

Thermodynamik: Von brennendem Eis und Chemieanlagen

Von Jürgen Gmehling und Sven Steinigeweg

Die Technische Chemie beschäftigt sich mit der Übertragung von Verfahren aus dem Laborbereich in den technischen Maßstab. Dabei stellt die Thermodynamik ein unverzichtbares Hilfsmittel dar. Neben den Anwendungen in der Verfahrenstechnik leistet die Thermodynamik auch im Bereich des Umweltschutzes (Bioakkumulation und „globale Destillation“), der Energietechnik, der Medizin sowie beim Auffinden umweltverträglicher Lösungsmittel wichtige Dienste. Der Beitrag behandelt anwendungsbezogene Aspekte thermodynamischer Forschung aus Oldenburg.



Etwa 40 Chemie- und Ingenieurfirmen aus Japan, den USA, Europa und Südafrika unterstützen die Forschungen der Technischen Chemie an der Universität Oldenburg.

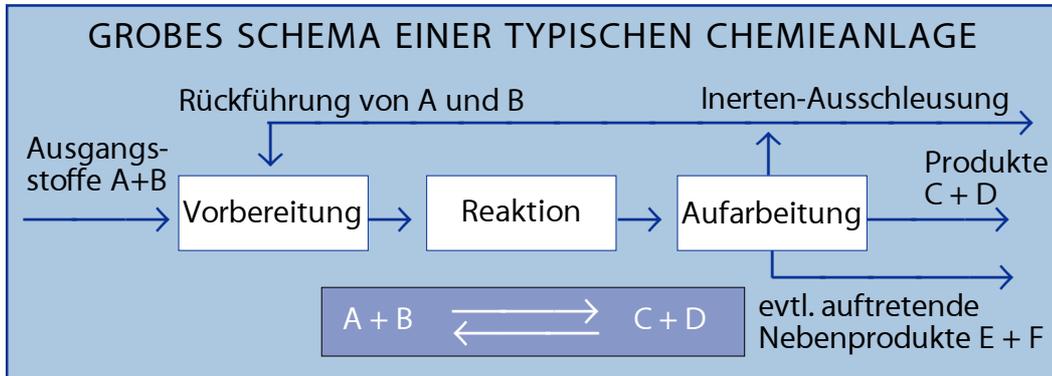
Industrial chemistry deals with the transfer from laboratory to technical scale. For this task, thermodynamics is an ideal tool. Apart from applications in process engineering, thermodynamics also plays a major role in questions concerning environmental protection (bioaccumulation and "global distillation"), energy supply, medicine as well as in finding environmentally friendly solvents. This article describes application-oriented aspects of thermodynamic research in Oldenburg.

Eine der wichtigsten Aufgaben der Technischen Chemie ist, neben dem Betrieb und der Optimierung laufender Verfahren, die wirtschaftliche Übertragung von Laborverfahren in den großtechnischen Maßstab. Unterschiede zwischen Labormaßstab (Produktmenge im Bereich einiger Gramm oder Milligramm) und technischen Chemieanlagen (Produktmenge bis 4000 Tonnen pro Tag) führen zu beträchtlichen Anforderungen an die Verfahrensentwicklung. Die Technische Chemie beschäftigt sich mit vielfältigen Fragestellungen bei der Maßstabsübertragung, wie beispielsweise der Wahl des richtigen Reaktortyps, Einsatz des am besten geeigneten Katalysators, Festlegung der optimalen Reaktionsbedingungen sowie Entwicklung und Optimierung der Trennverfahren. Während man früher auf aufwändige, zeitintensive und teure Versuchsreihen angewiesen war, kann das Verhalten von Teilanlagen oder der gesamten Chemieanlage heutzutage vollständig mit dem Computer simuliert werden. Die Zuverlässigkeit der Simulation wird dabei in erster Linie von der Güte der verwendeten Stoffdaten (Reinstoff- und Gemischdaten) und des mathematischen Modells bestimmt. Mit Prozesssimulatoren stehen ideale Möglichkeiten zur ökonomischen und ökologischen Optimie-

rung chemischer Prozesse zur Verfügung. Eine typische Chemieanlage lässt sich grob in drei Stufen unterteilen, bestehend aus der Vorbereitung der Reaktanden, der Reaktion und der Aufarbeitung. Obwohl der Reaktor als das Herz einer Chemieanlage angesehen wird, werden oftmals bis zu 80 Prozent der gesamten Investitions- und Betriebskosten für die Aufarbeitung der Produkte durch thermische Trennverfahren benötigt. Bei diesen Trennverfahren werden Konzentrationsdifferenzen in verschiedenen Phasen in mehrstufigen Prozessen zur Trennung ausgenutzt. Bei dem wichtigsten thermischen Trennverfahren, der Rektifikation (Destillation), wird die zweite Phase (Dampfphase) durch Zufuhr von Energie erzeugt. Die Rektifikation ist nicht nur in Raffinerien oder der chemischen Industrie von Bedeutung, sie wird beispielsweise auch beim Schnapsbrennen eingesetzt, um aus Wein Branntwein zu gewinnen. Für das Verständnis und die Entwicklung thermischer Trennverfahren ist eine zuverlässige Kenntnis des Phasengleichgewichts von Bedeutung.

Thermodynamik

Grundlage der mathematischen Modellierung thermischer Trennverfahren sind die Gleichungen der chemischen Thermody-



namik. Ursprünglich als Methode zur phänomenologischen Beschreibung reiner Stoffe, hauptsächlich von Gasen, entwickelt, zeigte Josiah Willard Gibbs in der Mitte des 19. Jahrhunderts, dass sich die Thermodynamik auch zur Beschreibung von Mischungen eignet. Dabei ist die Anwendung der Gleichungen nicht auf eine einzelne Phase beschränkt, sondern eignet sich insbesondere zur Erfassung von so genannten Phasengleichgewichten“. Phasengleichgewicht stellt sich immer dann ein, wenn sich die beteiligten Phasen (zwei oder mehr) eine ausreichende Zeit in direktem Kontakt miteinander befinden. Stehen eine dampfförmige und eine flüssige Phase miteinander im Gleichgewicht, so spricht man von einem Dampf-Flüssig-Gleichgewicht, wie es bei der Rektifikation eine entscheidende Rolle spielt. Die Zusammensetzung der Dampfphase ist dann durch die Zusammensetzung der flüssigen Phase vorgegeben.

Die Konzentrationsdifferenz zwischen dampfförmiger und flüssiger Phase nutzt man bei der Rektifikation zur Trennung aus, wie kurz anhand des Schnapsbrennens erläutert werden soll. Wein soll vereinfachend als eine Mischung angesehen werden, die nur aus Alkohol (Ethanol) und Wasser besteht. Erhitzt man den Wein bis zum Siedepunkt, so stellt sich gemäß den Gesetzen der Thermodynamik ein Phasengleichgewicht zwischen der flüssigen Phase (dem Wein) und der darüber befindlichen Dampfphase ein. Da der Alkohol eine höhere Flüchtigkeit als Wasser aufweist, reichert sich der Alkohol in der Dampfphase an. Fängt man den Dampf, in dem sich nun mehr Alkohol befindet als in der Flüssigkeit, auf und kondensiert ihn, enthält die entstehende Flüssigkeit deutlich mehr Alkohol - man erhält den Branntwein (wobei darauf zu achten ist, dass eventuell anfallende Fuselöle gleichzeitig abgetrennt werden). Allerdings gelingt es mit der Rektifikation nicht, reinen Alkohol zu erhalten (wie er beispielsweise in der Medizin benötigt wird), da im Alkohol-Wasser-System ein so genannter "azeotroper Punkt" vorliegt. An einem solchen Punkt entspricht

die sich in der Dampfphase einstellende Zusammensetzung exakt der der Flüssigkeit, so dass ab diesem Punkt eine Anreicherung des Alkohols mittels Rektifikation nicht mehr möglich ist.

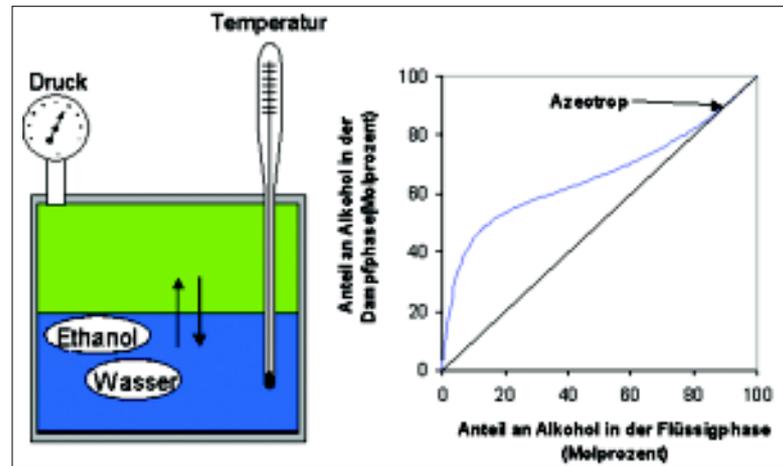
Die Kenntnis azeotroper Punkte ist von besonderer Bedeutung für die chemische Technik, da bei der Trennung von Systemen mit azeotropem Punkt spezielle, aufwändige und kostenintensive rektifikative Sonderverfahren herangezogen werden müssen. Bei Kenntnis des Dampf-Flüssig-Gleichgewichts ist heutzutage die Auslegung und Planung von Rektifikationsanlagen mit Hilfe entsprechender Computerprogramme („Prozesssimulatoren“) möglich. Messtechniken erlauben die Messung dieser Phasengleich-

sungen im konkreten Fall sogar vollständig. Für die Entwicklung dieser prädiktiven Modelle ist jedoch eine große Datenbasis erforderlich.

Deshalb wurden seit 1973 alle weltweit zugänglichen Daten in computergerechter Form in einer Faktendatenbank, der Dortmunder Datenbank (DDB) (so genannt, da die Arbeiten seinerzeit an der Universität Dortmund von Jürgen Gmehling begonnen wurden) gespeichert. Dabei wurden bislang Daten aus ca. 50.000

Artikeln in über 20 Sprachen erfasst. Seit 1989 werden die Updates von der in Oldenburg ansässigen Firma DDBST mit knapp 20 Mitarbeitern erstellt, unterstützt von Wissenschaftlern aus China, Japan, Korea, Russland, Estland und Brasilien. Die Daten werden von zahlreichen Firmen entweder inhouse oder per Internet genutzt. Ein Teil der Datensammlung ist auch in Buchform erschienen. Dabei handelt es sich jedoch um lediglich ca. 15 Prozent der gespeicherten Daten.

Durch die langjährige Arbeit und die intensive Pflege stellt die DDB mittlerweile die weltweit größte Faktendatenbank für thermodynamische Daten dar. Ergänzend werden in unserer Arbeitsgruppe an der Universität sy-



Das Dampf-Flüssig-Phasengleichgewicht am Beispiel von Ethanol-Wasser

gewichte. Die Messung ist jedoch für Multi-Komponentensysteme sehr zeitaufwändig. So würde die Messung des Phasengleichgewichts eines Gemischs aus zehn Komponenten eine Messzeit von 37 Jahren benötigen. Bei Anwendung moderner thermodynamischer Modelle kann die Messzeit auf wenige Tage bis Wochen reduziert werden, so dass diese Modelle unverzichtbare Werkzeuge bei der Entwicklung von Trennprozessen darstellen. Bei Verwendung von uns entwickelten prädiktiven Modellen (Gruppenbeitragsmethoden) entfallen Mes-

stetisch Messungen verschiedener Phasengleichgewichte durchgeführt. Dafür wurden größtenteils computergesteuerte Messtechniken für Stoffdaten (Reinstoffdaten, Phasengleichgewichte) in einem großen Temperatur- und Druckbereich (-200 bis 600°C, bis 20.000 bar) entwickelt. Für die chemische Industrie im In- und Ausland wurde eine Vielzahl von Messungen zur Entwicklung neuer oder zur Optimierung bestehender Verfahren durchgeführt. Mittlerweile wurde zur weiteren Betreuung industrieller Messungen das An-Institut „Laboratory for

Thermophysical Properties“ (LTP) gegründet. Inzwischen sind dort fünf Wissenschaftler und sechs Laboranten beschäftigt.

Alle in der DDB gespeicherten Daten stehen den Mitarbeitern des Lehrstuhls zur Verfügung und bilden die Grundlage für die Entwicklung und Verbesserung thermodynamischer Modelle zur Berechnung von Phasengleichgewichten. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Entwicklung prädiktiver Modelle zur Vorausberechnung von Phasengleichgewichten. Oftmals steht der Verfahreningenieur vor der Aufgabe, ein bestimmtes Gemisch zu trennen, ohne dass experimentelle Phasengleichgewichtsdaten vorliegen. Im Rahmen der Prozessentwicklung sind experimentelle Untersuchungen zu teuer und aufwändig. Die von uns entwickelten prädiktiven Modelle erlauben aber die Vorausberechnung von Phasengleichgewichten ohne Kenntnis experimenteller Daten. Diese Methoden, so genannte "Gruppenbeitragsmethoden", stellen somit für die Verfahrensentwickler ein unverzichtbares Werkzeug dar. Grundlage dieser Modelle, wie das von uns entwickelte UNIFAC-Modell und dessen Weiterentwicklung modified UNIFAC (Dortmund), ist das „Gruppenbeitragskonzept“. Organische Moleküle, aus denen die zu trennenden Mischungen bestehen, sind aus verschiedenen charakteristischen Strukturgruppen aufgebaut. So besteht der Alkohol (Ethanol) aus einer Methyl-, einer Methyl- sowie einer Alkoholgruppe. Grundgedanke der Gruppenbeitragsmethode UNIFAC ist es nun, die Moleküle in die funktionellen Gruppen zu unterteilen und zur Vorausberechnung des Phasengleichgewichts die Wechselwirkung der einzelnen charakteristischen Gruppen untereinander zu berechnen. Der große Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass die Anzahl möglicher Strukturgruppen wesentlich geringer als die Anzahl möglicher Moleküle ist (die Zahl organischer Moleküle hat mittlerweile die Siebzehnmillionengrenze überschritten). Aufgrund der Zuverlässigkeit und breiten Anwendbarkeit dieser Modelle für die Praxis wird die Weiterentwicklung von etwa 40 Chemie- und In-

genieurfirmen aus Japan, den USA, Südafrika und Europa unterstützt. Nahezu alle großen Chemiefirmen sind im Konsortium vertreten und ermöglichen so die Weiterentwicklung der entsprechenden Modelle, die inzwischen auch in alle kommerziellen Prozesssimulatoren integriert wurden.

Bacardi ohne Kopfschmerzen

Mit der Möglichkeit zur Vorausberechnung der benötigten Daten ergeben sich eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten in der Praxis. Die von unserer Arbeitsgruppe entwickelten Verfahren und Modelle zur Auslegung und Optimierung thermischer Trennverfahren werden täglich weltweit von Chemieingenieuren eingesetzt, um große Chemieanlagen zu konzeptionieren. Unter anderem werden auch in Oldenburg aufwändige Untersuchungen in halbertechnischen Pilotanlagen durchgeführt, beispielsweise um die Integration von Reaktion und Rektifikation („Reaktivrektifikation“) in einer apparativen Einheit zu erforschen. Die Reaktivrektifikation stellt ein aussichtsreiches, innovatives Verfahren dar, das helfen kann, die Kosten und die Emissionen einer Chemieanlage drastisch zu reduzieren. Wir konnten dabei für verschiedene Reaktionen die Anwendungsmöglichkeiten der Reaktivrektifikation als Verfahrensalternative systematisch untersuchen.

Von Zeit zu Zeit werden wir auch mit ungewöhnlichen Aufgaben konfrontiert. So entwickelte eine deutsche Ingenieurfirma eine energie-

günstigere Rektifikationsanlage zur Herstellung von Bacardi. Es stellte sich jedoch heraus, dass der mit der neuen Anlage hergestellte Bacardi bei den Konsumenten Kopfschmerzen verursachte. Dieser ging auf ein Produkt zurück, welches bei dem alten Verfahren im Endprodukt nicht anfiel und welches es nun abzutrennen galt. Von uns durchgeführte Messungen zum Phasengleichgewicht der beteiligten Stoffe konnten genutzt werden, den unerwünschten Stoff aus dem Bacardi zu entfernen und somit einen beschwerdefreien Konsum zu ermöglichen. Aber auch ganz in der Nähe von Oldenburg finden sich zahlreiche Anwendungen der Trenntechnik. Erdgas, welches z.B. in der Nordsee gefördert wird, bedarf vor der Weiterverwendung einer Aufarbeitung. Wichtige Schritte bei der Erdgasaufarbeitung sind die Trocknung und das „Sweetening“. Beim „Sweetening“ oder „Süßen“ von Erdgas werden die sauren Gase Kohlendioxid (CO_2) und Schwefelwasserstoff (H_2S) aus dem Erdgas entfernt. Zur Auslegung und Optimierung der entsprechenden Verfahren ist die exakte Kenntnis der Phasengleichgewichte unverzichtbar. Der abgetrennte Schwefelwasserstoff wird dann anschließend in einer „Claus-Anlage“ in Schwefel überführt. Eine große Erdgasanlage befindet sich ganz in der Nähe von Oldenburg, in Großenkneten. Hier fallen jährlich mehr als 700.000 Tonnen Flüssigschwefel an, die dann per Bahn (täglich ca. 2-3 Züge mit je 20 Kesselwagen à 50 Tonnen) durch den Oldenburger Bahnhof in Richtung Brake transportiert werden.

Umweltschutz und globale Destillation

Die von uns entwickelten Modelle sind jedoch nicht ausschließlich für die chemische Industrie von Interesse, sondern auch für zahlreiche weitere Fragestellungen, wie z.B. beim Umweltschutz, einsetzbar. So lässt sich mit Hilfe der angesprochenen Methoden das „Schicksal“ einer langlebigen Chemikalie in der Umwelt vorausberechnen. „Persistent Organic Pollutants“ (POP) sind Chemikalien, die schlecht oder kaum biologisch abbaubar sind und sich vor allem im Fettgewebe anreichern. Einmal in die Umwelt gelangt, erreichen sie über die Nahrungskette auch den Menschen. So können sich Pestizide, die beispielsweise im Pflanzenschutz eingesetzt werden, um den Faktor 10.000.000 im Fettgewebe anreichern. Daher können schon geringe Mengen dieser Chemikalien im Laufe der Zeit



Bücher der Dechema Chemistry Data Series und des VCH - ein kleiner Auszug der Dortmunder Datenbank

eine verheerende Wirkung haben, zumal POPs häufig zu Gesundheitsstörungen bei Mensch und Tier führen. Modelle wie UNIFAC können helfen, die Verteilung der Chemikalien in der Umwelt zu berechnen. Sie bilden somit die Grundlage für die Abschätzung der Bioakkumulation von Chemikalien.

Besonders erschreckend ist in diesem Zusammenhang die „globale Destillation“. Bei der Rektifikation erfolgt, wie oben angesprochen, eine Anreicherung von Stoffen über die Dampfphase. Die Rektifikation ist aber nicht auf einen Kolben oder eine technische Anlage be-

beschränkt, sondern tritt auch als globales Phänomen in Erscheinung. An den wärmeren Orten der Erde kommt es zu einer Verdampfung auch schwerflüchtiger Chemikalien in die Atmosphäre. An kalten Stellen der Erde wie beispielsweise hoch in den Bergen oder der Arktis kommt es auf Grund der deutlich geringeren Temperaturen zur Kondensation. Ähnlich dem Badezimmer, an dem die warmen Wasserdämpfe nach der morgendlichen Dusche kondensieren, schlagen sich die in die Umwelt gelangten POPs im Laufe von Jahrzehnten in den kalten Regionen der Erde nieder. POPs machen keinen Halt vor Landesgrenzen und man findet sie in Landstrichen, wo sie nie angewendet wurden.

Verheerend ist, dass Chemikalien durch die globale Destillation in Regionen der Erde gelangen, in denen sie aufgrund geringer Sonneneinstrahlung, extremer Kälte und geringer mikrobiologischer Aktivität häufig besonders schlecht biologisch abgebaut werden und gleichzeitig von Tieren mit dicken Fettschichten „begierig“ akkumuliert werden. Pestizide gelangen so über die globale Destillation und durch die Bioakkumulation in die Fettschichten von Robben und Eisbären zu Volksgruppen, die sich von diesen Tieren ernähren. So kommt es, dass Eskimofrauen höhere Pestizidgehalte in der Muttermilch aufweisen als Frauen aus den Industrienationen. Auch die Fische in den Ötztaler Alpen sind aufgrund des genannten Effektes stärker mit Pestiziden belastet als die Fische in warmen oder gemäßigten Zonen der



Mit dem Zerfall von Methanhydrat, dem „brennenden Eis“ (oben), hängen möglicherweise Schiffsunglücke im Bermudadreieck zusammen (li.).

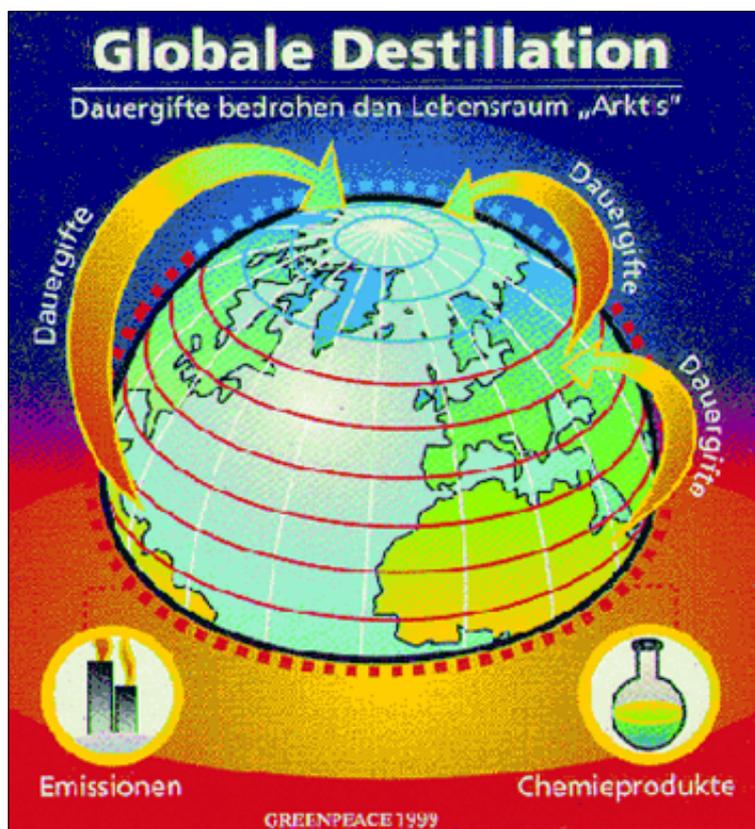
Erde. Unsere Modelle können helfen, die Mechanismen der globalen Destillation besser zu verstehen und Lösungen zu erarbeiten.

Gashydrate

Im Rahmen von Messungen und Modellierung beschäftigen wir uns auch mit Gashydraten, die sich zum Energieträger der Zukunft entwickeln könnten. Methanhydrat besteht aus dem Gas Methan, dem Hauptbestandteil von Erdgas, welches von einem Käfig aus Eis umschlossen ist. Methan entsteht in den Weltmeeren bei der Verwesung von Plankton, Algen und Fischen. Gespeichert in Molekülkäfigen aus Eis lagern etwa 10 bis 15 Trillionen Tonnen des Gases auf der Erde. Das ist ein etwa doppelt so großes Kohlenstoffreservoir wie alle Erdöl-, Erdgas- und Kohlevorkommen der Welt zusammen. Oft finden sich 200 Meter dicke Schichten von Methanhydrat an Kontinentabhängen oder in Permafrostgebieten. Könnte nur ein Prozent des Hydrats zugänglich gemacht werden, würden sich beispielsweise die Brennstoffreserven Amerikas auf einen Schlag verdoppeln. Große Probleme ergeben sich jedoch bei der Förderung von Gashydraten. Gashydrate sind nur bei tiefer Temperatur und höheren Drücken stabil. So zerfallen Gashydrate an der Meeresoberfläche. Das Methan entweicht und zurück bleibt das Wasser. Hält man ein Streichholz an einen Klumpen Methanhydrat, verbrennt es und macht den Eindruck von brennendem Eis. Methan-

hydrate stellen allerdings auch ein beträchtliches Umwelt- und Sicherheitsrisiko dar. Aufgrund des instabilen Charakters von Gashydraten - schon geringe Druck- oder Temperaturänderungen können zum Zerfall führen - können in kurzer Zeit beträchtliche Mengen an Methan freigesetzt werden. So glaubt man, dass durch Hydraterfall im Bereich des Bermudadreiecks, ausgelöst beispielsweise durch kleinere Erdbeben, von Zeit zu Zeit große Methanmengen freigesetzt wurden, die zu einer Verringerung der Dichte des Meerwassers führen, wodurch Schiffe ihren Auftrieb verloren und sanken. Auch bei einer in der Region verschollenen Fliegerstaffel der US-Army wird vermutet, dass große Methanmengen in die Triebwerke gelangt sind, was zu einer Explosion der Maschinen geführt hat.

Unbestritten ist, dass die Freisetzung von Methan aus dem Hydrat in die Atmosphäre auch für das globale Klima unabsehbare Folgen haben wird. Methan ist ein um den Faktor 30 stärker wirkendes Treibhausgas als Kohlendioxid. Solange ausreichend konventionelle Energieträger vorhanden sind, wird Methanhydrat bei der Energieversorgung deshalb nur eine begrenzte Rolle spielen. Auf lange Sicht stellt Methanhydrat jedoch ein riesiges Energiepotenzial dar. Ohne ausreichende Kenntnis der Bildungsmechanismen von Gashydraten lassen sich die großen Herausforderung der gezielten Förderung dieses Rohstoffs kaum lösen. Auch beim Trans-



Schema einer "globalen Destillation": An wärmeren Orten der Erde verdampfen auch schwerflüchtige Chemikalien in die Atmosphäre, die sich an kalten Orten über Kondensation anreichern.

port von Erdgas durch Pipelines kann es bei den Druck- und Temperaturbedingungen und der Anwesenheit von Wasser zur Bildung von Gashydraten kommen, was im Extremfall zum Zerbersten der Pipeline führen kann. Solange Entstehung und Zerfall von Hydraten im Meer nicht verstanden werden, können auch keine Prognosen über den Einfluss dieses Stoffes auf den globalen Klimahaushalt gemacht werden. Hier können Informationen über das Phasengleichgewicht bei Bedingungen, wie sie im Meeresgrund vorherrschen, sehr hilfreich sein.

Alternative Lösungsmittel

Thermodynamische Modelle spielen auch eine entscheidende Rolle bei der Erforschung alternativer Lösungsmittel, wie beispielsweise bei ionischen Flüssigkeiten, überkritischen Fluiden oder perfluorierten Verbindungen. Ionische Flüssigkeiten stellen ionische Verbindungen, ähnlich wie Kochsalz dar, sind jedoch im Gegensatz zu diesem bei Raumtemperatur flüssig. Aufgrund ihres salzartigen Charakters besitzen sie keinen Dampfdruck und gelangen somit nicht in die Atmosphäre. Bei perfluorierten Verbindungen wurden die in organischen Molekülen häufig auftretenden Wasserstoffatome durch Fluoratome ausgetauscht. Diese Verbindungen zeigen bemerkenswerte Eigenschaften,

die für die Verfahrenstechnik, aber auch die Medizin interessant sind. So lassen sich einige großtechnische Prozesse durch den Einsatz perfluorierter Verbindungen wesentlich umweltfreundlicher gestalten. Aber auch in der Medizin können perfluorierte Stoffe aufgrund ihrer Fähigkeit hohe Mengen an Sauerstoff zu lösen, eine wichtige Rolle als Blutersatzstoff spielen. Diese Verbindungen könnten z.B. bei Patienten, die einen Hirnschlag erlitten haben eingesetzt werden, um für eine schnelle Sauerstoffversorgung des Gehirns zu sorgen. Aber auch beim Organtransport oder bei Operationen mit hohem Blutverlust stellen perfluorierte Verbindungen in absehbarer Zeit wichtige Alternativen zu gespendetem Blut dar.

Auch beim Einsatz alternativer Lösungsmittel, wie ionischer Flüssigkeiten, perfluorierter Verbindungen oder überkritischer Fluide kann die Thermodynamik einen entscheidenden Beitrag leisten.

Ausblick

Owohl die Thermodynamik eine vergleichsweise alte Wissenschaft ist, kann sie helfen, hochaktuelle und vielfältige Aufgaben zu lösen. Dabei bedarf es einer ständigen Erweiterung und Verbesserung der thermodynamischen Modelle. Die am Lehrstuhl durchgeführten Messungen mit den zur Verfügung stehenden Messtechniken, der Zu-

griff auf die Dortmunder Datenbank und das vorhanden Know-how führen zu einer guten Ausgangsposition der Technischen Chemie in Oldenburg, die durch zahlreiche internationale Kooperationen mit Firmen, Forschungsinstituten und Universitäten gefestigt wird. Das Anwendungsspektrum reicht dabei von rein verfahrenstechnischen Fragestellungen hin zu Anwendungen in der Energie- und Umweltwissenschaft und der Medizin. So kann die Thermodynamik auch helfen, Dinge des täglichen Lebens besser zu verstehen. Denn egal, ob wir atmen oder Kaffee kochen: Phasengleichgewichte spielen eine entscheidende Rolle.

Die Autoren



Prof. Dr. Jürgen Gmehling, Hochschul-lehrer für Technische Chemie, studierte Chemie an der Universität Dortmund, nachdem er eine Chemielaborantenlehre bei der Duisburger Kupferhütte und ein In-

genieurstudium an der Chemieingenieurschule Essen absolviert hatte. Nach seiner Promotion auf dem Gebiet der Anorganischen Chemie an der Universität Dortmund habilitierte er sich dort 1982 für das Fach Technische Chemie. Nach Forschungsaufenthalten in den USA und Dänemark erhielt er 1988 einen Ruf an die Universität Oldenburg. Seine Forschungsschwerpunkte sind die computergestützte Entwicklung, Auslegung und Optimierung von Chemieanlagen. Gmehlings Arbeiten wurden mit dem Arnold-Eucken-Preis der GVC/VDI ausgezeichnet und haben zur Gründung von zwei Firmen (DDBST GmbH, LTP GmbH) geführt, wobei letztere ein An-Institut der Universität Oldenburg ist.



Sven Steinigeweg studierte Chemie an der Universität Oldenburg und schloss sein Studium 1999 mit der Diplomarbeit ab. Für Studium und Diplomarbeit über reaktive Rektifikation wurde er mit dem Dechema-Studentenpreis des Jahres 2000 im Bereich "Technische Chemie" ausgezeichnet. Seit Januar 2000 beschäftigt er sich in seiner Promotion in der Arbeitsgruppe von Prof. Gmehling mit den Anwendungsmöglichkeiten der reaktiven Rektifikation und deren Vorteile gegenüber klassischen Verfahren.