindest aufzeigen, in welcher Richtung weiter nach ihnen zu suchen ist.

Häufig werden Gesamtmassenbilanzen auf stationäre Prozesse angewendet. Dann muss ohne Abstriche das wieder herauskommen, was hineingeht. Werden in einem stationär betriebenen Apparat mehrere Ströme gemischt, die diesen Apparat dann in einem Strom verlassen, so muss der Abstrom gleich der Summe der Zuströme sein. Wenn die Dichte in allen Zuströmen gleich und über den Prozess konstant ist, können statt der Massenströme auch Volumenströme betrachtet werden. Aber Vorsicht, diese Annahme ist nur selten erfüllt. Insbesondere, wenn es mehrere Zuströme verschiedener Zusammensetzung gibt oder wenn Gasströme beteiligt sind, unterscheiden sich die Dichten meistens. In Fließbildern und Steuerungstools werden die Ströme aber häufig volumenbezogen angegeben, sodass auch in der Bilanzierung die Verwendung von Volumenströmen naheliegt. Hier ist große Aufmerksamkeit erforderlich, um keine Bilanzfehler zu machen, die dann zu Auslegungs- oder Steuerungsfehlern führen. Zur Sicherheit sollte immer zuerst eine „echte“ Massenbilanz erstellt werden, in die dann gemäß

$$\dot{m} = \rho \cdot \dot{V}$$

die Volumenströme eingeführt werden.

Was bei der Betrachtung eines Apparats selbstverständlich erscheint, gerät bei der Betrachtung einer Rohrleitung oder eines anderen Anlagenteils, bei dem primär auf die Strömungsverhältnisse geschaut wird, nicht selten aus dem Blick. Für die Strömungsbetrachtung ist die gegenseitige Beeinflussung von Druck und Geschwindigkeit zentral. Diese Beziehung steht in der Impulsbilanz, die in der Regel in Form der um den Reibungsdruckverlust erweiterten

Bernoulli-Gleichung benutzt wird. Der aus der reibungsfreien Bernoulli-Gleichung abgeleitete Zusammenhang „großer Druck – kleine Geschwindigkeit, kleiner Druck – große Geschwindigkeit“ wird dann manchmal so uminterpretiert, dass aus einem reibungsbedingten Druckabfall auf eine Geschwindigkeitszunahme geschlossen wird. Das widerspricht der Massenerhaltung und muss auf jeden Fall vermieden werden. Hier hilft die Massenbilanz bei der Kontrolle und Interpretation von Ergebnissen aus der Bernoulli-Gleichung, teilweise ermöglicht sie die Lösung dieser Gleichung auch erst. So gibt es oft Fragestellungen der Art, dass für eine durchströmte Geometrie (das kann ein Rohr mit oder ohne Querschnittsänderung sein, aber auch ein Ventil, ein statischer Mischer oder ein Wärmeübertrager) der Volumenstrom und damit die Geschwindigkeit am Zulauf zusammen mit dem Druck an dieser Stelle bekannt sind. Soll der Druck am Ablauf bestimmt werden, tritt in der Bernoulli-Gleichung als zusätzliche Unbekannte die Geschwindigkeit am Ablauf auf. Um sie zu bestimmen, ist eine Gesamtmassenbilanz erforderlich.

Ein wichtiger Einsatzbereich von Massenbilanzen ist die Anlagenkontrolle. Um festzustellen, ob es Leckagen gibt, die zu unerwarteten Zu- oder Abströmen führen, können sie ohne großen Aufwand eingesetzt werden. Solche ungeplanten „Wege“ von Massenströmen können den Prozess beeinflussen, etwa wenn Luft in einen unter reduzierenden Bedingungen ablaufenden Prozessschritt eindringt. Sie können eine Gefährdung für Menschen und Umwelt darstellen, wenn toxische Gase oder Flüssigkeiten aus einer Anlage in die Umgebung austreten. Auch Ablagerungen im Apparat machen sich in der Massenbilanz bemerkbar. Je nach Art des Apparates und der möglichen Ablagerungen kann dies entweder eine unproblematische Erklärung für gewisse Abweichungen in der Bilanz sein, oder auf eine Prozessgefährdung hinweisen. So können rechtzeitig Gegenmaßnahmen ergriffen werden, um zu vermeiden, dass dünne Verbindungskanäle durch Ablagerungen verstopfen oder die Ablagerungen den Prozess chemisch beeinflussen.

Auch bei instationären Vorgängen, wie etwa dem Befüllen eines Apparats, kann eine Gesamtmassenbilanz ein wichtiges Auslegungswerkzeug sein. Hierbei ist es genauso wichtig, den Unterschied zwischen Masse und Volumen zu beachten. Die wenigsten technischen Gemische verhalten sich ideal. In der Regel treten Exzessvolumina auf, also Änderungen des Volumens durch den Mischvorgang. Um diesen Effekt richtig zu erfassen, muss bekannt sein, nach welchem thermodynamischen Gesetz die Mischung abläuft. Gegebenenfalls muss dabei auch die aus der Mischung resultierende Temperaturänderung berücksichtigt werden. Daraus kann dann mit Hilfe der Massenbilanz bestimmt werden, welches Volumen die Mischung am Ende einnimmt bzw. welche Menge an Ausgangsstoffen zugeführt werden muss, um ein bestimmtes Apparatvolumen zu befüllen.

Neben der Bearbeitung von Fragestellungen, die allein auf Grundlage von Gesamtmassenbilanzen erfolgen kann, bilden diese Bilanzen eine Grundlage für fast alle Einzelstoff- und Energiebilanzen, die in den folgenden Kapiteln besprochen werden.

■ 2.1 Herangehensweise

Gesamtmassenbilanzen sind die einfachste Art von Bilanzen, die in der Verfahrenstechnik zu handhaben sind. In den betrachteten Systemen wird die Gesamtmasse erhalten. Damit treten hier keine Wandlungsterme auf, die andere Bilanzen teilweise nichtlinear und damit analytisch schwer lösbar machen.

Auch molekulare Transportterme treten nicht auf. Die konvektive Geschwindigkeit ist als Geschwindigkeit der Massenpunkte bestimmt. Daher kann es keine Bewegung der Gesamtmasse relativ zur Konvektion geben. Dementsprechend kommen in Gesamtmassenbilanzen nur Speicherterme für die zeitliche Veränderung der Gesamtmasse eines instationären Systems und konvektive Zu- und Abströme vor.



Die Grundform der Gesamtmassenbilanz lautet:

$$\frac{dm}{dt} = \sum \dot{m}_{zu} - \sum \dot{m}_{ab} \quad (2.1)$$

An Stelle der Massenströme sind in vielen Fällen die Volumenströme oder die mittleren Geschwindigkeiten der Ströme relevant, sodass der Massenstrom unter Verwendung dieser Größen ausgedrückt werden muss:

$$\dot{m} = \rho \cdot \dot{V} = \rho \cdot A \cdot w \quad (2.2)$$

Die Fehlerquelle bei Gesamtmassenbilanzen liegt also nicht in der Komplexität der zu berücksichtigenden Terme, sondern besteht eher darin, dass die Bilanzen zu einfach „aus dem Bauch heraus“ aufgestellt werden. Das hat nicht selten den Effekt, dass statt der Massenerhaltung eine Volumenerhaltung angesetzt wird, die es aber nicht gibt. Lediglich in Systemen mit konstanter Dichte lässt sich gemäß

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (2.3)$$

die Gesamtmassenbilanz über die Volumina formulieren.

Ist ein System hinsichtlich der Gesamtmasse **stationär**, bedeutet das, dass sich die Masse des Systems mit der Zeit nicht ändert. Zusätzlich wird darunter verstanden, dass sich auch die Zu- und Abströme nicht mit der Zeit ändern. Damit ergibt sich die einfache Form:

$$\sum \dot{m}_{zu} = \sum \dot{m}_{ab} \quad (2.4)$$

Aus konstanten Massenströmen können einfach die in einer vorgegebenen Zeit transportierten Massen berechnet werden oder umgekehrt:

$$\dot{m} = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (2.5)$$

Instationäre Gesamtmassenbilanzen beschreiben zum Beispiel das Befüllen eines Behälters. Auf die in Abschnitt 1.4 vorgestellten Modelle idealer Apparate lassen sie sich nicht anwenden, da in allen diesen Modellansätzen die Annahme steckt, dass sich die Gesamtmasse im System nicht ändert.

Im Aufgabenteil sollen zwei Beispiele vorgestellt werden, die die Annahmen dieser Modelle erweitern und daher die Beschreibung durch eine instationäre Gesamtmassenbilanz benötigen.

■ 2.2 Merksätze



- Bei Gesamtmassenbilanzen müssen Dichteunterschiede beachtet werden.
- In Gesamtmassenbilanzen treten keine molekularen Ströme auf.
- Der Wandlungsterm der Gesamtmassenbilanz ist null.

■ 2.3 Aufgaben

2.3.1 Stationäre Bilanzen



Aufgabe 2.1 Ideal gemischter Rührkessel – Volumenstrom

Diese Aufgabe verwendet zwar Zahlenwerte für einen fiktiven Prozess, ist in ihrer Grundform aber Bestandteil vieler Bilanzaufgaben, in denen der Volumenstrom des Ablaufs ein wichtiger Parameter ist – seien es Einzelstoff- oder Energiebilanzen.

Einem stationär betriebenen idealen Rührkessel werden zwei Reaktionspartner in separaten Strömen zugeführt. Durch die Reaktion ergibt sich eine Dichte im Reaktor, die nicht dem Mittelwert der Dichten der Zulaufströme entspricht.

Wie groß ist der Ablauf-Volumenstrom?

$$\rho_{zu1} = 819 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{zu2} = 830 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_R = 845 \text{ kg/m}^3$$

$$\dot{V}_{zu1} = 53 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\dot{V}_{zu2} = 41 \text{ m}^3/\text{h}$$



Musterlösung 2.1

In Bild 2.1 ist der Apparat mit dem Bilanzraum gezeichnet. Es ist zu erkennen, dass drei Ströme über die Bilanzgrenze treten: zwei Zuströme und ein Abstrom.

Index

A

Abstrom 19, 31
Anfangsbedingungen 127
Arrhenius-Gleichung 47

B

Bilanz
– differentielle 21, 125
– integrale 21
Bilanzgleichung 18
Bilanzgrenze 19, 24, 82
Bilanzgröße 18, 23
Bilanzraum 17, 24
BR 22

C

CSTR 22

D

Differentialgleichung 123, 125
Diffusion 19, 45

E

Einzelstoffbilanz 23, 101, 102, 121, 126
Element, chemisches 44
Energie
– innere 76
– kinetische 18
Energie, innere 18
Energiebilanz 16, 23, 101, 103, 121, 126
Energiedissipation 83
Energieerhaltung 17
Energieform 18
Energiewandlung 18
Erhaltungsgröße 18

Erhaltungssätze 17

F

Fehler 31, 124
Finite-Elemente-Methode 129
Finite-Volumen-Methode 128

G

Gesamtenergie 17
Gesamtmasse 17
Gesamtmassenbilanz 23, 101, 121, 126
Geschwindigkeit 19, 31
Gesetze, thermochemische 78
Gleichgewicht 20, 43, 48, 101, 103, 121
Gleichungssystem 123
Größe
– extensive 19
– intensive 19, 125
– molare 83
– spezifische 83

I

Impulsbilanz 126
Impulserhaltung 17, 29

K

Kinetik 20, 43
Koeffizienten, stöchiometrische 46
Kontinuitätsgleichung →
Gesamtmassenbilanz
Konzentration 45
Kopplung 20

L

Lattice-Boltzmann-Methode 129

M

Masse, molare 45
Massenerhaltung 17
Massenstrom 19
Maßstabsübertragung 120
Mischung 124

N

Nichtlinearität 20

O

Ökobilanz 16

P

Parameter 26
Partialdruck 45
Partikelzahl 49
PFR 22, 49
Phasenübergang 43, 83
Prozesssimulation 44, 119

R

Randbedingungen 127
Reaktion
– endotherme 84
– exotherme 84
Reaktion, chemische 43
Reaktionsgeschwindigkeit 46, 84
Reibung, viskose 19
Rührkessel
– idealer diskontinuierlicher → BR
– idealer kontinuierlicher → CSTR

S

Simulation
– dynamische 123
– statische 123
Smoothed-Particle-Hydrodynamics 130
Speicherterm 19, 31, 126
Spezies, chemische 17, 45
Stationarität 19, 21, 31

Stoffmenge 45
Strömung 17
Strömungsrrohr, ideales → PFR
Strömungssimulation 120
Systeme, disperse 23

T

Teilmassen 17
Temperatur 75, 101, 125
Thermodynamik 30, 45, 101, 103, 122
– erster Hauptsatz der 76
Transport
– konvektiver 19, 45, 78, 126
– molekularer 19, 45, 80, 126
Transportgröße 21, 125
Turbulenzmodell 127

U

Umsatz 43, 101
Umsatzvariable 20, 48

V

Verlustwärmestrom 80
Verweilzeit 24
Volumenstrom 29, 31
Vorgehen 23, 31, 45, 78
Vorzeichen 81

W

Wärme, latente 83
Wärmedurchgang 82
Wärmeenergie 77
Wärmeleitung 19, 80
Wärmestrahlung 20
Wandlung 18, 20, 47, 83, 126

Z

Zeitgesetz 47
Zonenmodell 24
Zustandsgleichung 103
Zustrom 19, 31