

Aufgaben, Ziele und Nutzen der internationalen Wasserdampfforschung

Von U. Grigull*

Auf einer Tagung „Forschung in der Kraftwerkstechnik 1983“ kann ein Bericht über die internationale Wasserdampfforschung nicht fehlen, denn daß seit Erfindung der Dampfmaschine und bis in jede absehbare Zukunft Wasserdampf das wichtigste Arbeitsmedium in thermischen Kraftwerken war, ist und sein wird, braucht in diesem Kreise nicht bewiesen zu werden.

Organisation

Die Erforschung der Eigenschaften des Wasserdampfes wurde vor über 50 Jahren als internationale Gemeinschaftsaufgabe erkannt und mit der Einberufung der „First International Steam Table Conference“ im Jahre 1929 nach London auch tatkräftig begonnen.

Schon damals war klar, daß diese Aufgabe die Möglichkeiten eines einzelnen Landes bei weitem übersteigt. Die heutige Nachfolgerin dieser Dampf tafelkonferenzen ist die „International Association for the Properties of Steam“, kurz IAPS genannt, die sich als „Non-Profit“-Zusammenschluß nationaler Komitees mit folgenden Aufgaben versteht:

- alle verfügbaren Daten über die Stoffwerte von Wasser und Wasserdampf zu sammeln, kritisch auszuwerten und zu Formulierungen zu vereinigen,
- diesen Formulierungen als der derzeit besten Repräsentation unserer Kenntnis internationale Anerkennung zu verschaffen und sie in der Fachwelt zu verbreiten,
- weitere Forschungsarbeiten anzuregen und zu koordinieren, um Lücken in unseren Kenntnissen zu schließen.

Nach den Regeln der IAPS findet alle 5 Jahre eine Vollkonferenz statt (die letzte 1979 in München, die nächste im September 1984 in Moskau); jedes Jahr trifft sich das „Executive Committee“ (EC), das eigentliche Vollzugsorgan der IAPS. Mitgliedsländer dieses EC sind: Kanada, CSSR, die Bundesrepublik Deutschland, Frankreich, Japan, Großbritannien, die USA und die UdSSR. Die Bundesrepublik Deutschland nimmt an dieser Gemeinschaftsaufgabe durch den „VDI-Ausschuß für Wasserdampfforschung“ teil, der zugleich das nationale Komitee der IAPS ist. Die technisch-wissenschaftliche Arbeit wird in Arbeitsgruppen der IAPS geleistet, über deren Aufgaben und Ziele im folgenden berichtet wird.

Kanonische Gleichungen

Das älteste Arbeitsgebiet der Wasserdampfforschung waren die Zustandsgleichungen des thermodynamischen Gleichgewichts. Zur Aufstellung einer solchen Gleichung mit möglichst breitem Anwendungsbereich dient folgende Überlegung:

Faßt man die Aussagen des ersten und zweiten Hauptsatzes (und damit den Kernbereich der Thermodynamik) dadurch zusammen, daß man eine Gleichung von der Form

$$u = u(\rho, s) \quad (1)$$

anschreibt, so bedeutet das in Worten: Es gibt eine Zustandsgröße u , die spezifische innere Energie (die durch den ersten Hauptsatz definiert ist), die sich als Funktion der Dichte ρ und der spezifischen Entropie s auffassen läßt (wobei die spezifische Entropie s durch den zweiten Hauptsatz definiert ist) und von der sich alle übrigen thermodynamischen Zustandsgrößen durch Differentiationen ableiten lassen. Man kann andere unabhängige Variable wählen, etwa, indem man durch die Transformation

$$h = u + p/\rho \quad (2)$$

die spezifische Enthalpie h definiert und damit die Gleichung

$$h = h(\rho, s) \quad (3)$$

erhält. Die Transformation

$$f = u - Ts \quad (4)$$

ergibt die Gleichung für die spezifische freie Energie oder spezifische Helmholtz-Funktion

$$f = f(\rho, T), \quad (5)$$

während die Transformation

$$g = u + p/\rho - Ts = h - Ts \quad (6)$$

zur Gleichung der spezifischen freien Enthalpie oder spezifischen Gibbs-Funktion

$$g = g(p, T) \quad (7)$$

führt. Weitere Transformationen sind möglich, aber in unserem Bereich nicht erforderlich.

Die Gln. (1), (3), (5) und (7) nennt man thermodynamische Potentiale oder auch charakteristische oder kanonische Funktionen. Bei der Auswahl ist die Überlegung maßgebend, daß das thermodynamische Verhalten eines Stoffes wesentlich von den molekularen Wechselwirkungen abhängt, die wiederum Funktionen des Molekülabstandes und damit der Dichte sind. Nimmt man die Temperatur T als zweite maßgebende Variable, so ergibt sich die spezifische freie Energie oder spezifische Helmholtz-Funktion $f = f(\rho, T)$ nach Gl. (5) als kanonische Funktion. Beispiele für die Berechnung weiterer Zustandsgrößen sind dann:

für den Druck
$$p = \rho^2 \left(\frac{\partial f}{\partial \rho} \right) \quad (8)$$

für die spezifische Entropie
$$s = - \left(\frac{\partial f}{\partial T} \right) \quad (9)$$

für die spezifische innere Energie
$$u = f - T \left(\frac{\partial f}{\partial T} \right) \quad (10)$$

für die spezifische isochore Wärmekapazität
$$c_v = -T \left(\frac{\partial^2 f}{\partial T^2} \right) \quad (11)$$

* Professor Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. U. Grigull, Technische Universität München, München.

Funktionen aus derartigen Rechenoperationen sind zueinander „thermodynamisch konsistent“.

Die Funktion $f = f(p, T)$ spannt in der p, T -Ebene eine Zustandsfläche („the surface“) auf, von der man erwarten muß, daß sie die experimentellen Bestwerte im Rahmen ihrer Toleranzen im ganzen Geltungsbereich wiedergibt, ebenso die wenigen direkt meßbaren Zustandsgrößen, die sich aus der „Muttermgleichung“ thermodynamisch konsistent ableiten lassen, wie etwa die Wärmekapazitäten, die Schallgeschwindigkeit, die Joule-Thomson-Koeffizienten. Kanonische Funktionen, die diese Forderungen erfüllen, sind notwendigerweise kompliziert und erfordern lange Rechenzeiten, insbesondere bei Iterationen. Man muß dazu wissen, daß bei der Berechnung von Kreisläufen 30 bis 40% und bei der Turbinenberechnung 80% der Rechenzeit allein zur Ermittlung von Zustandsgrößen aufzuwenden sind.

„Wissenschaftliche“ Gleichungen und „Industrie“-Gleichungen

Als 1963 auf der Dampf tafelkonferenz in New York erstmals die Möglichkeiten diskutiert wurden, Zustandsgleichungen von Wasserdampf für den Computer zu programmieren, wurden die sehr verschiedenen Erwartungen der Benutzer an solchen „Formulierungen“ deutlich. Eine Gruppe strebte eine möglichst einfache Zustandsgleichung zur Optimierung von Kreisläufen und zur Turbinenberechnung an, eine andere stellte sich die „ideale“ kanonische Gleichung als Stammgleichung für alle übrigen Zustandsgrößen vor, die in der Kraftwerkstechnik außerdem noch gebraucht werden. Man entschloß sich, beide Wege zu gehen, und so entstanden

- die 1967 IFC Formulation for Industrial Use, und
- die 1968 IFC Formulation for Scientific and General Use.

Die erste dieser Formulierungen, auch „Industrie“-Gleichung genannt, ist verhältnismäßig einfach aufgebaut und erfüllt die gestellten Bedingungen zufriedenstellend, die zweite, die „wissenschaftliche“ Gleichung, ist wesentlich komplizierter, kann aber als Stammgleichung für beliebige Zustandsgrößen dienen, wie z.B. Schallgeschwindigkeit, Isentropenexponent, Wärmekapazität, Kompressibilität, Joule-Thomson-Koeffizient u.a., die auch bei der Berechnung von Kesseln, Turbinen und Kondensatoren gebraucht werden, und die einzeln zu messen, jeden denkbaren Aufwand bei weitem übersteigen würde. Der Vorschlag, zwei Gleichungstypen nebeneinander zu entwickeln, kam seinerzeit von der deutschen Delegation (damals noch unter meinem Vorgänger *Professor Ernst Schmidt*) und ist auch aus heutiger Sicht wissenschaftlich wie wirtschaftlich berechtigt und geboten. Die Industrie-Gleichung sollte zugleich bei internationalen Angeboten verbindlich sein. Sie beschreibt die Eigenschaften des „contract steam“ und gibt dadurch jedem Anbieter die gleiche Ausgangslage.

Das thermodynamische Verhalten von Wasser ist sehr kompliziert. Das gewinkelte, polare Wassermolekül läßt sich in seiner Wechselwirkung mit seinen Nachbarn nur schwer theoretisch deuten; wir sind daher weitgehend auf Versuchsergebnisse angewiesen, deren Bestwerte in Rahmentafeln (skeleton tables) zusammengefaßt sind. Um welche Mengen von Meßpunkten es sich dabei handelt, geht aus folgender Aufstellung hervor:

- Bis 1934 lagen etwa 3500 Versuchswerte für Druck p , Temperatur T und Dichte ρ von Wasser und Wasserdampf vor,
- von 1934 bis 1963 kamen 3500 weitere hinzu, angeregt durch die Bemühungen der IAPS,
- von 1963 bis 1979 kamen weitere 6000 Daten aus dem gleichen Anlaß hinzu.

Wir verfügen also heute über die Ergebnisse von etwa 13 000 Einzelmessungen, die alle in die „wissenschaftliche“ Gleichung eingegangen sind. Wollte man diese Experimente nach ihrem Geldwert einstufen, käme man auf viele Millionen Mark.

Mit der Schaffung zweier Gleichungssysteme war auch die Absicht verbunden, die Industrie-Gleichung für eine Weile festzuschreiben, da die Industrie in ihren Rechenprogrammen einen nicht unerheblichen Wert investiert hat. Das ist bis heute — also über 15 Jahre — gelungen, wenn auch nicht immer unangefochten. Länder mit einem großen Binnenmarkt wie etwa die Sowjetunion oder die Vereinigten Staaten scheinen an dieser Industrie-Gleichung nur ein verhältnismäßig geringes Interesse zu haben, zumal diese — wie man zugeben muß — gegenüber der wissenschaftlichen Gleichung einige Schönheitsfehler besitzt, obwohl sie ihre Aufgaben erfüllt. In der Verteidigung unseres Standpunktes konnten wir meist der Zustimmung der japanischen Delegation sicher sein.

Es hat aber auch 15 Jahre gedauert, bis ein Vorschlag zur Verbesserung der wissenschaftlichen Gleichung gemacht wurde. Das National Bureau of Standards in Washington D.C. hat ein ausgedehntes Forschungsprogramm über Korrelationen der Zustandsgrößen von Wasser und Wasserdampf unternommen, in dessen Verfolg nach über zehnjähriger Vorarbeit eine derartige neue wissenschaftliche Formulierung der IAPS vorgelegt und nach erster Prüfung vorläufig angenommen wurde. Diese neue Gleichung hat alle Aussicht, auf der Vollkonferenz 1984 in Moskau angenommen zu werden, während die Industrie-Gleichung auch dort nicht geändert werden wird. Wir selbst können nur bedauernd feststellen, daß die deutsche Wasserdampfforschung sich keines ministeriellen Wohlwollens mehr erfreut, der Bundesminister für Forschung und Technologie seine bisherige Förderung vielmehr mit Ende des Jahres 1982 im Rahmen allgemeiner Sparmaßnahmen eingestellt hat.

Der Besitz einer zuverlässigen kanonischen Gleichung ermöglicht nicht nur die punktweise Berechnung beliebiger Zustandsgrößen, sondern erlaubt es auch, Zustandsgleichungen für diese Zustandsgrößen aufzustellen, die für besondere Anwendungsfälle einfach sein können, vor allem dann, wenn nur ein beschränkter Anwendungsbereich interessiert. Hierbei könnte man im Interesse einer einfachen Schreibweise auch auf die thermodynamische Konsistenz verzichten. Solche vereinfachten Gleichungen könnten für Regelungszwecke, aber auch zur Vorausberechnung von Schadensfällen von Nutzen sein. Wir sind gerade damit beschäftigt, die sich hier bietenden, bisher noch nicht voll genutzten Möglichkeiten zu untersuchen.

Transportgrößen

Neben den thermodynamischen Zustandsgrößen beschäftigt sich die IAPS auch mit den Transportgrößen für Impuls und Wärme, also mit der Viskosität und der Wärmeleitfähigkeit. Für beide sind Rahmentafeln mit Toleranzen aufgestellt und Formulierungen abgeleitet worden. Auch hierbei bewährte sich die internationale Zusammenarbeit und die Herausforderung, die von den Beratungen der IAPS ausging:

Für die Viskosität von Wasser und Wasserdampf sind von 1964 bis 1974 mehr Messungen ausgeführt worden als von 1840 (*Poiseuille*) bis 1964. Im Jahre 1840 beschäftigte sich der französische Arzt *Poiseuille* mit der Blutströmung und definierte dabei jene Größe, die wir heute Viskosität nennen.

Bei der Wärmeleitfähigkeit war besonders das Verhalten im kritischen Gebiet von Interesse. Nach heutigen Präzisionsmessungen bei Wasser und bei anderen Flüssigkeiten nimmt die Wärmeleitfähigkeit im kritischen Punkt einen Extremwert an, ein Befund, der auch durch theoretische Überlegungen gestützt wird.

Neben Viskosität und Wärmeleitfähigkeit sind auch Prandtl-Zahl und kinematische Viskosität berechnet worden und in Tabellen veröffentlicht. In absehbarer Zeit werden diese Daten auch für schweres Wasser vorliegen.

Elektrochemische Daten, Kraftwerkschemie

In letzter Zeit hat sich die IAPS auch mit jenen Größen befaßt, die für das elektrochemische Verhalten von Wasser und Wasserdampf maßgebend sind und die das Verständnis für Korrosionsvorgänge erleichtern sollen. Als erste Größen sind die statische Dielektrizitätskonstante (auch statische Permittivität genannt) und das Ionenprodukt behandelt und als Formulierungen veröffentlicht worden. Hier bewährte sich die Strategie der IAPS, zunächst Rahmentafeln mit ihren Toleranzen aufzustellen und daraus nach kritischer Diskussion in einem internationalen Gremium Formulierungen abzuleiten. Eine besondere Arbeitsgruppe befaßt sich mit der Chemie des Kreislaufwassers, also mit thermochemischen Zustandsgrößen verdünnter Lösungen, wie Löslichkeiten oder Verteilungskoeffizienten in Abhängigkeit von Druck, Temperatur und pH-Wert. Die behandelten Systeme sind in erster Linie Fe_xO_y , SiO_2 , NaOH und NaCl . Um noch fehlende Versuchswerte beizubringen, ist eine internationale Zusammenarbeit verabredet, an der sowohl Hochschulinstitute als auch industrielle Forschungseinrichtungen beteiligt sind. Die ersten Löslichkeitsdiagramme sind in absehbarer Zeit zu erwarten.

Abschließende Bemerkungen

Allein durch eine internationale Zusammenarbeit über mehr als 50 Jahre ist unsere heutige Kenntnis über die Eigenschaften von Wasser und Wasserdampf zustande gekommen. Dieser Aufwand hat sich gelohnt! Der heutige hohe Stand der Technik in thermischen Kraftwerken wäre ohne diese begleitende Forschungsarbeit nicht möglich.

Die Tätigkeit der IAPS und ihrer Arbeitsgruppen ist unverändert auf die Lösung praktischer Probleme gerichtet. Man muß zubilligen, daß zur Lösung solcher Probleme umfangreiche, schwierige und damit kostspielige Vorarbeiten im theoretischen wie im experimentellen Bereich erforderlich sind.

Es ist vernünftig, für bestimmte Aufgaben der Praxis einfache Zustandsgleichungen zu verwenden. Aber das setzt voraus, daß man daneben die möglichst vollkommene, kanonische Stammgleichung besitzt, um weiteren Anforderungen genügen zu können.

Neben ihren klassischen Aufgaben behandelt die IAPS heute auch Fragen der Elektrochemie und der Chemie verdünnter wässriger Lösungen, um damit die Grundlagen zur Behandlung von Problemen der Korrosion und der Ablagerungen im Kraftwerksbetrieb zu liefern.

Nur die aktive Teilnahme an dieser internationalen Gemeinschaftsforschung gibt auch die Möglichkeit, die Belange der nationalen Industrie in die Beratungen internationaler Gremien einzubringen.