

Dieter Mewes

Beispiele aus der Verfahrenstechnik zum Erläutern des Kausalitätsbegriffs

Ingenieure, Chemiker, Physiker und Biologen, die mit dem Lösen verfahrenstechnischer Aufgaben betraut sind, stellen neue Produkte durch chemische, physikalische oder biologische Umwandlungsprozesse her. Die eingesetzten Arbeitsmethoden basieren auf den Grundgesetzen der Naturwissenschaften, welche zum Erkennen kausaler Zusammenhänge genutzt werden. Auf diese Weise lassen sich zwischen den in der Praxis vorliegenden Parametern unter Anwendung einer mehr oder weniger detaillierten Modellbildung vielfältige Zusammenhänge formulieren. Sie führen produktspezifisch zur Entwicklung neuartiger Prozesse und zu geeignet dimensionierten Anlagen. Letztere werden gebaut und betrieben. Häufig bestehen die Anlagen aus einer Vielzahl von Apparaten, welche je nach den in ihnen ablaufenden Umwandlungsprozessen und den verarbeiteten Stoffen neu entwickelt, in jedem Falle jedoch dimensioniert werden müssen. Die Produkte selbst können fest, flüssig oder gasförmig bzw. je nach Phase in partikelförmiger oder in kontinuierlicher Form vorliegen. Beispiele hierfür sind fast alle Dinge, mit denen wir im täglichen Leben in Berührung kommen, und die es uns ermöglichen, ein an unsere Umgebung angepasstes Leben zu führen:

- Nahrungsmittel, Pharmazeutika, Textilien, Kosmetika
- Kraftstoffe, petrochemische Produkte
- Düngemittel, Lacke, Baustoffe
- v. a. m.

Im Folgenden sollen einige vom Ingenieur in den Arbeitsgebieten

- Forschung und Entwicklung,
- Dimensionierung und Bau von Anlagen und
- Betrieb von Anlagen

eingesetzte Arbeitsmethoden, welche durch das Anwenden kausaler Zusammenhänge gekennzeichnet sind, erläutert werden. Hierzu dienen drei ausgewählte Beispiele. Diese betreffen das Erarbeiten neuer physikalischer Grundlagen zum Vorhersagen des Misch-

prozesses in chemischen Reaktoren zum Zwecke der Maßstabsvergrößerung, das Dimensionieren von Blasensäulen sowie die Analyse einer Betriebsstörung im Ablauf der Produktion von Siliziumtetrachlorid.

1 Visualisieren des Mischprozesses zum Zwecke der Maßstabsvergrößerung chemischer Reaktoren

In der chemischen Industrie stellen Mischvorgänge, die besonders häufig chemischen Reaktionen vorangehen, einen zentralen Verfahrensschritt der meisten Prozesse dar. Sie werden in der Mehrzahl der Fälle in Behältern durchgeführt, die mit mechanisch bewegten Rührern unterschiedlicher Form ausgerüstet sind. Um darin chemische Reaktionen ablaufen zu lassen, ist es notwendig, die eingesetzten Stoffe nicht nur makroskopisch durch Segregation, sondern möglichst rasch miteinander so zu vermischen, dass auch im molekularen Ortsmaßstab keine Unterschiede der Konzentrationen mehr feststellbar sind. Erfolgt die Vermischung zu langsam, so kann dies das unerwünschte Entstehen von Nebenprodukten zur Folge haben.

Derartige Reaktionsabläufe lassen sich mit einer Modellvorstellung vorhersagen, welche die kausalen Zusammenhänge zwischen den im makroskopischen Ortsmaßstab beobachtbaren und messbaren physikalischen Parametern mit den im mikroskopischen, das heißt im molekularen Ortsmaßstab ablaufenden Zusammenhängen korreliert. Wobei letztere nur indirekt der Messung zugänglich sind.

Das Mischen läuft im Rührgefäß in zwei Stufen ab, die man als Makro- und Mikro-mischen bezeichnet. Für laminare Strömungsfelder ist dieser Vorgang schematisch in Abbildung 1 dargestellt.

Während des konvektiven Transports formen die zu vermischenden Stoffe im Behälter zunächst einzelne Lamellen mit einheitlichen Konzentrationen, die den Ausgangswerten entsprechen. Man bezeichnet diesen Vorgang als Segregation. Die Lamellen werden mit zunehmender Mischdauer immer dünner und länger, bis ihre Dickenabmessungen so gering werden, dass die Diffusion zwischen den Lamellen zum Konzentrationsausgleich mit der Umgebung führt. Dann spricht man vom Mikromischen.

Um auf experimentellem Wege die Makro- und die Mikrovermischung auf getrennten Wegen zu visualisieren, wird in das Rührgefäß die geringe Menge einer Mischung aus zwei Farbstoffen eingebracht: ein inerte Farbstoff und einer, der sich im Verlauf des Mischvorgangs durch eine chemische Reaktion entfärbt. Die Makromischzeit ist die Zeit,

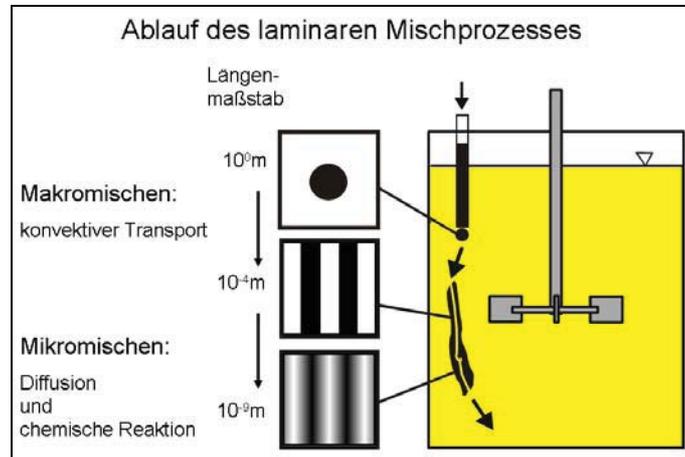


Abbildung 1

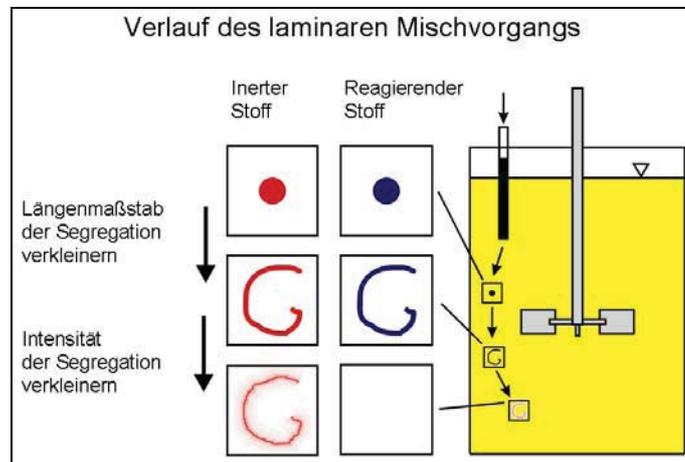
Schematische Darstellung des Ablaufs der Vermischung im laminaren Strömungsfeld

in der sich der inerte Farbstoff gleichmäßig im Behälter verteilt. Sie bewertet nicht die molekulare Vermischung zwischen vorgelegter und eingebrachter Komponente. Hierzu dient das mikroskopische Mischgütemaß als das Verhältnis aus den Konzentrationen des noch vorhandenen und sich entfärbenden Farbstoffs zu denjenigen des ursprünglich vorhandenen Farbstoffs. Die beiden Mischzeiten werden simultan mit Hilfe der tomographischen Zweiwellenlängenphotometrie gemessen. Sie ermöglicht es, gleichzeitig die räumlichen Konzentrationsfelder der beiden Farbstoffe zu messen.

Der kausale Zusammenhang zwischen der gemessenen Konzentration einer auf molekulaem Ortsmaßstab vermischten inerten Farbkomponente und der auf dem gleichen Ortsmaßstab mit dem gleichen Mechanismus vermischten reagierenden Komponente, dient zum Quantifizieren der durch die chemische Reaktion infolge Mikromischens verschwundenen Komponente mit Hilfe des Deviationsgrades.

Der Verlauf des laminaren Vermischens und sein Einfluss auf inerte und reagierende Stoffe sind schematisch in Abbildung 2 dargestellt.

Im ersten Schritt des Vermischens wird der Längenmaßstab der Segregation, das heißt die Lamellendicke, durch Strecken und Falten der eingebrachten Fluidelemente herabgesetzt. Zusätzlich tritt Diffusion auf, deren Einfluss allerdings aufgrund des großen Längenmaßstabs der Segregation sehr gering ist. Darum verändert sich die Intensität der Segregation nur geringfügig, das heißt es findet kaum Mikromischung statt. Eine Entfärbungsreaktion kann somit nicht ablaufen, da hierfür die molekulare Vermischung erforder-



Visualisieren der Mikro- und Makrovermischung durch Einbringen einer Mischung aus einem inerten und einem sich entfärbenden Farbstoff in den Behälter

derlich ist. Wenn der Längenmaßstab der Segregation weiter abnimmt, bewirken die großen Konzentrationsgradienten den Stofftransport durch Diffusion. Dieser zweite Schritt führt zur Intensitätsabnahme des reagierenden Farbstoffes, wohingegen der inerte Farbstoff aus makroskopischer Sicht unverändert bleibt. Nach dem abgeschlossenen Mikromischvorgang verbleibt nur der inerte Farbstoff. Das lokale Konzentrationsverhältnis des reagierenden Farbstoffes zum inerten Farbstoff ist somit ein Maß für die lokale Intensität der Segregation.

In Abbildung 3 ist die Farbstoffverteilung in Abhängigkeit der Mikromischgüte für eine Lamelle aus einem inerten roten und einem sich entfärbenden blauen Farbstoff dargestellt. Bereiche, in denen beide Farbstoffe vorliegen, erscheinen schwarz. Da in dem linken Bereich der Lamelle der reagierende Farbstoff noch nicht abgebaut ist, ist dieser Bereich noch nicht mikrovermischt. Es hat also noch kein molekularer Ausgleich zwischen der Lamelle und der umgebenden Flüssigkeit stattgefunden. Der mittlere Bereich der Lamelle enthält noch reagierenden Farbstoff, obwohl bereits ein Teil abgebaut und eine Rottfärbung zu erkennen ist. Es hat also zum Teil ein molekularer Ausgleich stattgefunden. Der rechte Teil der Lamelle enthält dagegen überhaupt keinen reagierenden Farbstoff mehr und ist somit völlig mikrovermischt.

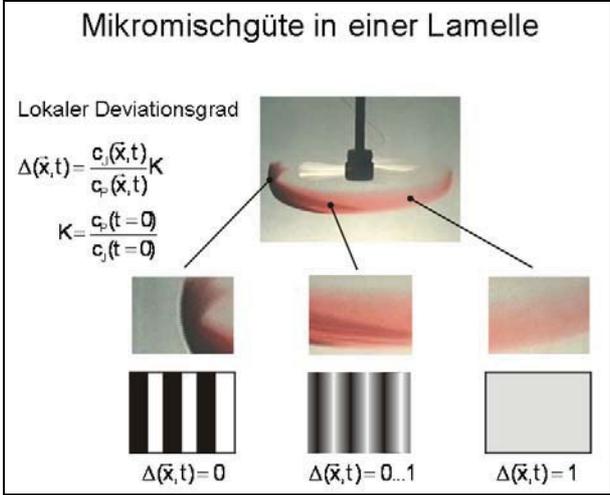


Abbildung 3
Farbstoffverteilung in Abhängigkeit der Mikromischgüte für eine Lamelle aus einem roten und einem blauen Farbstoff

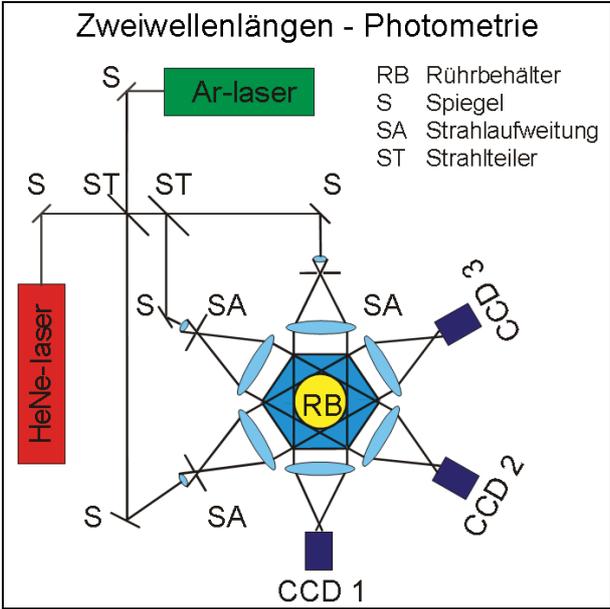


Abbildung 4
Optischer Aufbau für die tomographischen Zweiwellenlängenphotometrie

Der optische Aufbau für die tomographische Zweiwellenlängenphotometrie ist in Abbildung 4 dargestellt. Die Strahlen eines Argon-Ionen-Lasers mit der Wellenlänge 514 nm und eines Helium-Neon-Lasers mit der Wellenlänge 632 nm werden in einem Strahlteiler überlagert und mit einem zweiten Strahlteiler in drei überlagerte Strahlen aufgeteilt. Die drei Strahlen werden auf den Durchmesser 150 mm aufgeweitet und dienen zum Durchstrahlen des Rührgefäßes. Sie werden nach ihrem Austritt aus dem Rührgefäß mit Hilfe von Konvexlinsen auf drei CCD-Kameras fokussiert und erzeugen dort Abbildungen der Konzentrationsfelder.

Das Vermischen der Farbstoffe verläuft im Rührgefäß so schnell, dass für die tomographische Rekonstruktion alle Projektionen gleichzeitig aufgenommen werden müssen. Diese Forderung begrenzt die Anzahl der Projektionen. Es werden daher nur drei Kameras verwendet, deren Bilder simultan von einem Computer digitalisiert und gespeichert werden.

Die Berechnung der dreidimensionalen Konzentrationsfelder erfolgt aus den entlang der Teilstrahlen gemessenen Stoffmengen mit Hilfe eines erprobten Rekonstruktionsverfahrens. Hierfür wird das Gefäß entsprechend der Anzahl der Teilstrahlen in 30 Ebenen und jede Ebene wiederum in 1220 prismenförmige Elemente mit der Seitenlänge von 3 mm unterteilt. Die Konzentration in jedem der so entstandenen 36.600 Elemente wird berechnet. Die berechneten Konzentrationsprofile des inerten Farbstoffs und der Deviationsgrad als Maß der Vermischung sind in Abbildung 5 dargestellt.

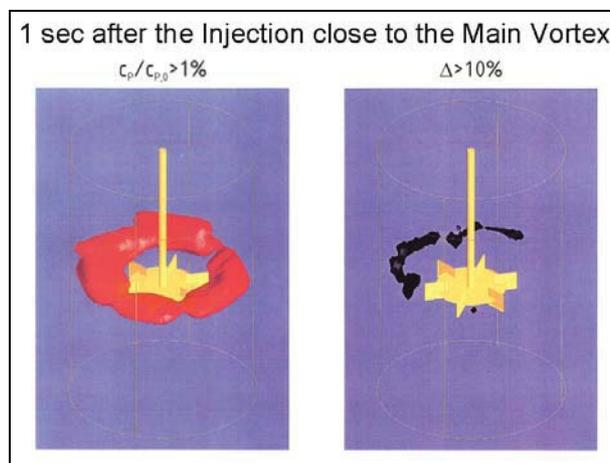


Abbildung 5
Verteilung von inertem Farbstoff und Deviationsgrad nach Zugabe an den Rührerblättern

Nach einer Sekunde ist der in Form eines Tropfens zugegebene flüssige Farbstoff ein-dimensional längs des Hauptwirbels gedehnt. Zunächst ist der Längenmaßstab der Segregation noch groß. Daraus resultieren sein langsamer diffusiver Ausgleich mit der Umgebung und ein hoher Deviationsgrad in einem Großteil des Tropfens. Nach drei Sekunden ist ein Teil des Farbstoffes noch in der Nähe seiner ursprünglichen Position. Der andere Teil wird bereits durch den Rührer transportiert. Die Farbstoffwolke erhält eine schlauchförmige Form, die sich aufgrund der Scherung ergibt.

2 Dimensionieren einer Blasensäule und Voraussage von deren Wirksamkeit für den Stoffaustausch

Blasensäulen werden in der chemischen Industrie für zahlreiche Prozesse verwendet. Es handelt sich um zylindrische, von einer Flüssigkeit durchströmte Apparate, in deren Sumpfquerschnitt eine Gasphase in Form von Einzelblasen dispergiert wird. Die entstehenden Blasen steigen als Blasenschwarm infolge der im Schwerfeld wirksamen Auftriebskräfte auf. Im Kopfquerschnitt der Blasensäulen entsteht durch die Koaleszenz der Blasen eine zusammenhängende Phasengrenze der in kontinuierlicher Form strömenden flüssigen Phase. Die Gasphase entweicht während die flüssige Phase je nach Phasenföhrung aus Kontinuitätsgründen abwärts strömt. Das resultierende Strömungsfeld der Flüssigkeit ist dreidimensional und zeitlich veränderlich. Für Volumenstromdichten des Gases unter ca. 10 cm/s ist die homogene Strömungsform zu beobachten. Die Blasen besitzen einen nahezu einheitlichen Durchmesser und die Wechselwirkungen zwischen den Blasen sind gering. Für größere Volumenstromdichten des Gases treten starke Wechselwirkungen zwischen den Blasen auf, so dass ihre Größe durch Koaleszenz und Zerfall lokal variiert. Diese heterogene Strömungsform ist durch vom Strömungsfeld abhängige Verteilungen der Blasengrößen gekennzeichnet. Ein großer Anteil des Gases wird in Form von so genannten Großblasen transportiert. Die Verweilzeit dieser Blasen ist kürzer als die Verweilzeit der kleineren Blasen.

Für viele technische Anwendungen ist neben der Gasphase ein partikelförmiger Feststoff in der Flüssigkeit suspendiert. Er hat häufig die Funktion eines Katalysators. Dies bedeutet, dass an der festen Oberfläche eine heterogene chemische Reaktion abläuft. Durch die Partikeln werden die Phasenverteilung und die Geschwindigkeitsfelder beeinflusst, so dass der Umsatz heterogen katalysierter Reaktionen in dreiphasig betriebenen Blasensäulen neben dem Strömungsfeld von der Verteilung des Feststoffs und der sich einstellenden Phasengrenzfläche abhängig ist.

Das Dimensionieren von Blasensäulen erfolgt bislang mit Hilfe empirischer Gleichungen auf der Basis experimenteller Ergebnisse, die an Anlagen im Labormaßstab ermittelt sind. Der Gültigkeitsbereich dieser Korrelationen ist durch die Wahl des Stoffsystems, die Abmessungen der Versuchsanlage und die experimentell variierten Parameter begrenzt. Insbesondere ist die Übertragung vom Labor- in den technischen Maßstab nur unvollkommen möglich, da die Strömungsfelder und die Rückvermischung der Phasen von den Abmessungen des Reaktors beeinflusst werden.

Ziel experimenteller und theoretischer Arbeiten ist es, die Geschwindigkeits- und Konzentrationsfelder in zwei- und dreiphasig betriebenen Blasensäulen auf der Grundlage der vorliegenden Beobachtungen und Messungen mit Hilfe von Bilanzgleichungen und Stoffgesetzen auf numerischem Wege zu berechnen. Dazu liegen aus Experimenten zahlreiche Beobachtungen vor. Diese besagen, dass die Phasenverteilungen in drei- und zweiphasig betriebenen Blasensäulen eine große Übereinstimmung aufweisen. Mit Hilfe der Ultraschalltomographie gemessene Phasenverteilungen und Strömungsfelder werden durch die in Abbildung 6 schematisch dargestellte Skizze wiedergegeben.

Die Gasblasen steigen als Blasenschwamm vorrangig in der Säulenmitte auf. Im Zentrum des Schwarms und im Wandbereich der Blasensäule sind die Volumenanteile des Feststoffs gering. Dagegen wird in den Randbereichen des Blasenschwarms der Feststoff aufwärts transportiert. Die Flüssigkeit strömt im Bereich des Blasenschwarms aufwärts und im Wandbereich abwärts.

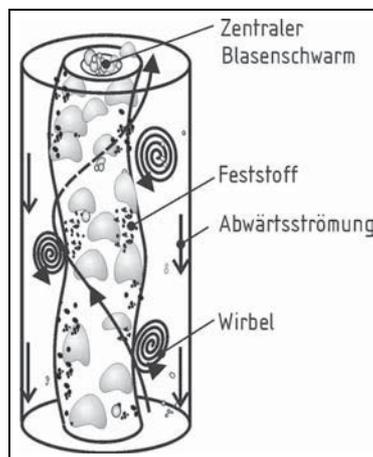


Abbildung 6
Phasenverteilung und Strömungsfeld in einer dreiphasig betriebenen Blasensäule

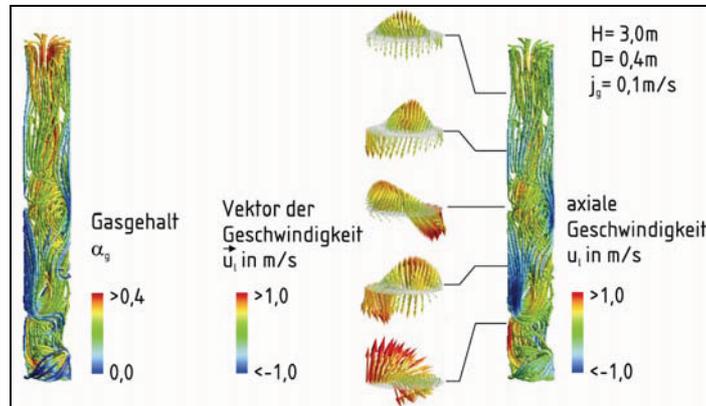


Abbildung 7
Berechnetes Geschwindigkeitsfeld der Flüssigkeit und Volumenanteil des Gases

Für eine Blasenensäule mit 0,4 m Durchmesser und 3,0 m Höhe ist in Abbildung 7 das berechnete Strömungsfeld in Form der Stromlinien und des Vektorfeldes für einzelne Querschnitte zu einer beliebig gewählten Zeit dargestellt. Die Volumenstromdichte des Gases beträgt 0,1 m/s, so dass sich die heterogene Strömungsform einstellt.

Das Geschwindigkeitsfeld der Flüssigkeit ist durch Stromlinien dargestellt. Es ist durch großräumige Wirbel gekennzeichnet, deren Abmessungen denen des Säulendurchmessers entsprechen. Für eine unter Umgebungsdruck mit Wasser und Luft betriebene Blasenensäule von 3 m Höhe ist entsprechend dem idealen Gasgesetz eine Verringerung der Gasdichte vom Sumpf- zum Kopfquerschnitt um 23 % zu erwarten. Dadurch wird der Volumenanteil des Gases erhöht und der Blasendurchmesser vergrößert.

Die Blasen steigen bevorzugt in der Säulenmitte auf, so dass in der Nähe der Säulenwand nur geringe Gasgehalte berechnet werden. Das Strömungsfeld wird durch den aufsteigenden Blasenschwarm induziert. Dementsprechend werden große axiale Geschwindigkeiten der Flüssigkeit in Bereichen hoher Gasgehalte berechnet. Die Flüssigkeit strömt in den Bereichen geringer Gasgehalte, also überwiegend im Bereich der Säulenwand, abwärts. Die Vektoren der Flüssigkeitsgeschwindigkeit sind für einzelne Querschnittsebenen dargestellt. In radialer Richtung bilden sich Gradienten der axialen Flüssigkeitsgeschwindigkeit aus. Die Beträge der Geschwindigkeitskomponenten sind in Umfangsrichtung geringer als diejenigen in axialer Richtung.

In Abbildung 8 sind die spezifischen Phasengrenzflächen beider Blasenfraktionen dargestellt.

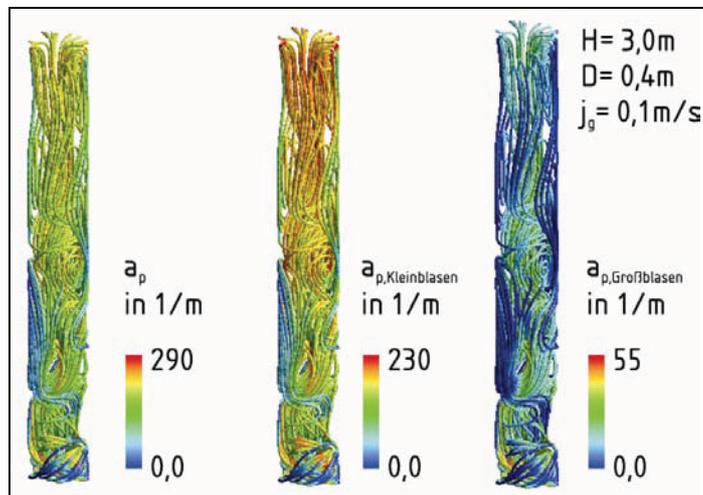


Abbildung 8
Berechnete spezifische Phasengrenzfläche

Die aus den spezifischen Phasengrenzflächen beider Blasenfraktionen resultierende mittlere spezifische Phasengrenzfläche ist besonders in der Säulenmitte groß. In den Randbereichen werden nur kleine spezifische Phasengrenzflächen erhalten. Die spezifische Phasengrenzfläche der Kleinblasen nimmt mit der Säulenhöhe zu. Die Ursache liegt in der Verringerung des hydrostatischen Drucks und der dadurch bewirkten Vergrößerung der Blasen. Das Entstehen von Großblasen erfolgt in Bereichen hohen Gasgehalts, so dass für die entsprechende Gasphase eine Erhöhung der spezifischen Phasengrenzfläche vor allem im Bereich der Säulenmitte berechnet wird. In den wandnahen Bereichen liegen keine Großblasen vor. Für das berechnete Strömungsfeld wird der Großteil der Phasengrenzfläche durch die Kleinblasen gebildet.

In Abbildung 9 sind die Strömungsfelder für feststoffhaltige Flüssigkeiten dargestellt. Das Strömungsfeld der Flüssigkeit ist wie für die zweiphasigen Gas-Flüssigkeits-Strömungen von großräumigen Flüssigkeitswirbeln gekennzeichnet. Die Stromlinien des Feststoffs verlaufen nahezu identisch mit denen der Flüssigkeit.

Der Volumenanteil des Feststoffs ist in der Nähe der Säulenwand höher als in der Säulenmitte. Mit zunehmender axialer Koordinate nehmen die Volumenanteile des Feststoffs und des Gases ab.

Als Beispiel für die industrielle Anwendung einer heterogenen chemischen Reaktion wird die Hydrierung von Anthrachinon zu Hydroanthrachinon in Gegenwart eines Palladium-Katalysators gewählt. Diese Reaktion stellt einen Teilschritt beim Herstellen von Wasserstoffperoxid dar.

In Abbildung 10 ist der Reaktionsweg zur Synthese von Wasserstoffperoxid schematisch dargestellt.

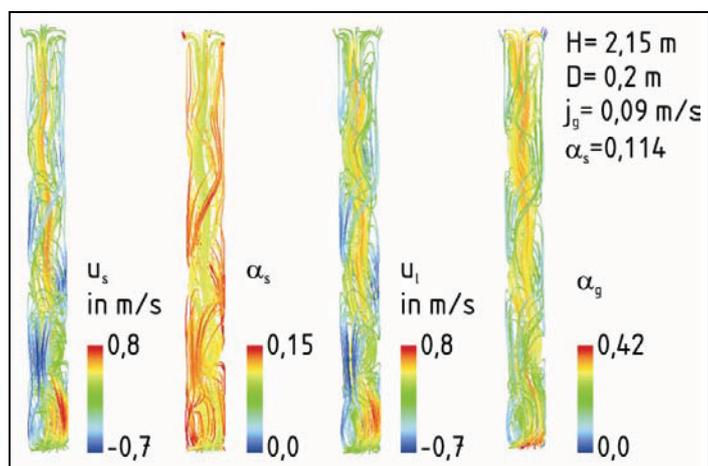


Abbildung 9
Berechnete momentane Strömungsfelder des Feststoffs und der Flüssigkeit

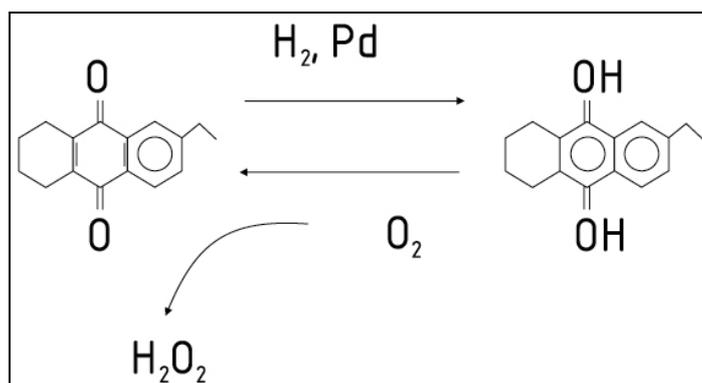


Abbildung 10
Reaktionsablauf zur Herstellung von Wasserstoffperoxid

Für die industrielle Durchführung der Hydrierung sind unterschiedliche Verfahren möglich, die sich hinsichtlich der Anthrachinone, der Lösungsmittel und der Katalysatoren unterscheiden. Am häufigsten wird dabei ein Anthrachinon-Gemisch verwendet, das zu etwa 30 Mol % aus Ethylanthrachinon und zu 70 Mol % aus 2-Ethyl-Tetrahydroanthrachinon besteht. Als Katalysatoren werden entweder Raney-Nickel oder Palladium verwendet. Die Reaktionskinetik ist für beide Anthrachinonkomponenten nahezu gleich, so dass für die Berechnung von einer Anthrachinonkomponente ausgegangen werden kann.

Für Wasserstoff liegt in Gegenwart des Palladium-Katalysators eine Reaktion für Wasserstoff von nullter Ordnung und für Anthrachinon von erster Ordnung vor.

Die Hydrierung kann in Blasensäulenreaktoren unter Umgebungsdruck und für Temperaturen zwischen 18°C und 62°C am Palladium-Katalysator stattfinden. Der Katalysator besteht aus mit Palladium beschichteten Aluminiumpartikeln.

Für die Berechnungen werden die flüssige, die partikelförmige feste und die gasförmige Phase im Gleichstrom geführt. Alle drei Phasen werden gleichmäßig über den Sumpfqerschnitt der Säule eingespeist.

Für eine Blasensäule mit 4 m Höhe und 0,4 m Durchmesser ist das berechnete Strömungsfeld in Abbildung 11 dargestellt.

Durch die Absorption und die nachfolgende chemische Reaktion nimmt der Massenanteil des in der Flüssigkeit gelösten Wasserstoffs nur wenig mit der axialen Koordinate zu. Der Massenanteil des flüssigen Reaktanden (THEAQ) wird vom Sumpf- zum Kopfquer-

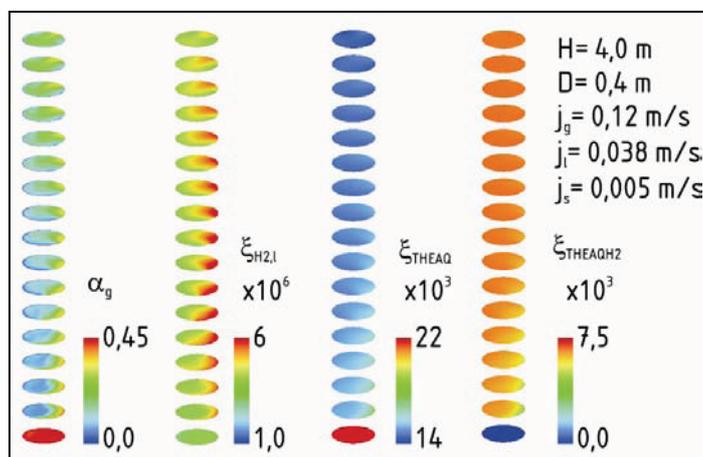


Abbildung 11
Gasgehalt und Massenanteile der Edukte und Produkte

schnitt stark verringert. Dementsprechend nimmt der Massenanteil des Produkts (THEAQH₂) zu. Im Kopfquerschnitt sind 36 % des flüssigen Edukts umgesetzt. Die axiale Durchmischung der flüssigen Phase bewirkt, dass für die gegebenen Betriebsbedingungen nur geringe räumliche Gradienten der Massenanteile auftreten.

Im Rahmen der dargestellten Ergebnisse werden Populationsbilanzen für die disperse Phase zur Beschreibung der Blasengrößenverteilung in Form der Transportgleichungen mit den strömungsmechanischen Gleichungen eines Euler-Modells gekoppelt, um damit die instationären, dreidimensionalen Konzentrations- und Geschwindigkeitsfelder unter Berücksichtigung des Stoffaustauschs und der chemischen Reaktion zu berechnen. Damit sind erstmalig Stofftransportvorgänge in Abhängigkeit lokaler Blasengrößenverteilungen berücksichtigt, wobei gleichzeitig dreiphasige Strömungen auf theoretisch numerischem Wege vorhergesagt werden

3 Schadensanalyse für einen Kondensator zum Verflüssigen von Siliziumtetrachlorid

Die Aufgaben des im Betrieb tätigen Verfahreningenieurs sind sehr vielfältig. Auf dem Gebiet der Analyse von Betriebsstörungen ist er gezwungen, neue, für ihn bisher unbekannte kausale Zusammenhänge zwischen Ursache und Wirkung herzustellen. Hierbei ist es erforderlich, sowohl ingenieurwissenschaftliche Grundlagen als auch das gewonnene Erfahrungswissen zu den verarbeiteten Produkten und zum betriebenen Prozess einfließen zu lassen. Dies soll am Beispiel eines durch Korrosion beschädigten Rohrbündelkondensators erläutert werden.

Er dient zum Verflüssigen von Siliziumtetrachlorid und besteht aus einem Rohrbündel, welches in einen zylindrischen Mantel eingebaut ist. Die Rohre werden von Wasserstoff und dampfförmigem Siliziumtetrachlorid durchströmt. Im Mantelraum befindet sich Ethylenglykol, welches die Rohre auf etwa -20°C kühlt. Dadurch verflüssigt sich das Siliziumtetrachlorid im unteren Teil des Rohrbündels, während durch die darüber liegenden Rohre der gasförmige Wasserstoff strömt.

In dem beschädigten und in Abbildung 12 dargestellten Apparat haben Risse in den Rohren zum Eintritt von Ethylenglykol in den Rohrrinnenraum geführt. Die dort abgelaufene chemische Reaktion hat weißes Siliziumdioxid entstehen lassen, welches sich als weiße Kruste ablagert und die Rohre verstopft. Der vom Ingenieur erkannte kausale Zusammenhang zwischen der Ursache für die chemische Reaktion und dem im Betriebsablauf festgestellten Versagen des Apparates führt sofort zur Frage nach dem kausalen Zusammen-



Abbildung 12
Blick auf den Rohrboden eines beschädigten Kondensators.

hang zwischen der noch unbekanntem Ursache und der beobachteten Rissbildung an den Rohren. Hierzu sind Kenntnisse über das Korrosions- und Festigkeitsverhalten der eingesetzten Werkstoffe, die konstruktive Gestaltung der Verbindung zwischen Rohrboden und Rohrbündel sowie die fertigungstechnische Verarbeitung beim Herstellen der zuletzt genannten Verbindung notwendig. Sie führten im vorliegenden Falle zu einer geänderten konstruktiven Gestaltung der Verbindung der einzelnen Rohre mit dem Rohrboden.

4 Zusammenfassung

Der Verfahreningenieur bedient sich während seiner täglichen Arbeit in allen Bereichen der Prozesstechnik Arbeitsmethoden, welche durch die Kausalität als Beziehung zwischen Wirkungen aus vorgegebenen Ursachen gekennzeichnet sind. Sie befähigen ihn, wissenschaftliche Grundlagen für die Vorhersage von Ereignissen beim Entwickeln und Projektieren sowie im umgekehrten Sinne Schadensfälle aufzuklären. Letztere sind stets der Anlass für Verfahrensverbesserungen und zum Senken von Betriebskosten.