



Karl Stephan

Forschung auf dem Gebiet der Thermischen Verfahrenstechnik

(Vortrag in der Sitzung der Technikwissenschaftlichen Klasse am 23. Juni 1995)

In: Berichte und Abhandlungen / Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften
(vormals Preußische Akademie der Wissenschaften) ; 2.1996, S. 89-105

Persistent Identifier: [urn:nbn:de:kobv:b4-opus-29375](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:kobv:b4-opus-29375)

Die vorliegende Datei wird Ihnen von der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften unter einer Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (cc by-nc-sa 4.0) Licence zur Verfügung gestellt.



Karl Stephan

Forschung auf dem Gebiet der Thermischen Verfahrenstechnik

(Vortrag in der Sitzung der Technikwissenschaftlichen Klasse am 23. Juni 1995)

Die folgenden Ausführungen sollen einen Einblick in die Ziele der Forschung auf dem Gebiet der Thermischen Verfahrenstechnik geben und an ausgewählten Beispielen die Arbeitsweise erläutern. Als Beispiele sind Themen aus den Forschungsarbeiten des Instituts des Verfassers gewählt, des Instituts für Technische Thermodynamik und Thermische Verfahrenstechnik (ITT) an der Universität Stuttgart.

Zuvor einige Bemerkungen über dieses Institut und die Verfahrenstechnik an der Universität Stuttgart.

Verfahrenstechnik wird in Stuttgart seit 1953 gelehrt, zunächst als Vertiefungsrichtung innerhalb des Maschinenwesens, dann ab 1970 als eigene Fakultät, die mittlerweile aus 10 Instituten besteht. Zur Fakultät gehören 18 Professoren (davon 10 C4 und 8 C3). Die Studentenzahl liegt derzeit bei 584. Dazu kommen 230 Kybernetiker, also insgesamt 814 Studenten. Sie ist seit drei Jahren wie in allen anderen Universitäten stark rückläufig.

Das ITT ist eines der ältesten Institute der Verfahrenstechnik. Es wurde 1961 als Institut für Technische Thermodynamik gegründet. 1966 wurde das Institut umbenannt und führt seither auch die Thermische Verfahrenstechnik in seinem Namen. Institutsleiter war von 1961 bis 1975 Prof. Dr.-Ing. H. Glaser, seit 1975 ist es der Verfasser.

1 Forschungsgebiete der Thermischen Verfahrenstechnik

Verfahrenstechnik ist Stoffumwandlungstechnik, Thermische Verfahrenstechnik die Technik der Stoffumwandlung mittels thermischer Energie. Aufgabe der Verfahrenstechnik ist es, Verfahren zu entwickeln, die eine Änderung der inneren Struktur und/oder der physikalischen Eigenschaften der

behandelten Stoffe zum Ziel haben. Geschieht diese Änderung durch Einsatz von thermischer Energie, so spricht man von Thermischer Verfahrenstechnik. Klassische Vorgänge sind das Eindampfen, Destillieren, Rektifizieren oder Kondensieren, aber auch das Kristallisieren, Schmelzen und Erstarren. Industrien, die weitgehend auf Verfahren der Thermischen Verfahrenstechnik angewiesen sind, sind die chemische Industrie, die Erdölraffinerien, die Lebensmitteltechnik, die pharmazeutische Industrie, aber auch die Eisenhütten-technik, die Energietechnik und viele andere mehr.

Rund 50% unseres Industrieumsatzes entfallen auf die Verfahrenstechnik, der größte Teil davon wiederum auf die Thermische Verfahrenstechnik.

Aus dem Begriff „Thermische Verfahrenstechnik“, also Stoffumwandlung durch thermische Energie, erhellt sogleich, daß die Wärmetechnik, und somit die Thermodynamik sowie die Wärme- und die Stoffübertragung von entscheidender Bedeutung für die Thermische Verfahrenstechnik sind.

Aufgabe eines Hochschulinstituts in der Forschung sollte es sein, die methodischen Grundlagen des Faches zu verbessern. Um zu klären, was diese noch sehr allgemeine Aussage für die Technische Thermodynamik und die Thermische Verfahrenstechnik bedeutet, orientieren wir uns an der Aufgabe, die dem Verfahreningenieur gestellt ist. Stets handelt es sich in einem verfahrenstechnischen Prozeß darum, ein Produkt mit bestimmten Eigenschaften herzustellen. Der Weg dahin ist in dem folgenden Schema dargestellt, Abb. 1.

Zur Herstellung eines bestimmten Produktes mit vorgegebenen Eigenschaften, beispielsweise eines Arznei- oder eines Nahrungsmittels, dient im allgemeinen ein aus vielen technischen Aggregaten bestehender Prozeß. Wir sprechen von einem vernetzten Prozeß. Ziel der Forschung ist es, diesen durch Rechenmodelle zu beschreiben, mit deren Hilfe Anlagen geplant und entworfen werden und dann der Prozeßablauf kontrolliert wird. Mit der Modellierung derartiger vernetzter Prozesse beschäftigt sich seit mehreren Jahren die Forschergruppe DIVA an der Universität Stuttgart. Die Abkürzung DIVA steht für „Dynamische Simulation Verfahrenstechnischer Prozesse“.

Ein vernetzter Prozeß besteht wiederum aus vielen miteinander verschalteten Apparaten, in denen physikalische oder chemische Vorgänge ablaufen; Ziel der Forschung ist es, diese zu modellieren. Derartige Modelle sind Voraussetzung für die Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen den verschiedenartigen Apparaten, wie sie bei der Modellierung der vernetzten Prozesse untersucht werden.

Zur Modellierung der Prozesse in den Apparaten dient das Wissen, das die Grundlagen-Wissenschaften bereitstellen. Im Fall der Thermischen Verfah-

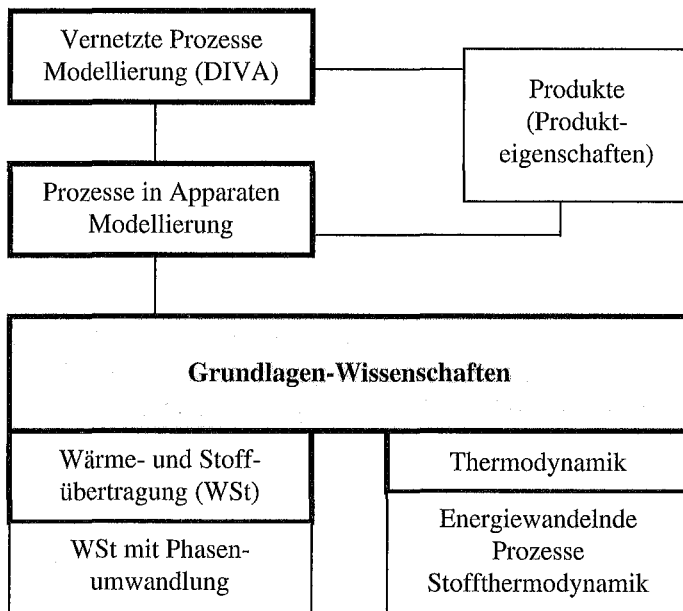


Abb. 1

Ebenen der Forschung auf dem Gebiet der Thermischen Verfahrenstechnik

renstechnik sind dies die Wärme- und Stoffübertragung und die Thermodynamik, wobei Phasenumwandlungen, energiewandelnde Prozesse und die Stoffthermodynamik eine herausragende Rolle spielen.

Zwischen den drei verschiedenen Ebenen, derjenigen der vernetzten Prozesse, der Prozesse in den Apparaten und derjenigen der Grundlagen-Wissenschaften, besteht natürlich eine enge Verknüpfung mit Rückkopplung. Forschungsbedarf besteht nun keineswegs nur auf der Ebene der Grundlagen-Wissenschaften, sondern ebenso auch auf den übrigen scheinbar mehr anwendungsorientierten Ebenen, wo es genau wie bei der Grundlagenforschung darum geht, methodische Grundlagen zu erarbeiten oder zu verbessern.

Dies soll im folgenden an einigen Beispielen aus den Forschungsarbeiten des ITT erläutert werden. Dabei geht es auch darum, an den Beispielen zu zeigen, wie die Forschung auf den mehr anwendungsorientierten Ebenen des Schemas die Grundlagenforschung bis hinunter zum molekularen Verhalten der Stoffe beeinflusst und umgekehrt. Wir bewegen uns dabei im Schema der Abb. 1 von oben nach unten.

2 Forschungsprojekte

2.1 Vernetzte Prozesse

Verfahrenstechnische Prozesse sind meistens stark vernetzt, laufen nichtlinear ab und sind rückgekoppelt. Als Beispiel für eine einfache Schaltung soll zuerst ein Prozeß erörtert werden, der in chemischen Fabriken zur Methanolsynthese dient und den wir unsere Studenten im Projektierungspraktikum einschließlich der Regeleinrichtungen entwerfen lassen, Abb. 2. Sie sammeln

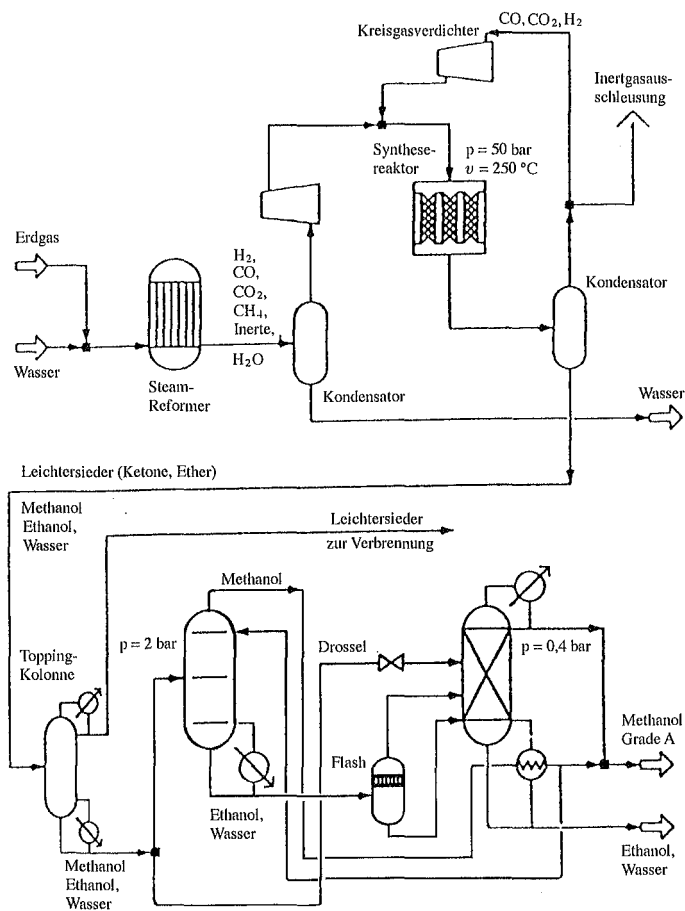


Abb. 2
Methanolsynthese

dann am Computer Erfahrungen mit dem Betrieb der Anlage und haben danach noch die Möglichkeit, eine wirkliche Anlage zu sehen und mit dem Betreiber zu diskutieren.

Methanol werde aus Erdgas (CH_4) und Wasser hergestellt. Produkte sind außer dem Methanol noch Ethanol und Wasser, aber auch Ketone und höherwertige Alkohole. Die Anlage enthält einen „Steam Reformer“, in dem bei Temperaturen von $860\text{ }^\circ\text{C}$ bis $880\text{ }^\circ\text{C}$ und Drücken zwischen 14 und 24 bar Wasserstoff erzeugt wird, gemäß $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{ H}_2$ und $\text{CH}_4 + 2\text{ H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 4\text{ H}_2$. Sie enthält weiter einen Synthesereaktor, in dem die eigentliche Methanolsynthese abläuft, gemäß $\text{CO} + 2\text{ H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}$ und $\text{CO}_2 + 3\text{ H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$ bei 90 bis 110 bar und 220 bis $280\text{ }^\circ\text{C}$ (Prozeß exotherm). Dabei entstehen außer Methanol und Wasser noch Ketone, Ether, Ethanol und höherwertige Alkohole, die man in den folgenden Stufen abtrennt. Man benötigt dazu mehrere Wärmeaustauscher, Kondensatoren, Verdampfer, Rektifizierkolonnen, Pumpen und Verdichter, die in komplizierter Weise aufeinander einwirken.

Welche Probleme sind nun Gegenstand der Forschung auf der Stufe der Modellierung solcher vernetzter Prozesse?

Im Vordergrund der Untersuchung stehen hier neben einer detaillierten Beschreibung des Verhaltens einzelner Apparate der Vergleich von Verfahrensvarianten, die Auswahl und günstige Verschaltung von Prozeßstufen, die Wärme- und Stoffintegration und die Sicherheitsanalyse. Wichtige Fragen der Prozeßführung betreffen die flexible Betriebsweise, das An- und Abfahren, die reproduzierbare Erzeugung bestimmter Produkteigenschaften, die Bestimmung optimaler Trajektorien von Chargenprozessen und nicht zuletzt die frühzeitige Erkennung von Fehlern und Gefahren. Die modellgestützten Prozeßführungs- und Prozeßüberwachungsstrategien finden hier vielfältige Anwendungsmöglichkeiten. Mit Trainingssimulatoren kann dem Betriebspersonal ein besseres Prozeßverständnis vermittelt werden. Auch der Umgang mit modernen Prozeßleitsystemen läßt sich mit diesen Simulatoren betriebsnah schulen.

Einem breiten Einsatz der Modellierung und Simulation in der industriellen Praxis stehen heute noch die unzureichende Effizienz und mangelnde Leistungsfähigkeit der verfügbaren Modellierungs- und Simulationswerkzeuge entgegen. Der überall in der Verfahrenstechnik sichtbare Modellierungsengpaß, der einerseits auf die Komplexität des Zusammenspiels der physikalisch-chemischen Teilvorgänge und andererseits auf die breite Vielfalt der Verfahrensschritte und Apparate zurückzuführen ist, läßt sich nur dann überwinden, wenn das verfahrenstechnische Basiswissen so strukturiert werden kann, daß sich der Modellierungsvorgang in seinen wesentlichen Schritten systematisieren

läßt. Dies ist die Grundvoraussetzung für eine rechnergestützte und wissenschaftsbasierte Modellierung des Verhaltens verfahrenstechnischer Prozesse.

Als Beispiel für einen vernetzten Prozeß, mit dem wir uns zusammen mit dem Zentrum für Sonnenenergie und Wasserstoffforschung Baden-Württemberg befassen, möchte ich den Prozeß der Methanol-Erzeugung aus dem CO_2 der Luft und Wasser besprechen. Der Prozeß sei hier nur in vereinfachter, dafür aber überschaubarer Version vorgestellt.

Die Atmosphäre ist bekanntermaßen ein riesiges Reservoir für CO_2 . Dieses absorbiert einen Teil der infraroten Strahlung, welche die Erde von der ankommenden hauptsächlich kurzwelligigen Sonneneinstrahlung wieder in das All zurückstrahlt. Man bezeichnet dies bekanntlich als Treibhauseffekt. Er wird heute arg verteufelt. Zunächst ist aber festzuhalten, daß wir ihm eine angenehme mittlere Temperatur auf der Erdoberfläche von etwas über 15°C verdanken. Gäbe es kein CO_2 (und keinen H_2O -Dampf und kein Methan) in der Atmosphäre, so müßten wir statt dessen eine mittlere Temperatur von -18°C in Kauf nehmen. Wir brauchen also CO_2 in der Atmosphäre. Nur: zuviel darf es nicht sein, weil sonst die Temperatur zu sehr ansteigt und zu wenig darf es auch nicht sein, sonst würde es zu kalt. Derzeit leben wir in einer Zeit der CO_2 -Zunahme. Angesichts dieses Sachverhaltes ist es sinnvoll, darüber nachzudenken, wie man den CO_2 -Anstieg bremsen kann. In dem Prozeß nach Abb. 3 wird der Atmosphäre nur soviel CO_2 zugeführt, wie ihr vorher entnommen wurde, so daß ein geschlossener CO_2 -Kreislauf ohne Nettoerzeugung von CO_2 entsteht.

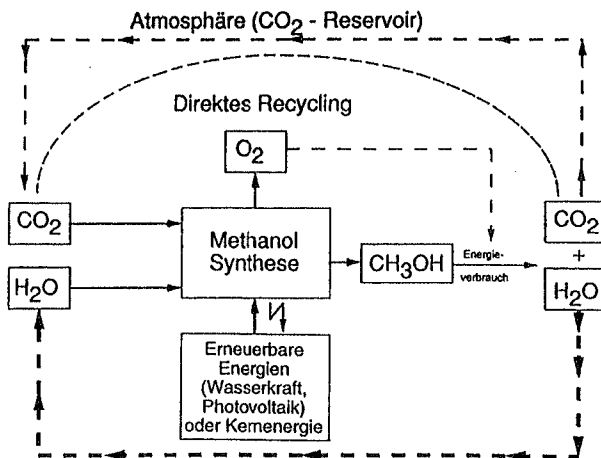


Abb. 3
Recycling von Kohlendioxid aus der Atmosphäre

Das CO_2 aus der Luft wird zusammen mit Wasser unter Energiezufuhr in Methanol und Sauerstoff verwandelt, aus denen bei der Verbrennung wieder CO_2 und O_2 entstehen. Zur Energiezufuhr kommen nur solche Energiearten in Frage, die nicht zum CO_2 -Anstieg der Atmosphäre beitragen, also Wasserkraft, Photovoltaik oder Kernenergie. Das Apparateschema zeigt Abb. 4.

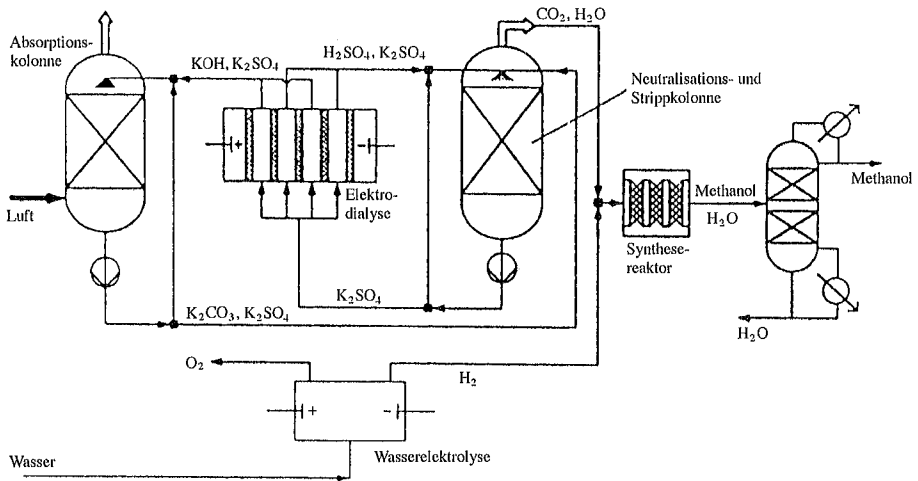
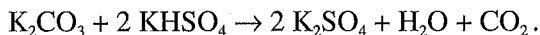


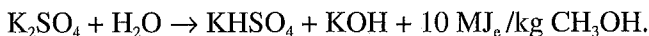
Abb. 4

Methanolsynthese aus atmosphärischem Kohlendioxid und Wasser

Das CO_2 aus der Luft wird in einer Füllkörperkolonne durch KOH -Lauge absorbiert. In 1 m^3 Luft sind etwa 300 mg CO_2 enthalten, d. h. um eine Tonne CO_2 zu absorbieren, muß man $1,55 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ Luft reinigen. Dies sollte bei Atmosphärendruck geschehen, da sonst die Kompressionsenergie zu groß würde. Eine Entfernung des CO_2 aus der KOH -Lösung durch Strippen mit Wasserdampf verbietet sich wegen der geringen gelösten CO_2 -Menge und dem dadurch bedingten geringen CO_2 -Partialdruck. Man bräuchte dann extrem große Wasserdampfmenngen und gleichzeitig hohe Temperaturen, damit der Sättigungsdruck des CO_2 im Dampf groß wird. Aus diesem Grund wird das CO_2 in einem Entgaser durch KHSO_4 , also chemisch entfernt, gemäß



Das K_2SO_4 wird in einer Elektrolyse regeneriert gemäß



(Die $10 \text{ MJ}_c/\text{kg}$ gelten unter Beachtung von Verlusten; für den reversiblen Prozeß benötigt man $5 \text{ MJ}_c/\text{kg}$).

Zur Erzeugung von Methanol nach diesem Prozeß benötigt man $40,5 \text{ MJ}_c/\text{kg}$ CH_3OH . Das entspricht bei einem Heizwert von $19,5 \text{ MJ}/\text{kg}$ CH_3OH einem Wirkungsgrad von 48%. Der entsprechende Wert für die Erzeugung von Flüssigwasserstoff beträgt 55%, allerdings ohne Berücksichtigung der Verdampfungsraten bei der Lagerung, die bei Methanol entfallen, da man es bei Umgebungstemperatur lagern kann.

2.2 Modellierung der Prozesse in Apparaten

Um das Verhalten, besonders auch das dynamische Verhalten vernetzter Systeme nachzubilden, muß man die Bilanzgleichungen für Materie und Energie der einzelnen Apparate simultan lösen. Dies setzt voraus, daß man die Prozesse in den Apparaten richtig versteht und gleichungsmäßig beschreiben kann. Das Prozeßmodell für die einzelnen Apparate muß demnach nicht nur dessen Prozeß richtig abbilden, sondern auch zum Aufbau eines vernetzten Systems verwendbar sein. Im Hinblick auf die Prozeßführung sind der Komplexität der Modelle Schranken auferlegt: Die Modelle sollen einerseits genau genug, andererseits dürfen sie aber auch nicht zu komplex sein. Denn die Prozeßnachbildung muß wenigstens in Echtzeit erfolgen, wenn möglich aber in kürzeren Zeiten, damit man noch Zeit hat, in die Prozesse einzugreifen, wenn sich unerwünschte Ereignisse ankündigen, wie z. B. gefährliche Reaktionen, Verschlechterung der Produktqualität und andere Störfälle.

Als Beispiel für die Modellierung eines Prozesses in einem Apparat soll der von uns behandelte Rohrbündel-Kondensator dienen. Rohrbündel-Wärmeübertrager gehören zu den am meisten verwendeten Wärmetauschern. Uns ging es darum, auch das dynamische Verhalten zu beschreiben. Wie ein einzelner Apparat aussieht und arbeitet, zeigt Abb. 5.

Zur Modellierung des Wärmeaustausches scheiden mehrdimensionale Kontinuumsmodelle aus. Dort hätte man die Erhaltungssätze für Masse, Impuls und Energie zu lösen, also Systeme nicht linearer, partieller Differentialgleichungen. Dies wäre zu zeitaufwendig; insbesondere die instationäre Impulsgleichung einer Strömung mit Ablösung kann man bisher nur für unrealistisch kleine Reynolds-Zahlen lösen.

Abb. 6 zeigt schematisch, wie der Rohrbündel-Wärmeübertrager nach dem sogenannten Zellenkettenmodell zu unterteilen ist. Der erste Unterteilungsschritt, in dem die beiden Hauben vom wärmeübertragenden Bereich in der Mitte getrennt werden, bleibt gegenüber dem axialen Dispersionsmodell un-

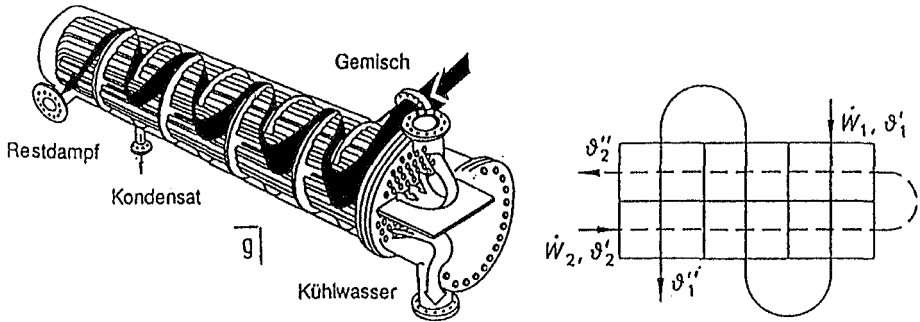


Abb. 5

Rohrbündel-Wärmeübertrager mit einem äußeren und zwei inneren Durchgängen sowie zwei mantelseitigen Umlenklechen, Längsschnitt und Zellenmodell

verändert. Daran anschließend wird der mittlere Bereich so in Zellen unterteilt, daß sich mit dem entstehenden Zellengefüge der Hauptströmungsweg des Mantelstromes nachbilden läßt. Wie bei der herkömmlichen Zellenmethode muß man dazu den Apparat an den Umlenklechen in einzelne Kammern aufspalten, die dann entsprechend der Zahl der Rohrgänge weiter in Zellen zu unterteilen sind. Die Unterteilung des Apparates richtet sich also streng nach Anzahl und Lage der Umlenkleche und der Zahl der Rohrgänge. Jede der Zellen wird als ideal durchmischt betrachtet.

Im Zellennetzmodell werden im Unterschied zum Zellenkettenmodell Leck- und Bypass-Ströme nicht durch einen empirischen Rückvermischungsfaktor

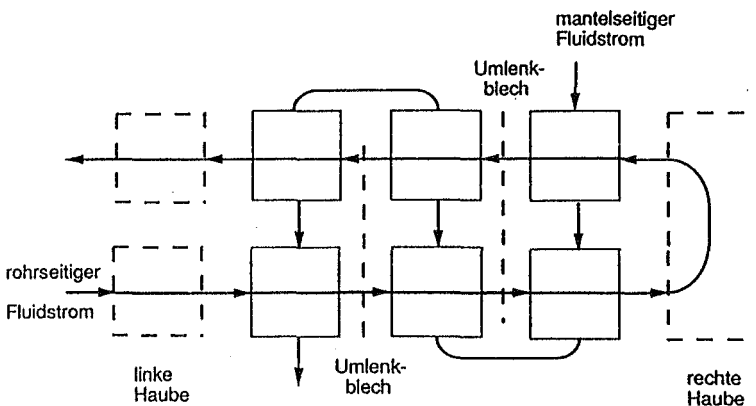


Abb. 6

Unterteilung des Rohrbündel-Wärmeübertragers nach dem Zellenmodell

erfaßt, sondern man berechnet diese über die Druckabfälle der Leckströme in den Spalten zwischen Rohren und Umlenkblechen. Mit anderen Worten, während man beim Zellenkettenmodell nur für jede Zelle eine Energie- und Mengenbilanz zu erfüllen hat, treten jetzt noch Impulsbilanzen hinzu. Der Rechenaufwand wächst, aber man braucht keinen empirischen Faktor für die Rückvermischung. Derzeit untersuchen wir mit derartigen Modellen das dynamische Verhalten von Kondensatoren, also ihr Verhalten bei Laständerungen. Das Gleichungssystem ändert sich dann insofern, als man in jeder Zelle Mengen-, Energie- und evtl. auch Impulsbilanzen für die Dampf- und die Flüssigkeitsphase zu lösen hat unter Beachtung von Koppelbedingungen an der Phasengrenze.

Zu welch überraschenden Ergebnissen man dabei kommt, zeigt Abb. 7.

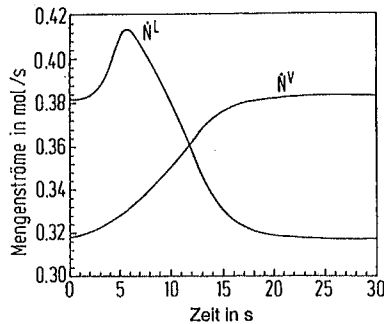


Abb. 7

Mengenströme im Austrittsquerschnitt eines Rohrbündel-Wärmeübertragers

Die gebildete Kondensatmenge wächst naturgemäß bei stärkerer Kühlung. In dem Beispiel ist die Kühlmitteltemperatur um 30 K von 288 K auf 318 K am Kondensatoreintritt erhöht worden. Man würde erwarten, daß dann die Kondensatmenge schlagartig zurückgeht und die Dampfmenge steigt. Dies trifft nach Abb. 7 aber nicht zu. Vielmehr entsteht trotz geringerer Kühlung zunächst mehr Kondensat. Das hat folgenden Grund: Am Kondensatoreintritt entsteht bei geringer Kühlung sofort weniger Kondensat, die Dampfmenge nimmt zu und damit auch die Strömungsgeschwindigkeit des Dampfes weiter stromab. Dort macht sich aber zunächst die schlechtere Kühlung noch nicht bemerkbar. Die höhere Strömungsgeschwindigkeit des Dampfes führt indes zu einer besseren Wärmeübertragung zwischen Dampf und Kondensat. Der Dampf kühlt stärker ab, und es bildet sich mehr Kondensat. Erst nach

einiger Zeit, wenn die Kühlmitteltemperatur auch stromabwärts angestiegen ist, nimmt die Kondensationsrate ab. Derartige Ergebnisse können bei realen Schwankungen der Kühlmitteltemperatur oder auch bei Notabschaltungen eine Rolle spielen.

2.3 Grundlagenforschung

Die Modellierung der Prozesse in den Apparaten setzt voraus, daß man die Mechanismen der Wärme- und Stoffübertragung versteht. Im allgemeinen rechnet man bei der Modellierung mit Wärme- und Stoffübergangskoeffizienten. Diese sollten jedoch keine Anpaßparameter sein, sondern die physikalischen Vorgänge treffend beschreiben. Wir begeben uns damit auf die Ebene der Grundlagen-Wissenschaften, die bei unseren Arbeiten im Vordergrund stehen. Insbesondere geht es uns dabei um Vorgänge, bei denen Phasenumwandlungen, also z. B. Kondensation und Verdampfung, eine Rolle spielen. In der Verfahrenstechnik hat man es fast nie mit reinen Stoffen, sondern meistens mit Mehrstoffgemischen zu tun: damit kommt der Mehrstoffthermodynamik eine besondere Bedeutung zu.

2.3.1 Rohrbündelkondensator

Es seien auch hier nur einige Beispiele herausgegriffen, um an ihnen zu zeigen, welche Probleme sich uns stellen. Als erstes Beispiel behandeln wir den Rohrbündelkondensator, der zuvor als Apparat modelliert worden war. An den gekühlten Rohren – sie mögen, wie dies meist der Fall ist, waagrecht liegen – bildet sich Kondensat und fließt unter dem Einfluß der Schwerkraft auf die tiefer liegenden Rohre. Üblicherweise nimmt man an, das Kondensat fließe als geschlossener Film ab, und man addiert zur Kondensatmenge, die an einem beliebigen Rohr gebildet wird, die Menge Kondensat von den darüberliegenden Rohren. Das ergibt die Kondensatmenge und auch die mittlere Dicke des Kondensatfilms eines beliebigen Rohres. Daraus berechnet man den übertragenen Wärmestrom. Ein solches oft praktiziertes Vorgehen kann aber zu erheblichen Fehlern führen, denn in Wirklichkeit sind die Dinge komplizierter, wie Abb. 8 zeigt.

Tropfen und Flüssigkeitsstrahlen bilden sich an diskreten Stellen der Unterseite. Die Wellenlänge ergibt sich mit Hilfe der Störungstheorie aus der Impulsgleichung, Abb. 9. Die Wellenlänge der am schnellsten anwachsenden Störung eines ursprünglich glatten Films nennt man die gefährlichste Wellenlänge λ_d .

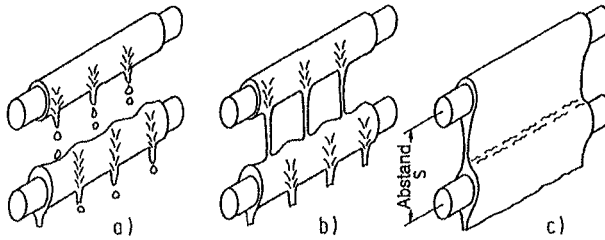
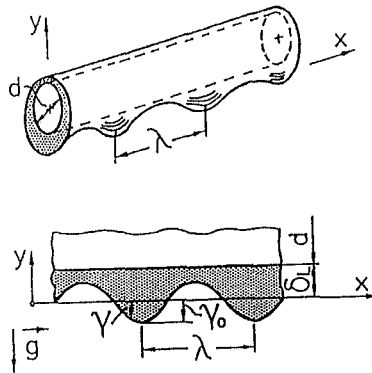


Abb. 8

Strömungsformen zwischen übereinander liegenden Kondensatorrohren
 a – Tropfen, b – Strähnen, c – geschlossener Film



Ansatz: $\gamma = \gamma_0 e^{(kx + i\beta t)}$; $k = 2\pi / \lambda$

Lösung meist numerisch $\beta = \beta(\lambda)$

$\beta(\lambda) > 0 \Rightarrow$ Anfachung

Abb. 9

Störungstheoretischer Ansatz zur Ermittlung der Filmstabilität

Störungen oberhalb einer kritischen Wellenlänge $\lambda_c < \lambda < \lambda_c$ können ebenfalls anwachsen. Beide hängen von der geometrischen Gestalt des Films ab. Interessant ist nun, daß der Wärme- und Stoffaustausch auch vom Rohrabstand abhängt. Größerer Abstand führt zu höherer kinetischer Energie der herabfallenden Flüssigkeit und damit zu besserem Wärme- und Stoffübergang an den

tieferliegenden Rohren. Mit weniger Rohren kann man so bei gleichem Bauvolumen die gleiche Wärmeleistung und den gleichen Trenneffekt erzielen. Oder anders ausgedrückt: Falls eine Anlage nicht die gewünschte Wärme- und Trennleistung bringt, ist es nicht immer vorteilhaft, ihre Fläche durch Einbringen weiterer Rohre zu vergrößern. Erhöhung der kinetischen Energie der herabrieselnden Flüssigkeit durch Wegnahme von Rohren, also Flächenverminderung, kann unter Umständen ebenfalls zum Erfolg führen.

2.3.2 Phasenzерfall

Eine wichtige Aufgabe der thermischen Trenntechnik ist die Kondensation von Gemischdämpfen. Dabei entstehen oft mehrere flüssige Phasen. Solche Phasenzерfälle können auch beim Abkühlen oder Erwärmen von Flüssigkeitsgemischen auftreten, ebenso bei Zugabe weiterer Stoffe. Die Extraktion ist bekanntlich eines der Verfahren, in dem man einen Phasenzерfall durch Zugabe anderer Stoffe gezielt herbeiführt und die Tatsache ausnutzt, daß sich die einzelnen Komponenten in unterschiedlicher Weise auf die Phasen verteilen. Es besteht infolgedessen ein erhebliches Interesse, Phasenzерfälle zu prognostizieren. Grundsätzlich kann dies zwar durch Minimierung der freien Enthalpie geschehen. Das erfordert aber die Kenntnis der Fundamentalgleichung des Gemisches, die fast nie bekannt ist.

Unklarheit über die Anzahl der tatsächlich vorhandenen Phasen führt bei der Anlagensimulation – ähnlich wie die Unkenntnis von azeotropen Punkten bei der Rektifikation – zu falschen Aussagen darüber, welche Prozesse günstig bzw. überhaupt möglich sind.

Zerfällt ein Gemisch in mehrere Phasen, so stellt dies einerseits erhöhte Ansprüche an die halbempirischen Ansätze zur Phasengleichgewichtsberechnung und an die Algorithmen zur Bestimmung der Anzahl der Phasen, eröffnet aber andererseits auch neue, einfache Möglichkeiten, den Parametern dieser Rechenmodelle Werte zuzuweisen. So verringert sich die Zahl der Freiheitsgrade eines Gemisches mit jeder neu entstehenden Phase; das Gemisch ist also durch weniger Zustandsgrößen zu charakterisieren als eines ohne Mehrphasenzерfälle. Diese physikalischen Gegebenheiten werden bislang kaum genutzt und werden von uns auf ihre Eignung untersucht, den Meßaufwand zur Bestimmung der Parameter für Rechenmodelle zu verringern. Gelingt es beispielsweise, aus der Messung von Druck und Temperatur, bei denen ein Phasenzерfall auftritt, den Parametern eines Rechenmodelles eindeutig Werte zuzuordnen, so kann man mit diesem Rechenmodell auch die Zusammensetzung der im Gleichgewicht stehenden Phasen berechnen. Die bislang übliche Anpassung an aufwendig zu messende Phasengleichgewichtsdaten entfällt damit ganz oder weitgehend.

Als Beispiel zeigt Abb. 10 den Zerfall eines Dreistoffgemisches aus Wasser/Butanol und FC72 (C_6F_{14}) in vier Phasen, nämlich drei flüssige und darüber eine dampfförmige Phase. Die untere Phase ist angereichert mit FC72, die darüberliegende mit Butanol und die obere ist wasserreich. Darüber befindet sich der Dampf des Gemisches. Derartige Vier-Phasenzерfälle sind bisher nur noch von zwei anderen Forschern und an einem anderen Gemisch, nämlich Kohlendioxid/Wasser/n-Butanol festgestellt worden.

Da das System nach der Phasenregel nur einen Freiheitsgrad besitzt, läßt sich sein Verhalten in p,T -Ebenen ähnlich wie der Dampfdruck reiner Stoffe beschreiben und darstellen.

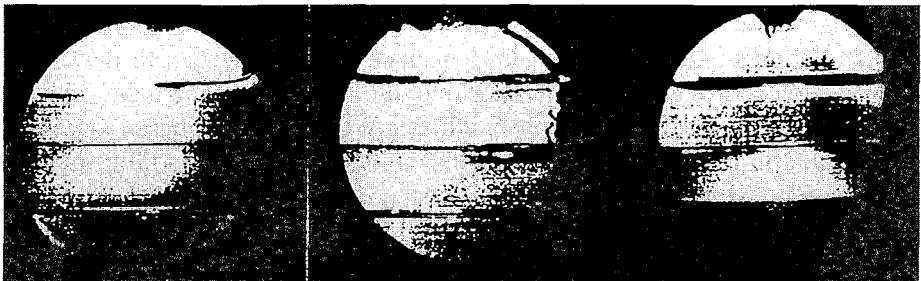


Abb. 10
Vier-Phasenzерfall von FC72 (C_6F_{14})/Butanol/Wasser

2.3.3 Wärmeübergang

Wir behandeln nun den der Kondensation entgegengesetzten Vorgang, nämlich den der Verdampfung einer Flüssigkeit. Dabei entstehen, wie die Beobachtung lehrt, an der Heizfläche Dampfblasen. Man kann bei kleinen Temperaturdifferenzen extrem große Wärmestromdichten übertragen. Verdampfungsforschung wird seit mehr als 50 Jahren intensiv betrieben, es sind mehrere tausend Publikationen zu diesem Thema erschienen. Den Stand des Wissens kann man dadurch kennzeichnen, daß es eine Vielzahl empirischer Korrelationen gibt, in denen das bisherige Wissen gespeichert ist, und die man zur Anlagenauslegung benutzt. Da die Temperaturunterschiede bei Verdampfungsvorgängen klein sind, ist die Meßgenauigkeit gering, entsprechend ist auch der Fehler der empirischen Korrelationen groß. Um auf der sicheren Seite zu sein, werden Anlagen oft überdimensioniert. Der tiefere Grund für die großen Unsicherheiten liegt darin, daß sich die entscheidenden Vorgänge, wie wir durch neuere Arbeiten herausfanden, in so kleinen Mikrobereichen

abspielen, daß man sie meßtechnisch schwer erfassen kann. Im folgenden wird daher ein Modell skizziert, das es uns nun ermöglicht, den Wärmeübergang mathematisch zu beschreiben und zu berechnen.

Wir betrachten dazu eine einzelne Dampfblase, Abb. 11, die zu einer bestimmten Zeit t den Radius $r(t)$ haben möge. Ihr wird über eine Heizwand eine Wärmestromdichte $\dot{q}(t)$ zugeführt, so daß sie weiter anwächst, bis die Auftriebskräfte größer als die Haftkräfte sind und die Blase abreißt. Bisher hatte man angenommen, die Blase erzeuge durch ihr Wachsen und Abreißen eine heftige Mikropulsation in der Flüssigkeit, die ihrerseits für die gute Wärmeübertragung sorgt. Tatsächlich liegen die Dinge anders.

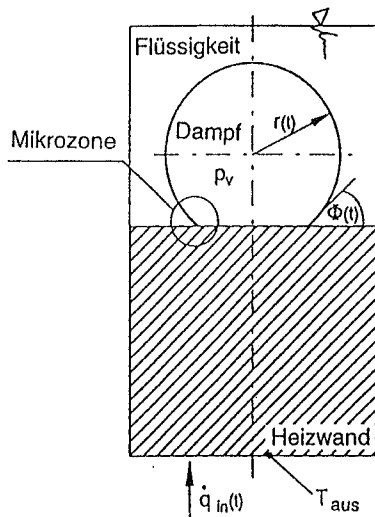


Abb. 11

Heizwand mit Dampfblase und Flüssigkeit

Wir betrachten dazu einen Ausschnitt der gekrümmten Oberfläche der Blase, dort wo sie die Heizwand berührt, Abb. 12. In dieser dünnen Mikrozone ändert sich die Krümmung vom Wert null in der Adhäsionszone über einen Maximalwert bis zu dem schwach ansteigenden Wert dort, wo die Blase ungefähr in Kugelgestalt, also annähernd in konstante Krümmung übergeht.

In der Adhäsionszone liegt die Phasengrenztemperatur weit über der Sättigungstemperatur, weil die Adhäsionskräfte umgekehrt proportional der vierten Potenz der Filmdicke wachsen, so daß keine Flüssigkeit verdampfen kann. Filmdicken in dieser Zone liegen bei 10 nm. Mit Zunahme der Filmdicke in

der Mikrozone nehmen die Adhäsionskräfte rapide ab. Die Phasengrenztemperatur nähert sich der Sättigungstemperatur. Es kann Verdampfung einsetzen. Da der Film noch sehr dünn ist, ist auch sein Wärmewiderstand gering. Es werden extrem hohe Wärmestromdichten übertragen. Von der Adhäsionszone an fällt der Kapillardruck nach außen stark ab. Nun ist andererseits $p_L = p_G(\delta) - p_c + A/\eta^3 = f(\xi, \eta)$. Der Flüssigkeitsdruck steigt somit nach außen an. Er ruft eine von außen in die Mikrozone gerichtete Strömung hervor, welche die dort abdampfende Flüssigkeit nachliefert.

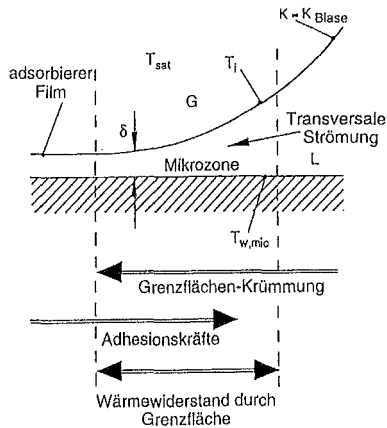


Abb. 12

Phänomene in der Mikrozone

(Filmdicke δ , Krümmung K , Temperatur T , Gas G , Flüssigkeit L)Indizes: i = Grenzfläche, sat = Sättigung, w = Wand, mic = Mikrozone

Die Form und die Temperatur der Phasengrenze Flüssigkeit–Dampf in der Mikrozone wird durch ein nichtlineares Differentialgleichungssystem beschrieben. Dabei müssen die intermolekularen Kräfte zwischen der Flüssigkeit und der Wand sowie der molekular-kinetische Wärmewiderstand der Phasengrenze Flüssigkeit–Dampf mit berücksichtigt werden. Die numerische Integration des Differentialgleichungssystems wird durch die empfindliche Abhängigkeit der Form des Meniskus von den Außenbedingungen am adsorbierbaren Film erschwert. Die Lösung zeigt, daß in der Mikrozone scharfe und hohe Maxima der Krümmung des Meniskus und der Wärmestromdichte auftreten. Die starke Krümmung und die intermolekularen Kräfte beeinflussen das thermodynamische Gleichgewicht an der Phasengrenze wesentlich, so daß die Temperatur der Grenzfläche in der Mikrozone deutlich größer wird als die

Sättigungstemperatur des Dampfes über der Grenzfläche. Das scharfe Maximum der Krümmung erweckt aus makroskopischer Sicht den Eindruck, der Meniskus treffe mit konstanter Krümmung unter einem festen Winkel auf die Wand. Dieser „sichtbare Benetzungswinkel“ und der in der Mikrozone übertragene Wärmestrom läßt sich in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern berechnen.

Als Nebenergebnis berechnet man also auch den Randwinkel. Er stimmt ebenso wie die berechneten Wärmeübergangskoeffizienten exzellent mit Meßwerten überein. Die Wärme wird also hauptsächlich in einer Zone von 0,1 bis 0,2 μm übertragen, wie Abb. 13 zeigt. Dort werden Wärmestromdichten bis zu 1,5 kW/cm^2 oder 15 MW/m^2 übertragen. In dieser Zone ändert sich auch die Wandtemperatur dramatisch. Da die Mikrozone viel kleiner ist als jedes Thermoelement, erstaunt es nicht, daß man ihre Temperatur bei früheren Messungen nicht erfaßt hat und so zu empirischen Korrelationen kam, deren Variablen mit der Physik des Vorgangs wenig zu tun hatten.

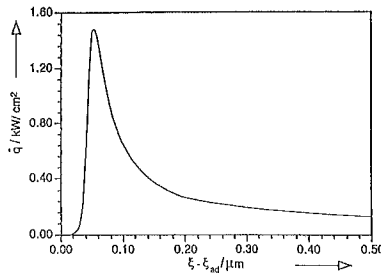


Abb. 13

Wärmestromdichte \dot{q} in der Mikrozone
(R114/Cu, $p = 2,47 \text{ bar}$, $T_{\text{aus}} - T_{\text{sat}} = 3,5 \text{ K}$)

3 Schlußbemerkungen

Diese ausgewählten Beispiele sollten einen Einblick in die Forschung auf dem Gebiet der thermischen Verfahrenstechnik geben. Sie sollten insbesondere zeigen, daß die vernetzten Großprozesse der Verfahrenstechnik letztlich von Vorgängen in winzigen Bereichen bestimmt werden und daß zwischen den verschiedenen Ebenen der Forschung, wie sie in Abb. 1 skizziert waren, der Ebene der vernetzten Prozesse, der Ebene der Prozesse in den Apparaten und derjenigen der ingenieurwissenschaftlichen Grundlagen, starke Wechselwirkungen bestehen und noch viel Neuland zu erforschen ist.