

Verleihung der Ehrendoktorwürde an Professor Wolfgang Wagner



Technische Universität Dresden
18. Mai 2015

Programm

EINZUG DES PRÄSIDIUMS

MUSIK

BEGRÜßUNG DURCH DEN REKTOR DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT
DRESDEN

Prof. Dr.-Ing. habil. DEng/Auckland Dr. h. c. mult. Hans Müller-Steinhagen

BEGRÜßUNG DURCH DEN DEKAN DER FAKULTÄT MASCHINENWESEN

Prof. Dr.-Ing. habil. Ralph Stelzer

GRÜßWORT DES VIZEPRÄSIDENTEN UND VORSITZENDEN DES
DEUTSCHEN NATIONALEN KOMITEES DER IAPWS

Prof. Dr.-Ing. habil. Hans-Joachim Kretzschmar

LAUDATIO

Prof. Dr. rer. nat. habil. Cornelia Breitkopf

VERLEIHUNG DER EHRENDOKTORWÜRDE

FESTVORTRAG DES EHRENPROMOVENDEN

Prof. em. Dr.-Ing. habil. Wolfgang Wagner

„Von Beginn an bis heute – meine ersten naiven Ideen und die erreichten
Forschungsergebnisse“

MUSIK

AUSZUG DES PRÄSIDIUMS

BEGRÜßUNG DURCH DEN REKTOR DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT DRESDEN

PROF. DR.-ING. HABIL. DENG/AUCKLAND DR. H. C. MULT. HANS
MÜLLER-STEINHAGEN

Spektabilitäten,

sehr geehrte Damen und Herren,

mit Musik wurden wir feierlich auf den heutigen Festakt anlässlich einer ganz besonderen akademischen Ehrung eingestimmt. Dazu möchte ich Sie sehr herzlich im wunderbaren Festsaal des Rektorats unserer Universität begrüßen.

Der Senat der Technische Universität Dresden hat auf seiner Sitzung am 12.09.2014 auf Vorschlag der Fakultät Maschinenwesen beschlossen, Herrn Prof. Dr. Wolfgang Wagner die Würde des

Doktor der Ingenieurwissenschaften Ehren halber,

Dr.-Ing. e. h. zu verleihen.

Ich freue mich sehr, Sie sehr geehrter Herr Prof. Wagner hierzu begrüßen zu können und mit Ihnen auch Ihre Gattin Frau Anneliese Wagner sowie zahlreiche Freunde und berufliche Weggefährten. Die Festversammlung zeigt, welche Wertschätzung Sie genießen.

Wir haben uns heute in im Festsaal des Rektorats versammelt, um Herrn Professor Emeritus Doktor-Ingenieur Habilitatus Wolfgang Wagner mit der Ehrendoktorwürde auszuzeichnen. Er hat sich in seiner 31jährigen Tätigkeit als Ordinarius an der Ruhr-Universität Bochum und darüber hinaus bis zum heutigen Tag der Thermodynamik verschrieben und wesentliche Grundlagen für die Energie-, Verfahrens-, Umwelt- und Chemietechnik erarbeitet.

Die Forschungsarbeiten von Herrn Prof. Wagner liegen im Bereich der Stoffdaten-Thermodynamik. Werte der thermodynamischen Zustandsgrößen, sogen. Stoffdaten, wie Dichte, Enthalpie, Entropie, Wärmekapazität, Isentropenexponent, Schallgeschwindigkeit und weitere werden für die Auslegung und den Betrieb von Anlagen und Apparaten der Energie-, Verfahrens-, Chemie- und Umwelttechnik benötigt. Diese werden mit Zustandsgleichungen berechnet.

Sollen die berechneten Zustandsgrößen im Rahmen von Gewährleistungsfragen und Abrechnungen von großen Stoffmengen, beispielsweise beim Transport von Erdgas und Ethy-

len in Pipelines benutzt oder zur Auslegung von Großanlagen, wie Kraftwerken und Gasverflüssigungsanlagen, verwendet werden, können die Zustandsgleichungen gar nicht genau genug sein, d.h., sie sollten Referenzqualität haben.

Vor diesem Hintergrund ist die Entwicklung der hochgenauen Zustandsgleichungen zu sehen, die am Lehrstuhl von Herrn Prof. Wagner international führend entwickelt wurden. Zwei herausragende Aspekte seiner wissenschaftlichen Tätigkeit sollen hier stellvertretend näher gewürdigt werden.

1. Entwicklung von Präzisions-Apparaturen zur Messung der Dichte von Gasen und Flüssigkeiten unter Nutzung einer Magnetschwebewaage

Wegen der geschilderten Notwendigkeit hochgenauer Messwerte der Dichte für die Entwicklung von Referenz-Zustandsgleichungen, haben Herr Prof. Wagner und seine Mitarbeiter ein Verfahren für Präzisions-Dichtemessungen von Gasen und Flüssigkeiten über große Bereiche von Druck und Temperatur entwickelt und entsprechende Apparaturen aufgebaut. Dieses Verfahren ist bis zu zehnmal genauer als die Dichtemessverfahren, die zuvor in den 80er Jahren existierten. Eine derart große Genauigkeitssteigerung hatte es noch nicht gegeben.

Diese "Bochumer Dichtemessverfahren" sind nach wie vor die weltweit genauesten Verfahren zur Dichtemessung über weite Bereiche von Druck- und Temperatur. Sie wurden in der Zwischenzeit von den nationalen metrologischen Staatsinstituten der USA, Japans, Großbritanniens und Deutschlands, hier von der Physikalisch Technischen Bundesanstalt, als Dichtestandard übernommen.

2. Entwicklung von Zustandsgleichungen in internationaler Referenzqualität für reine fluide Stoffe und fluide Stoffgemische.

Die am Lehrstuhl von Herrn Prof. Wagner entwickelten Zustandsgleichungen zur Berechnung der thermodynamischen Zustandsgrößen decken den gesamten fluiden Bereich, d.h. das Gasgebiet, das Flüssigkeitsgebiet, das überkritisches Gebiet und das Zweiphasengebiet für den jeweiligen Stoff mit einer einzigen Gleichung ab.

Auf diese Weise wurden für 13 Stoffe extrem genaue Zustandsgleichungen entwickelt, u.a. für Kohlendioxid, Wasser, Sauerstoff, Stickstoff, Argon, Methan, Ethan und Ethylen.

Weitere Gleichungen für Propan und Propylen wurden in Kooperation mit dem National Institute of Standards and Technology (NIST), Boulder, USA, entwickelt.

Alle diese Gleichungen sind als internationale Referenz-Zustandsgleichungen anerkannt. Verschiedene internationale Organisationen haben einige dieser Gleichungen offiziell zu

ihrem Standard erhoben. Dies sind die International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) für Sauerstoff und Methan, die International Association for the Properties of Water and Steam (IAPWS) für Wasser, die Organisation GERG der europäischen Erdgasindustrie für die Erdgas-Zustandsgleichung GERG-2004 und die International Organization for Standardization (ISO) für die Erdgas-Zustandsgleichung GERG-2008. Das zeigt die internationale Bedeutung dieser Zustandsgleichungen aus wissenschaftlicher und technischer Sicht. Eine ganz besondere Bedeutung haben die entwickelten Zustandsgleichungen für Wasser, Wasserdampf und Erdgase.

Sehr geehrte Damen und Herren,

im Folgenden seien einige weitere Fakten genannt, die die wissenschaftliche Reputation von Herrn Prof. Wagner ausweisen:

Herr Prof. Wagner ist Mitinhaber von drei Patenten.

Er kann auf insgesamt 187 referierte Veröffentlichungen in überwiegend internationalen Zeitschriften, darunter auf 12 Monografien und 4 Bücher verweisen.

In mehr als 200 Vorträgen auf internationalen Tagungen hat er die Forschungsergebnisse präsentiert.

Insgesamt 46 bewilligte DFG-Anträge, bei überhaupt nur einer Ablehnung, ermöglichten die herausragenden Forschungen.

Er war 17 Jahre berufenes Mitglied der Editorial Boards des "International Journal of Thermophysics" und des "Journal of Chemical Thermodynamics"; das sind die führenden Fachzeitschriften auf dem Gebiet der Stoffdaten-Thermodynamik.

Seit 1995 ist Herr Prof. Wagner stellvertretender Vorsitzender des Deutschen Nationalen Komitees der International Association for the Properties of Water and Steam (IAPWS).

Von 2002 bis 2006 war Herr Prof. Wagner stellvertretender Vorsitzender des Fachausschusses Thermodynamik der VDI-Gesellschaften Energietechnik und Verfahrenstechnik und von 2002 bis 2006 stellvertretender Vorsitzender des Wissenschaftlichen Arbeitskreises für Technische Thermodynamik (WATT).

Von 1998 bis 2003 war Herr Prof. Wagner Mitglied des VDI-Richtlinienausschusses „Thermodynamische Stoffwerte von feuchter Luft und Verbrennungsgasen“. Die an seinem Lehrstuhl entwickelte VDI-Richtlinie 4670 wurde 2003 veröffentlicht.

Wir freuen uns sehr, Sie, sehr geehrter Prof. Wagner, mit der Verleihung der Ehrendoktorwürde nun zu den Mitgliedern unserer Universität zählen zu dürfen.

BEGRÜßUNG DURCH DEN DEKAN DER FAKULTÄT MASCHINENWESEN

PROF. DR.-ING. HABIL. RALPH STELZER

Magnifizenz,

sehr geehrter Herr Prof. Wagner,

anlässlich der Verleihung der Ehrendoktorwürde möchte ich Ihnen, sehr geehrter Herr Kollege Wagner und der gesamten Festversammlung die herzlichsten Grüße der Leitung der Fakultät Maschinenwesen überbringen. Es ist schon ein ganz besonderes Ereignis in der Universität, wenn Persönlichkeiten, die sich besondere Verdienste in Wissenschaft, Technik, Kultur oder Kunst erworben haben, mit der höchsten akademischen Auszeichnung geehrt werden.

Da Sie, sehr geehrter Herr Kollege Wagner, heute für Ihre Verdienste auf dem Gebiet der Technischen Thermodynamik geehrt werden, sei es mir gestattet, an Ehrendoktoren des Maschinenwesens zu erinnern, die Besonderes auf diesem Gebiet geleistet haben:

Im Jahr 1902 wurde Gustav Zeuner, dem Begründer der wissenschaftlichen Schule der Technischen Thermodynamik an der damaligen TH Dresden und im Jahr 1953 Wilhelm Nußelt für die Formulierung der Grundgesetze der Wärmeübertragung diese Ehre zuteil.

Sehr geehrte Damen und Herren,

der heutige 88. Ehrendoktor des Maschinenwesens seit 1900 ist Herr Professor Emeritus Doktor-Ingenieur Habilitatus Wolfgang Wagner. Er ist der ausgewiesene Experte auf dem Gebiet der Stoffwert-Thermodynamik, einer Grundlagendisziplin des Maschinenbaus, der Verfahrens- und Versorgungstechnik, dessen Lebensleistung gewürdigt werden soll.

Sie, sehr geehrter Herr Kollege Wagner, sind seit 1988 mit unserer Universität und der Fakultät Maschinenwesen sehr eng verbunden. Lassen Sie mich den Werdegang dieser Verbindung näher schildern.

In den 1970er und 1980er Jahren wurden am damaligen Wissenschaftsbereich Technische Thermodynamik der Sektion Energieumwandlung umfangreiche Forschungsarbeiten zur Bereitstellung thermodynamischer Stoffdaten für die Energietechnik unter Leitung von Herrn Prof. Elsner und anschließend von Herrn Prof. Dittmann unter Mitwirkung von Prof. Siegfried Fischer und Dr. Jochen Klinger durchgeführt.

In diesem Zusammenhang gab es eine Reihe Anknüpfungspunkte zu Arbeiten von Herrn Prof. Wagner, Inhaber des Lehrstuhls für Thermodynamik an der Ruhr-Universität Bochum. Die Arbeiten in Dresden hatten eine ganz ähnliche Ausrichtung wie die in Bochum.

Da weder Kontakte, Reisen noch Forschungsk Kooperationen zu westlichen Universitäten erlaubt waren, versuchte Herr Prof. Dittmann, wenigstens eine Kooperation mittels eines Briefes zu initiieren. Nach einer Genehmigungsdauer von einem halben Jahr durch die SED-Kreisleitung durfte der Brief in modifizierter Form schließlich abgesendet werden. Als Folge kam es am 5. Mai 1988, vor nahezu genau 27 Jahren, zu einem Besuch von Herrn Prof. Wagner am Wissenschaftsbereich Technische Thermodynamik und zu einem öffentlichen Vortrag in der Sektion Energieumwandlung. Mehr war zunächst nicht möglich.

Auf der International Conference on the Properties of Water and Steam 1989 in Prag wurden die Kontakte, immer noch reglementiert, fortgesetzt.

Mit dem Thermodynamik-Kolloquium der DDR im November 1989 im TU-Schulungs- und Ferienheim Johanngeorgenstadt, unmittelbar nach der Maueröffnung, an dem Herr Prof. Wagner teilnahm, begann eine enge Zusammenarbeit.

Herr Prof. Wagner half der neu gebildeten Professur Technische Thermodynamik aktiv, den Weg in die neue Wissenschaftswelt zu finden. So lud er 1990 Dr. Hans-Joachim Kretzschmar, inzwischen Inhaber der Professur Technische Thermodynamik an der Hochschule Zittau/Görlitz, zu einer internationalen Tagung nach Bochum ein und öffnete somit den Weg zur internationalen Forschungsk Kooperation auf dem Gebiet der Stoffwert-Thermodynamik.

Herr Tobias Zschunke, damaliger Mitarbeiter in Dresden, jetzt Prorektor Forschung der Hochschule Zittau/Görlitz, durfte 1990 für drei Monate am Lehrstuhl in Bochum arbeiten; Kost und Logis waren inbegriffen.

Die Erarbeitung von DFG-Anträgen unterstützte Herr Prof Wagner direkt, indem er Teile von DFG-Anträgen als Muster zur Verfügung stellte. Als Resultat wurde an der Professur Technische Thermodynamik das erste DFG-Projekt der Fakultät Maschinenwesen genehmigt.

Herr Prof. Wagner übergab eine PRIME-Hochleistungs-Workstation zu einem symbolischen Preis. Hiermit war es möglich, Approximationsrechnungen mit vierfacher Rechengenauigkeit durchzuführen. Dies war die Voraussetzung für die Bearbeitung des DFG-Projektes.

In den Folgejahren begutachtete Herr Prof. Wagner vier an der Professur Technische Thermodynamik erarbeitete Dissertationen. Auch dadurch verschaffte er der Dresdner Technischen Thermodynamik eine wissenschaftliche Reputation in Gesamtdeutschland.

Er ermöglichte der Professur Technische Thermodynamik die direkte Beteiligung an Projekten der International Association for the Properties of Water and Steam (IAPWS). Hierdurch kam es in den Jahren 1991 bis 1997 zur Mitarbeit an der Entwicklung des neuen Industrie-Standards für die thermodynamischen Eigenschaften von Wasser und Wasserdampf, der späteren IAPWS-IF97 Formulation. Dieser Standard wird weltweit für die Berechnung von Kraftwerken und energietechnischen Anlagen benutzt und ist nach wie vor in Garantievorgänge verbindlich.

Im Anschluss wurden in den Jahren bis 2005 an der Professur Technische Thermodynamik gemeinsam mit dem Lehrstuhl für Thermodynamik in Bochum und dem Fachgebiet Technische Thermodynamik der Hochschule Zittau/Görlitz weitere vier ergänzende IAPWS-Standards entwickelt. Es entstanden sieben gemeinsame Veröffentlichungen in international führenden Zeitschriften und das 2008 im Springer-Verlag erschienene Buch "International Steam Tables" sowie die Abschnitte "Properties of Water and Steam" im VDI Heat Atlas 2010 und "Stoffwerte von Wasser" im VDI-Wärmeatlas 2013.

Diese dargestellten Fakten zeigen die besondere Verbundenheit von Herrn Prof. Wagner mit der Professur Technische Thermodynamik und damit mit der Fakultät Maschinenwesen der TU Dresden. Insbesondere an der wissenschaftlichen Neuorientierung nach 1989 hat Herr Prof. Wagner erhebliche Verdienste. Die in den Folgejahren entstandenen gemeinsamen Forschungsergebnisse führten zur Entwicklung der Professur Technische Thermodynamik auf dem Gebiet, Thermodynamische Stoffeigenschaften, in eine international führende Position.

Sehr geehrter Herr Kollege Wagner,

es war mir ein Bedürfnis, Ihr besonderes Engagement für die Fakultät Maschinenwesen und damit für die Technische Universität Dresden neben Ihren außerordentlichen wissenschaftlichen Verdiensten, die gleich in der Laudatio dargestellt werden, zu würdigen.

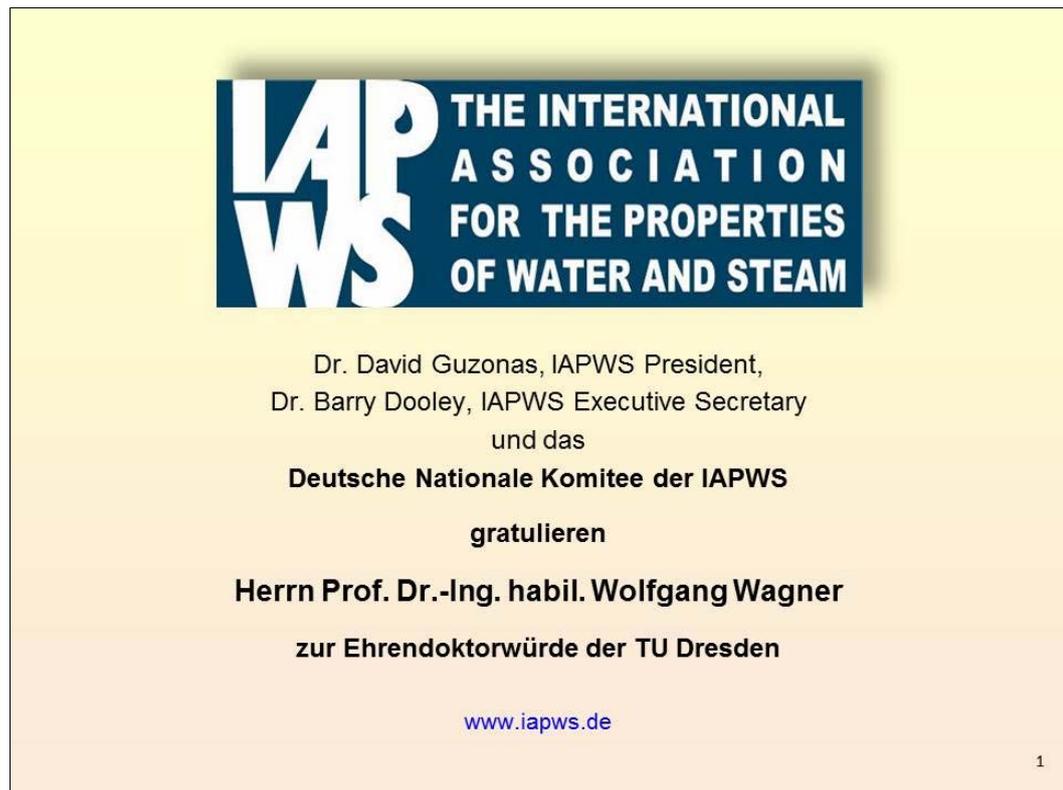
Ihnen, sehr geehrter Herr Prof. Wagner, möchte ich zu dieser besonderen akademischen Ehrung sehr herzlich gratulieren und Ihnen gleichzeitig dafür danken, dass Sie diese auch angenommen haben.

Ich begrüße Sie als Angehöriger der Fakultät Maschinenwesen der Technischen Universität Dresden.

GRUßWORT DES VIZEPRÄSIDENTEN UND VORSITZENDEN DES DEUTSCHEN NATIONALEN KOMITEES DER IAPWS

PROF. DR.-ING. HABIL. HANS-JOACHIM KRETZSCHMAR

Magnifizienz, Spektabilitäten, sehr geehrte Mitglieder des Senats,
meine Damen und Herren Festgäste,
sehr geehrter Herr Prof. Wagner, sehr geehrte Frau Wagner,
im Namen des Präsidenten Dr. David Guzonas, des Exekutiv-Sekretärs Dr. Barry Dooley und
des Deutschen Nationalen Komitees gratuliere ich Ihnen zur Verleihung der Ehrendoktorwürde
und überbringe die herzlichsten Glückwünsche der International Association
for the Properties of Water and Steam, abgekürzt und eingedeutscht IAPWS und im Folgenden
so bezeichnet.



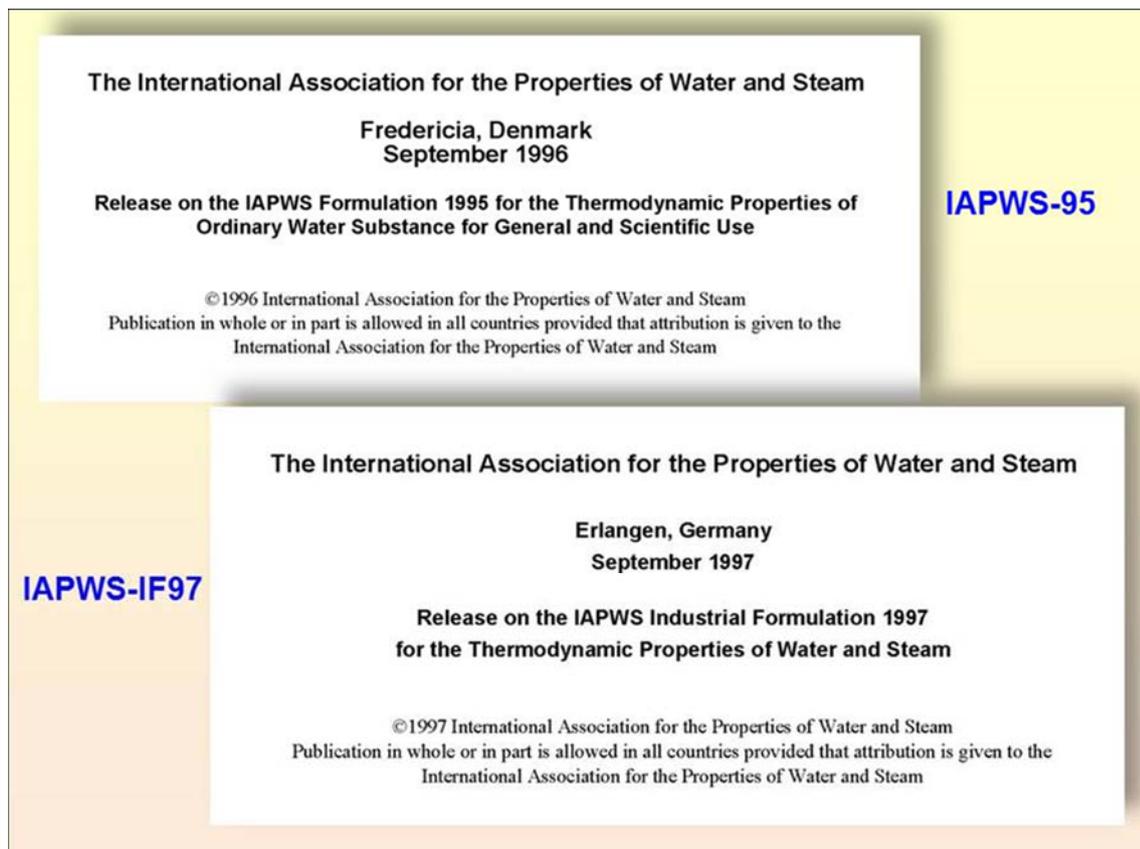
Über einen Zeitraum von mehr als 25 Jahren haben Sie mit Ihrem Lehrstuhl an der Ruhr-Universität Bochum die grundlegenden IAPWS Standards für die Berechnung der thermodynamischen Eigenschaften von Wasser und Wasserdampf entwickelt.

Dabei handelt es sich um den Berechnungs-Standard für generellen und wissenschaftlichen Gebrauch, die 1995 fertig gestellte und als IAPWS-95 bezeichnete Formulation. Im oberen Teil der Folie ist der Kopf der Titelseite des Standards abgebildet.

Parallel haben Sie in Zusammenarbeit mit der Professur für Technische Thermodynamik der Technischen Universität Dresden den Standard für industriellen Gebrauch, die Industrie-Formulation IAPWS-IF97, erarbeitet. Der untere Teil der Folie zeigt die Titelseite dieses 1997 verabschiedeten Standards.

Hierbei muss man wissen, dass, auf Grund eines Übereinkommens zwischen der ISO und der IAPWS, die IAPWS-Standards ISO-Status haben.

Beide genannte Standards gelten noch heute. Die Kraftwerksindustrie nutzt die Berechnungsalgorithmen der Industrie-Formulation IAPWS-IF97 weltweit. Für Garantieberechnungen von energietechnischen Anlagen ist die IAPWS-IF97 international verbindlich.



Weitere IAPWS-Standards für die Berechnung der thermodynamischen Eigenschaften von Eis, für Schmelzdruck, für Sublimationsdruck, und Gleichungen für die Eigenschaften der

siedenden Wasserflüssigkeit und des gesättigten Wasserdampfes stammen von Ihrem Lehrstuhl.

Mit Ihren ausgearbeiteten Dokumenten haben Sie die Qualität der IAPWS Standards auf eine völlig neue Stufe gehoben. Ihre brillanten Vorträge als Deutscher in Englisch auf IAPWS-Konferenzen sind legendär. Sie haben sich in der IAPWS höchste Anerkennung und Achtung erworben.

Das folgende Foto zeigt Sie während der IAPWS Konferenz 2004 in Kyoto im Gespräch mit Dr. Jim Bellows, damaliger Vorsitzender des amerikanischen Nationalen Komitees der IAPWS, und Frau Dr. Katja Knobloch, damalige Promotionsstudentin an der Dresdner Professur für Technische Thermodynamik, jetzt Siemens Erlangen.



14th IAPWS International Conference on the Properties of Water and Steam

3

Auch national bestimmen Sie als stellvertretender Vorsitzender seit Jahren die Arbeit des Deutschen Nationalen Komitees der IAPWS mit.

Sie haben in den vergangenen 25 Jahren, wie kein anderer, die IAPWS international und national in Deutschland geprägt.

Meine Damen und Herren,

hierfür hat die IAPWS Herrn Prof. Wagner geehrt, 1998 mit dem Honorary-Fellow-Award und 2008 mit dem Gibbs-Award, der höchsten Auszeichnung der IAPWS, die nur aller fünf Jahre vergeben wird.



IAPWS Honorary Fellow Award 1998



Gibbs Award 2008 der IAPWS

4

Dass Sie, sehr geehrter Herr Prof. Wagner, gerade hier in Dresden von der Technischen Universität die Ehrendoktorwürde erhalten, ist besonders zu begrüßen. Sie haben, wie bereits von Dekan geschildert, die Professur Technische Thermodynamik nach 1990 bei der Entwicklung des Industrie-Standards IAPWS-IF97 mit beteiligt und in den Folgejahren gemeinsam mit den Dresdnern weitere fünf ergänzende IAPWS-Standards entwickelt. Die Dresdner Professur Technische Thermodynamik wurde so zu einem anerkannten Partner der IAPWS.

Erwähnt sei, dass im kommenden Jahr die IAPWS Konferenz hier in Dresden stattfinden wird.

Im Namen der IAPWS und insbesondere des Deutschen Nationalen Komitees möchte ich unsere Freude zum Ausdruck bringen, dass Ihr Lebenswerk auf dem Gebiet der Stoffdaten-Thermodynamik mit der Ehrenpromotion gewürdigt wird.

Wir wünschen Ihnen weiterhin beste Gesundheit, Schaffenskraft für die noch anstehenden Aufgaben und persönlich alles Gute.

LAUDATIO

PROF. DR. RER. NAT. HABIL. CORNELIA BREITKOPF

Magnifizienz,

Spektabilitäten,

sehr geehrte Mitglieder des Senats der Technischen Universität Dresden,

verehrte Festversammlung,

lieber Herr Prof. Wolfgang Wagner, liebe Frau Anneliese Wagner,

die Verleihung der Ehrendoktorwürde ist die höchste akademische Auszeichnung, die unsere Universität für Personen vergibt, die sich besondere Verdienste in Wissenschaft, Technik, Kultur oder Kunst erworben haben, die der Universität auf besondere Weise verbunden sind oder in der Öffentlichkeit anerkannte Persönlichkeiten sind.

Im Maschinenwesen wurde seit dem Jahr 1900 diese Ehre bisher 87 Persönlichkeiten zuteil.

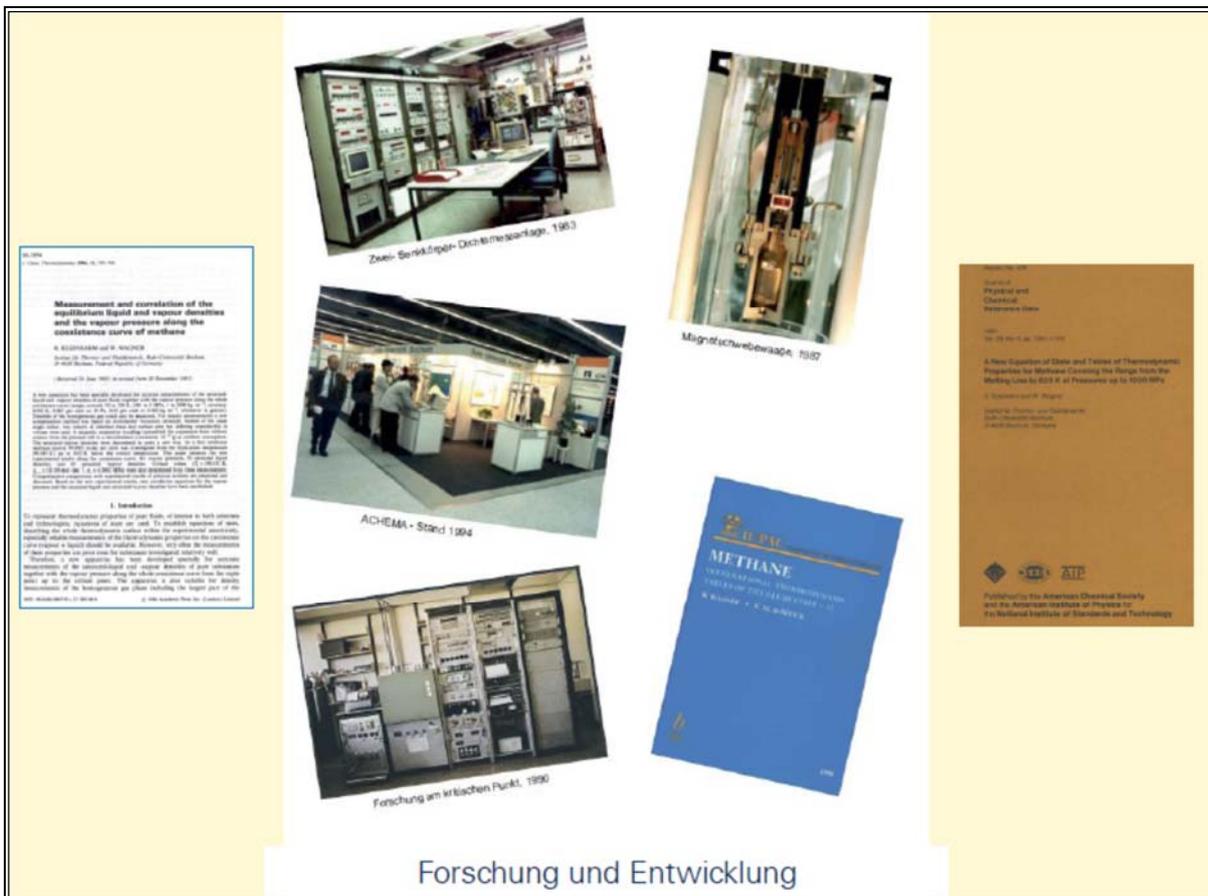
In diese herausragende Gemeinschaft wird heute Prof. Wagner aufgenommen.



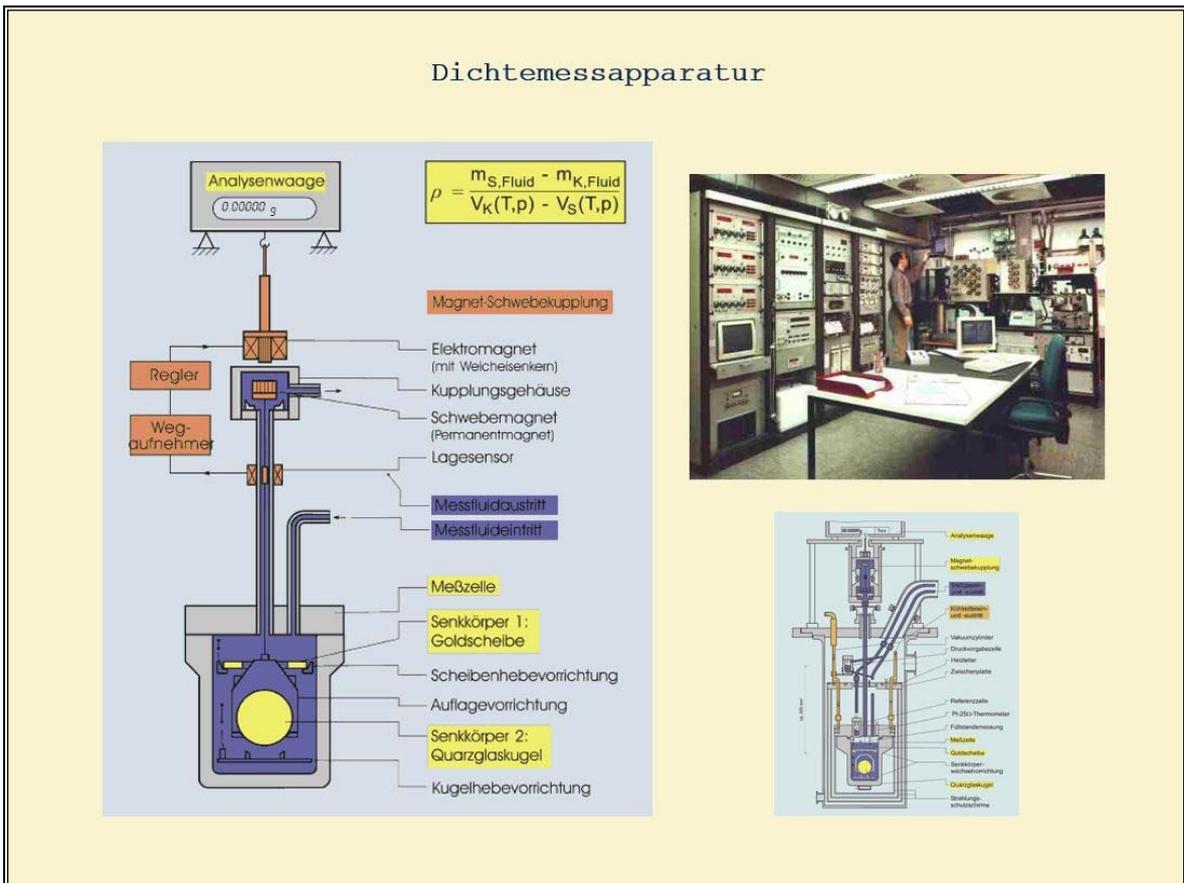
Sehr geehrte Damen und Herren,

Herr Prof. Wagner wurde 1975 auf die C3-Professur für Experimentelle Thermodynamik an der Ruhr-Universität Bochum berufen. 1984 erfolgte dann die Berufung auf die C4-Professur für Thermodynamik an die Fakultät für Maschinenbau der Ruhr-Universität Bochum. Diese begleitete er bis zu seiner Emeritierung im Jahr 2006.

In meiner heutigen Laudatio möchte ich versuchen, die wissenschaftlichen Leistungen von Prof. Wagner zu würdigen, wohlwissend, dass dies in 15 min nicht vollumfänglich zu schaffen sein wird. Es sei mir daher gestattet, einige wissenschaftliche Highlights, die bereits kurz in der Laudatio von Prof. Müller-Steinhagen erwähnt wurden, näher zu beleuchten.

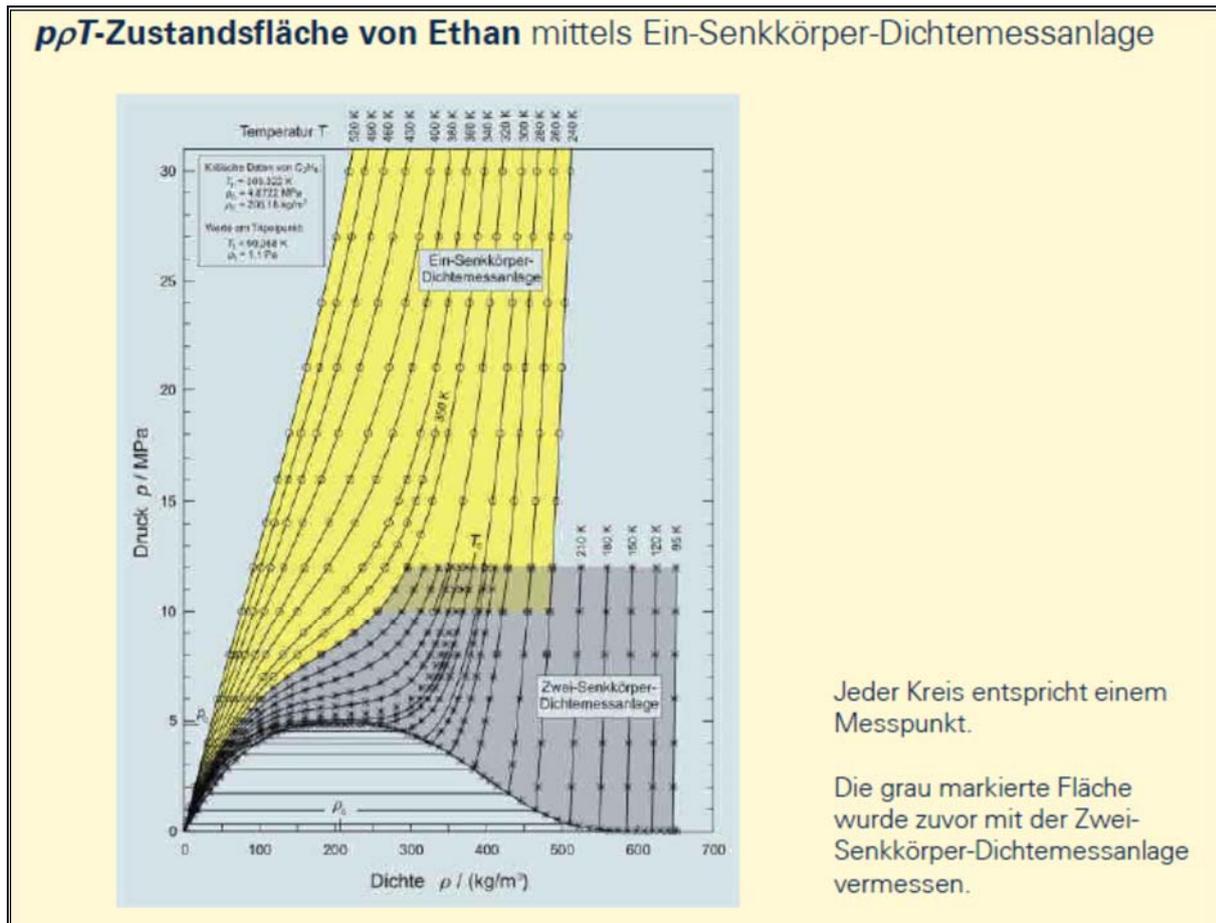


Im wissenschaftlichen Leben von Prof. Wagner spielten Zustandsgleichungen eine herausragende Rolle. Ein zentraler Punkt zur Bestimmung hochgenauer Zustandsgleichungen ist ohne Frage die Dichte der zu beschreibenden Stoffe. Unter Leitung von Prof. Wagner wurde eine Präzisions-Apparatur zur Messung der Dichte von Gasen und Flüssigkeiten unter Nutzung einer Magnetschwebewaage aufgebaut, die neue Horizonte eröffnete.



Die enorme Steigerung der Genauigkeit wurde hier durch eine völlig neuartige Anwendung des Auftriebsverfahrens nach Archimedes erreicht. Statt des üblichen *einen* Senkkörpers werden in diesem Verfahren *zwei* Senkkörper verwendet, die speziell aufeinander abgestimmt sind, d.h. mit möglichst unterschiedlichem Volumen, aber gleicher Masse, gleicher Oberflächengröße und gleichem Material an der Oberfläche. Bei diesem Zwei-Senkkörperverfahren werden nun nicht die absoluten Auftriebskräfte der beiden Senkkörper gemessen, sondern direkt die *Differenz* der Auftriebskräfte, die auf die beiden Senkkörper im Fluid wirken, dessen Dichte gemessen werden soll. Durch diese spezielle Differenzmessung werden alle Effekte, die beim herkömmlichen Archimedischen Prinzip die Genauigkeit reduzieren, automatisch kompensiert.

Die entwickelte Dichtemessanlage deckt dabei einen Temperaturbereich von -213 bis 260 °C bei Drücken von bis zu 300 bar ab. Exemplarisch sei hier die Zustandsfläche für Ethan gezeigt, die mit der neu entwickelten Apparatur vermessen wurde.



Die erreichte Unsicherheit dieser Dichtemessungen beträgt i. A. zwischen 0,01% bis 0,02%. Mit dieser Methode wurde die Messunsicherheit im Vergleich zu bisher üblichen Messungen um das 10fache verbessert.

Präzisions-Dichtemessungen im Gas- und Flüssigkeitsgebiet wurden im Laufe der Jahre für 20 Reinstoffe durchgeführt. Das sind die weltweit genauesten Dichtemesswerte für diese Stoffe und rechtfertigen somit die in der Abbildung gegebene Überschrift „Weltrekord in Sachen Messgenauigkeit“.

Berührungslose Gasdichtemessung halbiert Abweichungen

Weltrekord in Sachen Meßgenauigkeit



Prof. Wolfgang Wagner hat das Präzisionsmeßverfahren entwickelt.

DORSTEN. Als Archimedes irgendwann im 3. Jahrhundert vor Christus in seine gut gefüllte Badewanne stieg, lief das Wasser über. Das Malheur soll der griechische Mathematiker mit dem Ausruf „Heureka“ quittiert haben, leitete er doch aus diesem feuchten Zwischenfall das Archimedische Prinzip ab: Der Auftrieb eines in eine Flüssigkeit getauchten Körpers entspricht dem Gewicht der von ihm verdrängten Flüssigkeitsmenge. Und was hat das mit der Gasmessung zu tun? Nun, das Prinzip des griechischen Denkers findet auch in einer neuen Gasdichtemeßapparatur (GDMA) in Dorsten Anwendung. Das besondere daran: Sie ist momentan weltweit die genaueste Einrichtung dieser Art.

Anlässlich der Einweihung des Gaszähler-Prüfzentrums „pigasr“ in Dorsten (wir berichteten) wurde die Anlage zahlreichen Fachleuten vorgestellt. Mit ihr werden Betriebsdichteaufnehmer kalibriert, also geeicht, die in der Erdgas-Transportleitungen bei der Messung der Gas mengen eingesetzt werden. Die GDMA dient dabei als Bezugsgröße. Sie selbst erreicht eine Genauigkeit von 0,02 Prozent; die an ihr überprüften Betriebsdichteaufnehmer bringen es auf eine Meßgenauigkeit von 0,05 Prozent. Der Fortschritt liegt für den Leiter der Abteilung Gasmessung, Ottokar Brädt, auf der Hand: Die bisher üblichen Kalibrier genauigkeiten mit

Methan von 0,1 Prozent für Betriebsdichteaufnehmer galten in Fachkreisen schon als ausgesprochen gut. Mit der neuen Technik wurde der Wert noch einmal halbiert. Der Nutzen für die Gaswirtschaft: Die Abrechnungen werden noch genauer. Entwickelt wurde das Präzisionsverfahren von Prof. Wolfgang Wagner und Dr. Reiner Kleinrahm am Lehrstuhl für Thermodynamik der Universität Bochum. Für Ruhgas bauten sie gemeinsam mit Dr. Manfred Jaeschke (Abteilung Physik/TABP) eine einsatzfähige Anlage in Dorsten auf. Wie funktioniert nur die neue Gasdichtemeßapparatur? Vereinfacht

dargestellt läuft das Verfahren so ab: In einem zylindrischen Behälter liegen zwei geometrische Körper, eine Kugel und ein Ring, auf speziellen Auflagen. Wird Gas in diesen Zylinder geleitet, kann dessen Dichte in zwei Meßschritten ermittelt werden. Nacheinander werden die Kugel und der Ring mit Hilfe eines Elektromagneten angehoben. Sie „hängen“ dann mit einer genau definierten Zugkraft wie an einer unsichtbaren Kordel. Dieser Kunstgriff trägt mit zur hohen Präzision der Messung bei. Das Ergebnis wird nämlich nicht durch mechanische Teile beeinflusst. Kugel und Ring schweben nacheinander in getrennten Meßvorgängen im Gas. Je nach Dichte des eingeleiteten Gases haben die beiden Körper



Mit diesen hochgenauen Messwerten waren nun die Voraussetzungen gegeben, um Zustandsgleichungen in bisher nicht erreichter Genauigkeit zu entwickeln.

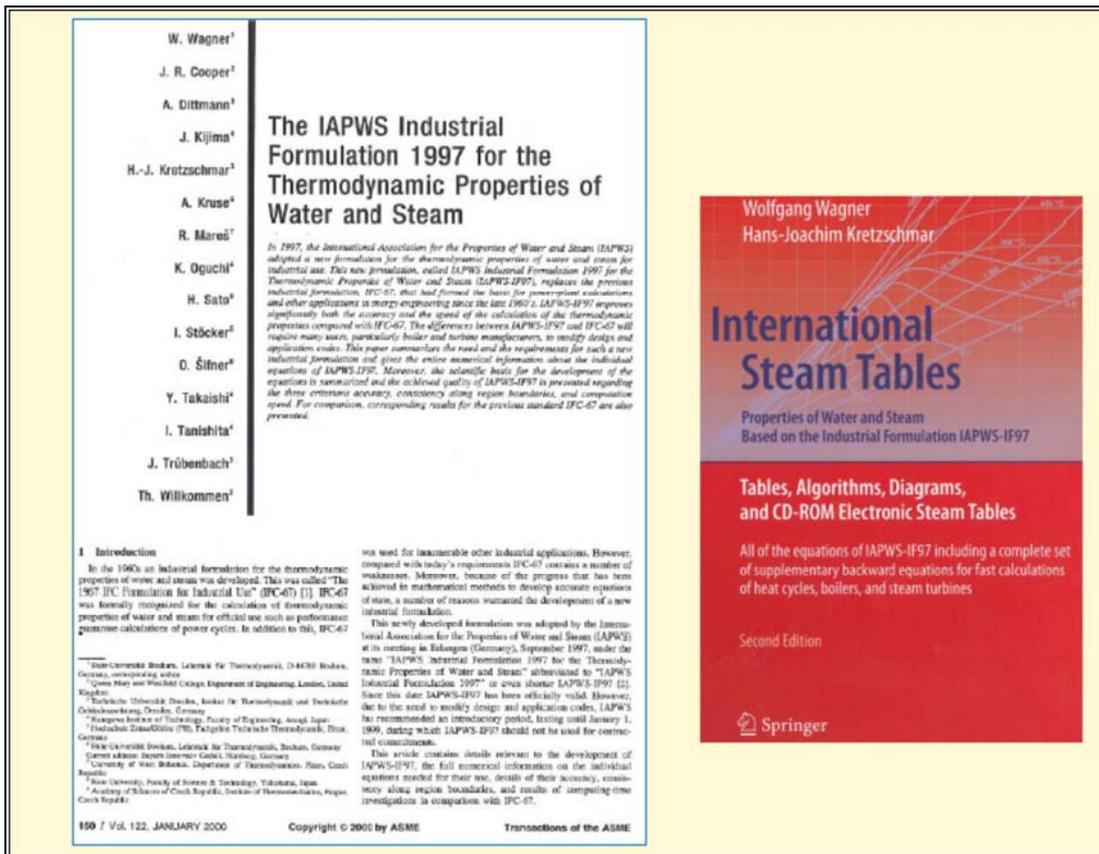
Die entwickelten Zustandsgleichungen in internationaler Referenzqualität für reine fluide Stoffe und fluide Stoffgemische wurden dabei in der Form von Fundamentalgleichungen der freien Energie als Funktion der Dichte und Temperatur formuliert. Bei diesem Konzept lassen sich alle Zustandsgrößen aus der Kombination von Ableitungen nach der Dichte und der Temperatur der Fundamentalgleichung berechnen, vorausgesetzt diese Fundamentalgleichung hat die hierfür notwendige Genauigkeit.

Entwickelte Referenz-Zustandsgleichungen				
Referenz-Zustandsgleichungen für folgende Stoffe				
Sauerstoff	[28, 34]	(IUPAC-Standard)	n-Butan	[157]
Methan	[55, 86]	(IUPAC-Standard)	Isobutan	[157]
Kohlendioxid	[89]		Schwefelhexafluorid	[171]
Argon	[114]		Propan*	[173]
Ethylen	[122]		Propylen*	[186]
Stickstoff	[123]		Erdgase	
Wasser	[127]	(IAPWS-Standard)	und andere Gemische	
Ethan	[156]		GERG-2004	[162] GERG-Standard
			GERG-2008	[182] ISO-Standard

Bahnbrechend waren für diese wissenschaftlichen Erkenntnisse die Arbeiten im Rahmen der Habilitation von Herrn Prof. Wagner. Dieses Verfahren wird noch heute weltweit als das Standard-Verfahren zur Entwicklung von Zustandsgleichungen verwendet.

Besonders hervorzuheben sind die wissenschaftlichen Beiträge, die Herr Prof. Wagner im *Bereich der Standardisierung* geleistet hat. Beispielhaft sei zunächst der wissenschaftliche Standard *IAPWS-95 Formulation für Wasser und Wasserdampf* erwähnt.

Neben diesem wissenschaftlichen Standard wurde ein **Industrie-Standard** für die thermodynamischen Zustandseigenschaften von Wasser und Wasserdampf, die Industrial Formulation **IAPWS-IF97**, entwickelt. Diese Zustandsgleichung ist von der Struktur und den gewählten unabhängigen Variablen, Druck und Temperatur, so aufgebaut, dass sich extrem kurze Anwendungsrechenzeiten ergeben. Das war eine der Hauptforderungen der internationalen Kraftwerksindustrie.



Unter Leitung von Herrn Prof. Wagner wurde dieser Industrie-Standard als Kooperation am Lehrstuhl für Thermodynamik der Ruhr-Universität und der Professur Technische Thermodynamik der Fakultät Maschinenwesen der TU Dresden unter der damaligen Leitung von Herrn Prof. Achim Dittmann, der heute leider nicht hier sein kann, entwickelt.

In den Folgejahren war Herr Prof. Wagner an vier ergänzenden Standards für die IAPWS-IF97 beteiligt, die federführend in Dresden unter Leitung von Herrn Prof. Dittmann in Kooperation Herrn Prof. Hans-Joachim Kretzschmar, Hochschule Zittau/Görlitz, entwickelt wurden.

Sowohl der wissenschaftliche Standard IAPWS-95 als auch der Industrie-Standard IAPWS-IF97 sowie die ergänzenden Standards sind noch heute international *verbindlich*.

Eine praktische Anwendung derartiger Standards ist in der folgenden Abbildung gezeigt. Zur Berechnung von Prozessen mit Erdgas, wie der Förderung, des Transports durch Pipelines, der Speicherung in Untertagespeichern, der Verflüssigung und dem Transport von verflüssigtem Erdgas in LNG-Tankern wurde von Herrn Prof. Wagner und Herrn Dr. Kunz eine **Zustandsgleichung für Erdgase** entwickelt. Dies geschah in Zusammenarbeit mit der internationalen Erdgas-Industrie, der GERG-Gruppe. Diese Gleichung deckt erstmals das

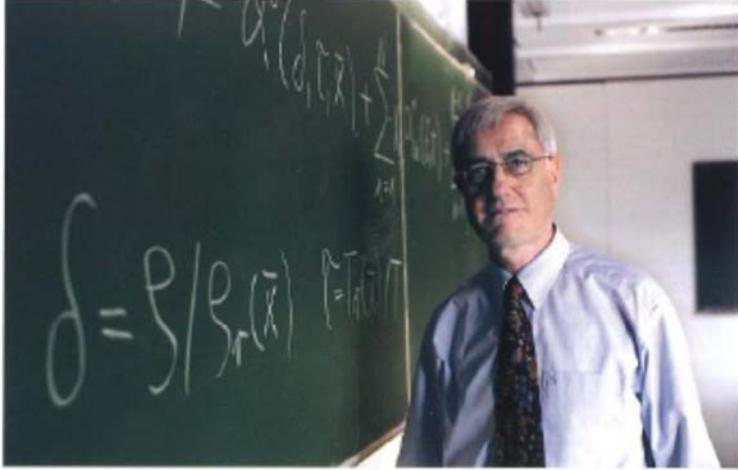
gesamte fluide Gebiet von Erdgasen, d. h. Gas, Flüssigkeit, überkritisches Gebiet und Phasengleichgewicht Gas-Flüssigkeit, mit hoher Genauigkeit ab.

Thermo- und Fluidodynamik maschinisch: EUTM 2014

Erdgas-Zustandsgleichung als internationaler Standard: Die ganze (thermodynamische) Wahrheit steckt in einer Formel

W. Wagner
O. Kunz

Jährlich rechnen Käufer und Verkäufer für 80 Milliarden Euro Erdgas ab. Ingenieure legen Kompressoren für Pipelines und Erdgasspeicher aus oder entwickeln neue Verflüssigungsanlagen. Doch kein Erdgas gleicht dem anderen. Bislang ließ sich das Vielkomponentengemisch nicht einheitlich und damit nur ungenau beschreiben. Ingenieure haben jetzt „die Universalformel“ entwickelt – und die Händler demnächst 28 Millionen Euro mehr oder weniger pro Jahr in der Tasche.



Erdgas ist gleich nach Erdöl der weltweit wichtigste Primärenergieträger (s. Abb. 2). Dabei gibt es das Erdgas eigentlich nicht. Der einheitliche Begriff „Erdgas“ steht für ein Vielkomponenten-Gemisch mit dem Hauptbestandteil Methan. Daneben kommen im Erdgas vor allem Stickstoff, Kohlendioxid, Ethan, Propan und Butan vor, aber auch weitere Bestandteile wie Sauerstoff, Wasserstoff, Helium oder Wasser. Je nach Fördergebiet enthält der fossile Energieträger diese Komponenten in sehr unterschiedlichen Konzentrationen. Erdgas wird überwiegend zur Heizung, zur Stromerzeugung und als Rohstoff in der chemischen Industrie eingesetzt. Der Primärenergieträger hat zwei wesentliche Vorteile: Seine Vorkörner räumen erheblichen länger als die Erdöle, und es trägt in viel geringerem Maße zum Treibhauseffekt bei als alle anderen fossilen Energieträger. Bei der Verbrennung von Erdgas entstehen 25 bis

Abb. 2: Er macht als alle Studierendenplakatist - Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Wagner erklärt seine Zusammenfassung für Erdgas an der Tafel.

Die Gleichung gilt für Gemische aus beliebigen Kombinationen von 21 Komponenten. Dies sind die fünf Hauptkomponenten Methan, Stickstoff, Kohlendioxid, Ethan und Propan, höhere Kohlenwasserstoffe bis zum n-Dekan und weitere Komponenten, z. B. Wasserstoff, Schwefelwasserstoff, Wasser und Helium. Der normale Gültigkeitsbereich erstreckt sich von -183 bis 177 °C und Drücken bis 350 bar und der erweiterte Bereich von -213 bis 427 °C und Drücken bis 700 bar. Entsprechend dem Jahr der Fertigstellung wird die Gleichung als GERG-2008 bezeichnet und wird noch in diesem Jahr zum Standard ISO 20765 erhoben.

Meine Damen und Herren,

neben seinen herausragenden Erfolgen in der Forschung, gibt es einen weiteren Aspekt, der mir besonders am Herzen liegt: die Rolle, die Herr Prof. Wagner als Hochschullehrer an der RUB einnahm. Als Hochschullehrer war für ihn die Lehre ebenso wichtig wie Forschung und stand gleichbedeutend im Vordergrund.



Seine Vorlesungen mit Demonstrationsexperimenten waren legendär. Beispielsweise zeigte er im Hörsaal vor 500 Studierenden die Wirkungsweise eines Geysirs, "Nickenten" zur Demonstration der Verdunstungskühlung und die Verflüssigung von Stickstoff.

Versuche in der Vorlesung von Prof. Wagner
„Grundlagen der Thermodynamik“ an der RUB

Stickstoffverflüssigung

Kochen durch Kühlung

Der Apparat wurde im Rahmen einer Studienarbeit von Studierenden entworfen und gebaut

Nickente

Demonstration von Verdunstungskühlung (links) und Erhöhung des Dampfdrucks durch Wärmezufuhr (rechts)
Prinzip „kühler Kopf“ oder „heißer Hintern“

Es gelang ihm mit einem ausgezeichneten Skript, dazu angepassten Vorlesungen und wohldurchdachten Übungen das Attribut "Angstfach" für die Thermodynamik zu beseitigen. Sein Skript wird nach wie vor an zahlreichen Universitäten und Hochschulen als Grundlage für die Thermodynamik-Ausbildung verwendet.

Auf Grund dieser anschaulichen und verstehbaren Thermodynamik interessierten sich viele Studierenden für eine Tätigkeit als studentische Hilfskraft am Lehrstuhl von Herrn Prof. Wagner. Oft waren es die leistungsstärksten. Sie wurden systematisch über Diplomarbeiten als wissenschaftlicher Nachwuchs aufgebaut. Die so entstanden 43 erfolgreich abgeschlossene Promotionen waren die Grundlage für die geschilderten Erfolge in der Forschung.

Wie auf der Ankündigung seiner Abschiedsvorlesung zu sehen, stellte die *Anschaulichkeit seiner Versuche* einen wesentlichen Aspekt dar, um komplexe Zusammenhänge der Thermodynamik zu vermitteln.

The image shows a flyer for a farewell lecture. It features logos for the Faculty of Mechanical Engineering and the Thermodynamics department at Ruhr-Universität Bochum. The main text is in blue and black, announcing the lecture on July 13, 2006, at 10:15 AM in HIB. It also lists the invited audience: current 4th semester students, former 4th semester students, and all colleagues and staff.

Fakultät Maschinenbau
fortschritt studieren

RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM
THERMODYNAMIK

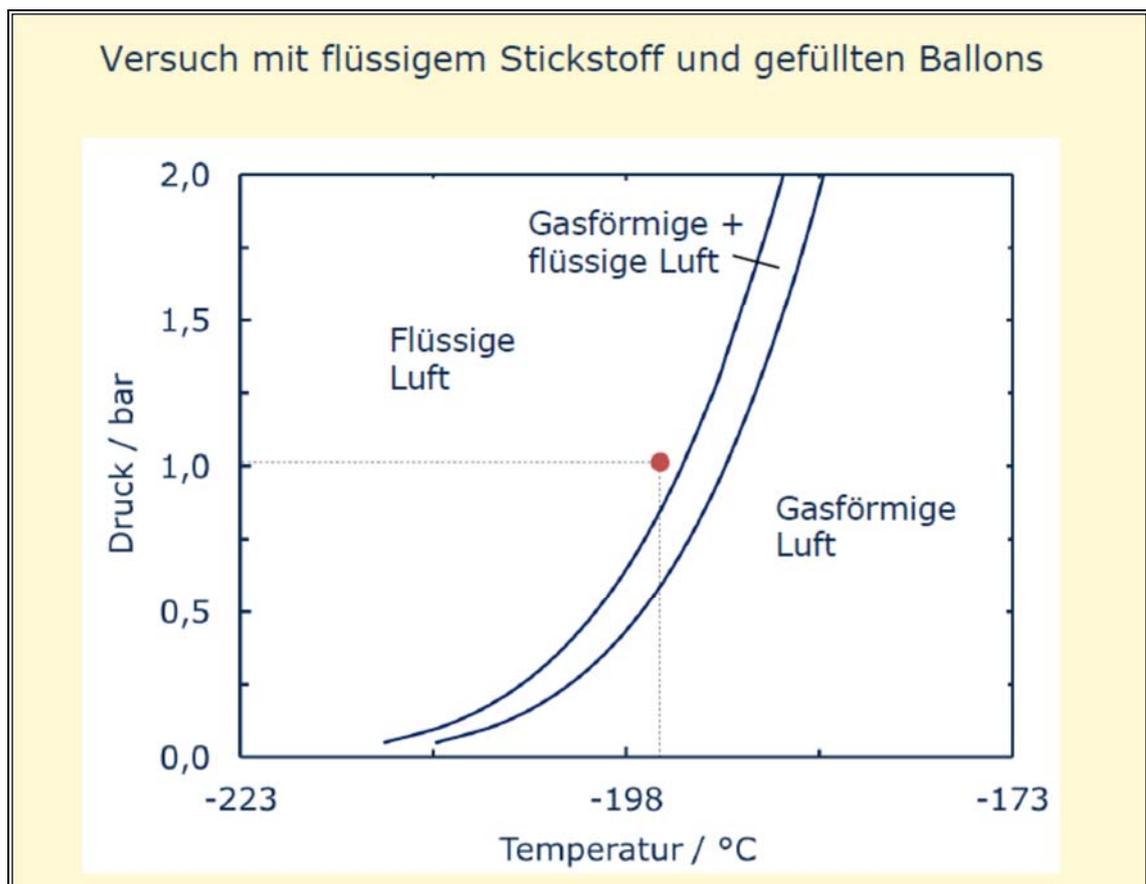
**31 Jahre
„Wagner'sche Thermodynamik“
in Bochum**

**Abschiedsvorlesung
„Thermodynamische Effekte
anschaulich erklärt“**

13. Juli 2006, 10.15 Uhr, HIB

**Eingeladen sind die Studierenden des jetzigen
4. Semesters, die ehemaligen „4. Semester“,
die noch im Hause sind, sowie alle Kollegen,
Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter.**

Um diese Tätigkeit zu würdigen, habe ich mir erlaubt, einen der zahlreichen Versuche herauszugreifen, der wie kein anderer für die angestrebte Anschaulichkeit eines Demonstrationsversuches steht. Es geht um die Vermittlung der thermodynamischen Zusammenhänge zwischen Druck, Temperatur und spezifischem Volumen eines Fluids. Dazu wurden Ballons mit unterschiedlichen Gasen gefüllt, Luft, CO_2 und Helium. Diese werden nun in flüssigen Stickstoff getaucht, so dass die Temperatur von -198 °C des flüssigen Stickstoffs bei Atmosphärendruck vorgegeben ist. Alle drei Gase reagieren entsprechend ihres charakteristischen Phasendiagramms verschieden.



Sehr geehrte Damen und Herren,

Zu all den Würdigungen, die bereits in den Grußworten von Prof. Müller-Steinhagen und von Prof. Kretschmar aufgeführt wurden, kommt heute eine bedeutende Würdigung hinzu, die Ehrenpromotion der Fakultät Maschinenwesen, die der Lebensleistung von Prof. Wagner auf dem Gebiet der Thermodynamik gewidmet ist.

Wir ehren damit einen Wissenschaftler, der stets aufgeschlossen und uneigennützig mit außerordentlich hoher Sachkompetenz, Kreativität, Nachdrücklichkeit, Kollegialität und Selbstdisziplin nach Lösungen gesucht hat und sucht.



Zu all diesen wissenschaftlichen Höchstleistungen hat mit Sicherheit auch seine Begeisterung für den Sport, und insbesondere der Fußball, und die hier nicht gezeigte Freude am Extrem-Fahrradfahren in den Bergen, beigetragen.



Dabei wollen wir jedoch nicht vergessen, dass es immer auch des entsprechenden Verständnisses und Rückhalts durch die Familie für denjenigen bedarf, dessen Handeln an die Belastbarkeitsgrenze und oft auch darüber hinausgeht. Liebe Frau Wagner, Sie haben einen wesentlichen Anteil an den geschilderten Leistungen und Erfolgen und dafür gebührt Ihnen Dank.



Zur Ehrendoktorwürde möchte ich Ihnen, lieber Herr Kollege Wagner, auch im Namen unseres gesamten Teams, ganz herzlich gratulieren und weiterhin Gesundheit, Kraft, Glück und Freude wünschen.



FESTVORTAG DES EHRENPROMOVENDEN

PROF. EM. DR.-ING. HABIL. WOLFGANG WAGNER

Von Beginn an bis heute – meine ersten naiven Ideen und die erreichten Forschungsergebnisse

Magnifizienz, Spektabilitäten, meine Damen und Herren,

zunächst bedanke ich mich ganz herzlich für die Ehre, die mir durch die Verleihung der Ehrenpromotion zuteil wird. Neben der wissenschaftlichen Bedeutung hat diese Ehrung durch die Technische Universität Dresden, die zu den Exzellenz-Universitäten in Deutschland gehört, eine erhebliche emotionale Bedeutung, was mit meinem speziellen Lebensweg zusammenhängt. Ich bin in Ostberlin aufgewachsen und habe zu den neuen Bundesländern ein besonderes Verhältnis. Bedanken möchte ich mich für die Begrüßung durch den Rektor, Herrn Prof. Müller-Steinhagen, durch den Dekan, Herrn Prof. Stelzer, und für die Grußworte des Vizepräsidenten und Vorsitzenden des Deutschen Nationalen Komitees der International Association for the Properties of Water and Steam (IAPWS), Herrn Prof. Kretzschmar. Ich bedanke mich auch bei Frau Prof. Breitkopf für die sehr persönliche Laudatio. Die vier Redner haben Einzelheiten unserer Forschungsarbeiten und meine Arbeiten in Wissenschaftsorganisationen aufgezählt, die ich über die Jahre z. T. schon etwas vergessen hatte. Zu erfahren, welchen Eindruck unsere Arbeiten hinterlassen haben, hat mich emotional doch sehr berührt.

Mein Dank gilt auch den Gutachtern für ihre Arbeit – ich weiß nur zu gut, welcher Aufwand damit verbunden ist. Danken möchte ich aber auch den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der TU Dresden für ihre Arbeit bei der Organisation der Festveranstaltung und den anderen Aufgaben, die für das gesamte Verfahren zu leisten waren.

Nun zu meinem Vortrag.

Sie haben ja schon eine Reihe von Aussagen über die Forschungsergebnisse gehört, die wir in den letzten 40 Jahren erreicht haben. Ich möchte Ihnen nun - aus *meiner* Sicht - in den nächsten etwa 40 Minuten die *Entwicklung unserer Forschung über den Zeitstrahl* schildern.

Ich werde über die folgenden fünf unserer Forschungsbereiche sprechen:

1. Zustandsgleichungen für reine fluide Stoffe
2. Das Bochumer Verfahren für sehr genaue Dichtemessungen über große Bereiche von Druck, Temperatur und Dichte
3. Auswirkungen der hochgenauen Dichtemessungen auf die Bochumer Zustandsgleichungen und Bemerkungen zur Industrie-Formulation für Wasser
4. Die GERG-2008 Zustandsgleichung für Erdgase und andere Gemische
5. Von genauen Dichtemessungen zu kommerziellen Anwendungen
6. Mein Dank

1. Zustandsgleichungen für reine fluide Stoffe

Zustandsgleichungen liefern die Zahlenwerte der thermodynamischen Eigenschaften der Arbeitsstoffe der Energie und Verfahrenstechnik (Wasser, Kältemittel, Stickstoff, Sauerstoff, Methan, Luft, Ammoniak, Erdgas,.....), zum Beispiel zur Berechnung von Gas- und Dampfturbinen, kompletten Kraftwerksprozessen und Kältemaschinen, aber auch von Apparaten zur Stofftrennung in der Verfahrenstechnik und Prozessen mit Erdgasen.

Zustandsgleichung von Jacobsen & Stewart (1973)

$$\begin{aligned}
 \rho = & \rho RT + \rho^2(n_1 T + n_2 T^{0,5} + n_3 + n_4/T^{0,5} + n_5/T + n_6/T^2 + n_7/T^3 + n_8/T^4) \\
 & + \rho^3(n_9 T^2 + n_{10} T + n_{11}/T + n_{12}/T^2 + n_{13}/T^3) \\
 & + \rho^4(n_{14} T + n_{15}) + \rho^5(n_{16} + n_{17}/T) \\
 & + \rho^3(n_{18}/T^2 + n_{19}/T^3 + n_{20}/T^4) \exp(-\gamma\rho^2) \\
 & + \rho^5(n_{21}/T^2 + n_{22}/T^3 + n_{23}/T^4) \exp(-\gamma\rho^2) \\
 & + \rho^7(n_{24}/T^2 + n_{25}/T^3 + n_{26}/T^4) \exp(-\gamma\rho^2) \\
 & + \rho^9(n_{27}/T^2 + n_{28}/T^3 + n_{29}/T^4) \exp(-\gamma\rho^2) \\
 & + \rho^{11}(n_{30}/T^2 + n_{31}/T^3 + n_{32}/T^4) \exp(-\gamma\rho^2)
 \end{aligned}$$

ρ = Druck
 ρ = Dichte
 T = Temperatur

Unsicherheit
in der Dichte ρ :
0,3 % - 0,5 %

Bild 1.1. Zustandsgleichung von Jacobsen und Stewart 1973.

Bild 1.1 zeigt die Zustandsgleichung von Jacobsen und Stewart von 1973. Das ist eine Gleichung explizit im Druck p als Funktion der Dichte ρ und Temperatur T . Sie hat 32 Terme - die Summanden aller (ρT) Funktionen zusammen mit den an Messwerte angepassten Koeffizienten n_i . Die Unsicherheit in der Dichte, die aus einer solchen Gleichung berechnet werden konnte, war etwa 0.3–0.5%.

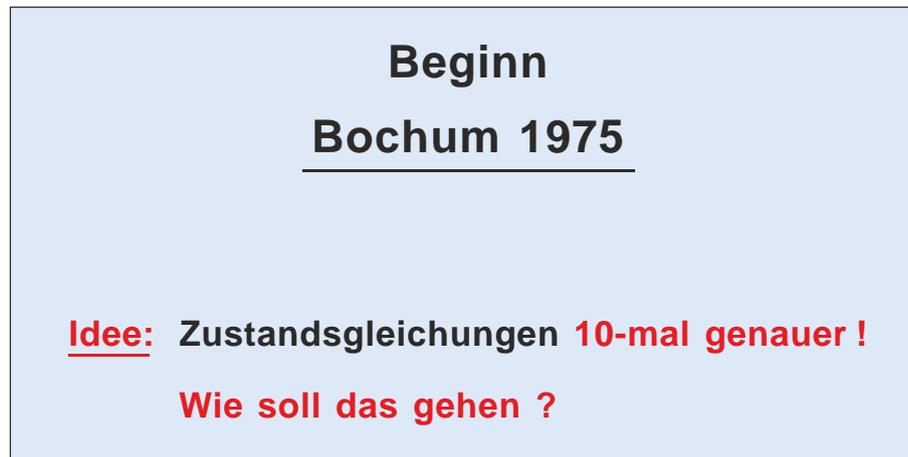


Bild 1.2. Beginn der Forschungsarbeiten in Bochum 1975.

Als ich 1975 Professor an der Ruhr-Universität wurde, musste ich natürlich über zukünftige Forschungsfelder nachdenken.

Wie Bild 1.2 zeigt, hatte ich die naive Idee, dass wir Zustandsgleichungen entwickeln wollten, die *10-mal genauer* sein sollten als die Gleichungen, die es damals gab. Es gibt nur eine Entschuldigung für diese verrückte Idee: Ich war ziemlich jung - und ich bin Berliner. Dazu müssen Sie wissen, dass es in Berlin keine Berge gibt, wenn es aber welche gäbe, dann wären sie höher.

Spaß beiseite: Wie sollte das gehen??

Es gab aber doch schon einen Ansatzpunkt für solche Überlegungen. Die Struktur der bis dahin entwickelten Zustandsgleichungen (also welche Dichte-Temperatur Funktionen) wurde allein auf der Basis von Trial und Error zusammengestellt. Von den in meiner Habilitation entwickelten Dampfdruckgleichungen, die aber deutlich einfacher sind (eine reine Temperaturabhängigkeit) wusste ich, dass eine gezielte Entwicklung der Struktur mit der in der Habilitation entwickelten schrittweisen Regressionsanalyse die Gleichungen signifikant verbessert hat. Bei Zustandsgleichungen (zwei unabhängige Variable, nämlich Dichte und Temperatur) hat das aber nicht funktioniert.

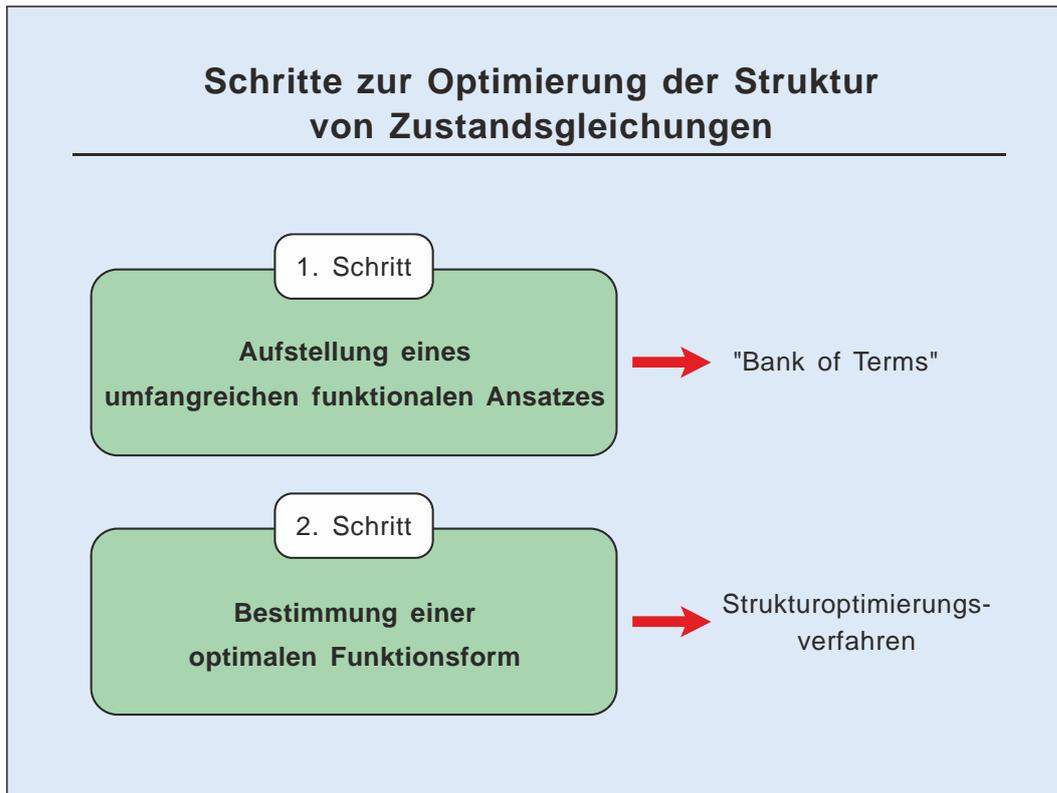


Bild 1.3. Schritte zur Optimierung der Struktur von Zustandsgleichungen.

Wir haben dann ein neues Strukturoptimierungsverfahren entwickelt, das aus den folgenden in Bild 1.3 aufgeführten Schritten bestand, nämlich:

- (1) Aufstellung eines umfangreichen funktionalen Ansatzes von Funktionen der Dichte und Temperatur, die sogenannte "Bank of Terms".
- (2) Auf der Basis dieser Termenbank ermittelt das Strukturoptimierungsverfahren die beste Kombination einer bestimmten Anzahl von Termen.

In Bild 1.4 ist sowohl der grundsätzlichen Aufbau unserer Art der Zustandsgleichungen dargestellt als auch ein Beispiel für eine solche umfassende Termenbank gegeben.

Unsere Gleichungen waren nicht - wie bis dahin üblich - explizit im Druck, sondern explizit in der freien Energie a als Funktion der Dichte ρ und der Temperatur T . Durch Bezug auf die Gaskonstante R und die Temperatur T erhält man die dimensionslose freie Energie α in Abhängigkeit der dimensionslosen Dichte δ und der dimensionslosen inversen Temperatur τ , jeweils dimensionslos gemacht durch Bezug auf die Werte am kritischen Punkt. Das Ganze wird aufgespalten in den Teil des idealen Gases α^0 und den residuellen Anteil α^r , d. h., die Differenz zwischen dem idealen Gas und dem realen Stoff. Der entscheidende Teil ist α^r , für den wir einen effektiven Ansatz suchen. Ein Vorteil dieser Vorgehensweise ist,

dass sich alle Zustandsgrößen, also Druck, Enthalpie, Entropie usw., *allein durch Ableitungen* ermitteln lassen, man braucht keine Integration mehr wie bei druckexpliziten Gleichungen. Es gibt noch weitere Vorteile, auf die ich hier aber nicht eingehe.

Zustandsgleichung und "Bank of Terms"

Zustandsgleichung

$$\frac{a(\rho, T)}{RT} = \alpha(\delta, \tau) = \alpha^o(\delta, \tau) + \alpha^r(\delta, \tau)$$

mit $\delta = \rho/\rho_c$ und $\tau = T_c/T$

Bank of terms

$$\alpha^r(\delta, \tau) = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=0}^{16} n_{ij} \delta^i \tau^{j/4} + \sum_{k=1}^6 \exp(-\delta^k) \sum_{i=1}^{10} \sum_{j=2}^{20} n_{ij} \delta^i \tau^{j/4}$$

$$+ \sum_{i=1}^{48} n_i \delta^{d_i} \tau^{t_i} \exp[-\eta_i (\delta - \varepsilon_i)^2 - \beta_i (\tau - \gamma_i)^2]$$

Bild 1.4. Grundsätzliche Form unserer Zustandsgleichungen und „Bank of Terms“.

Nun zur „Bank of Terms“ für α^r :

Wie in Bild 1.4 gezeigt, besteht die Gleichung aus drei Anteilen, nämlich reine Polynome in δ und τ , solche Polynome gekoppelt mit der Exponentialfunktion in δ und sog. Gauss'sche Glockenkurven für das kritische Gebiet. Wie man hier an den Doppelsummen sieht, sind das ziemlich viele Terme – bis zu etwa 800. Bei am Ende etwa 30 Termen heißt die Aufgabe 30 aus 800 - das ist schwieriger als 6 aus 49 (☺).

Bild 1.5 veranschaulicht das Werkzeug für den zweiten Schritt, nämlich das vereinfachte Schema zur Strukturoptimierung. Das Verfahren kombiniert Schritte der Zufallssuche mit vereinfachten Elementen der biologischen Evolution (z.B. Mutation), die meiner „alten“ schrittweisen Regressionsanalyse (im Bild grün dargestellt) vorgeschaltet ist.

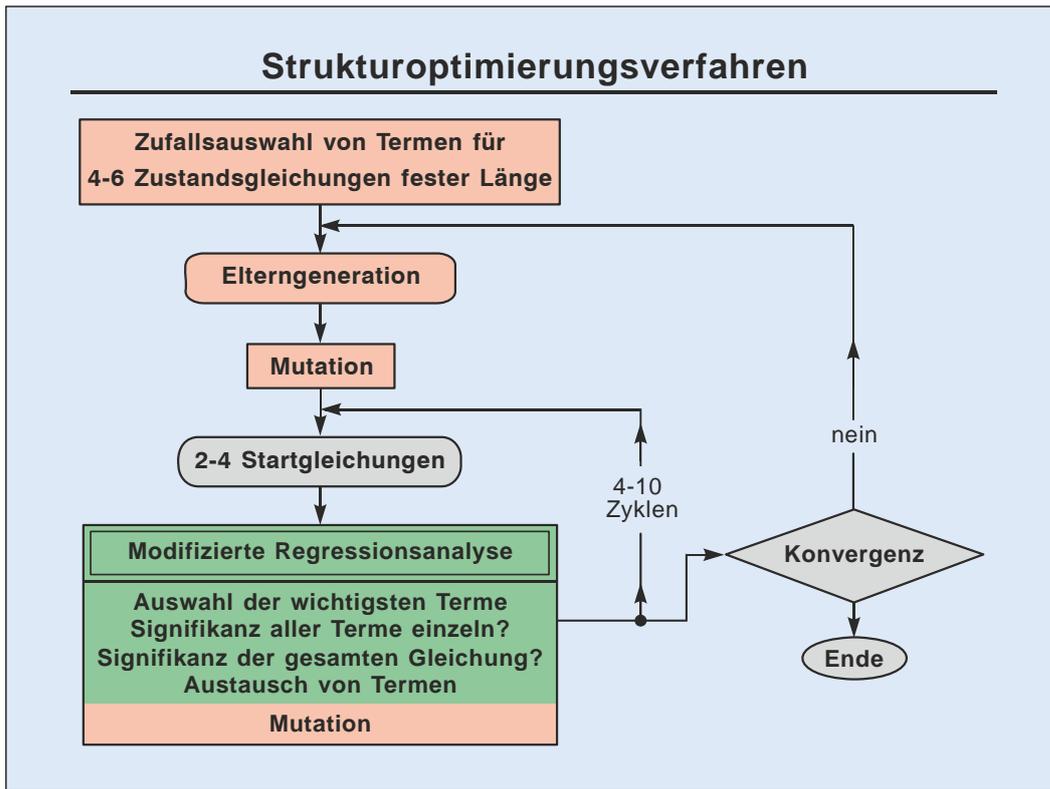


Bild 1.5. Verfahren zur Optimierung der Struktur von Zustandsgleichungen.

Mit diesem Verfahren haben wir eine Gleichung für Sauerstoff entwickelt. Der in Bild 1.6 dargestellte Vergleich mit der Gleichung von Jacobsen und Stewart, angepasst an denselben Datensatz, zeigt Folgendes:

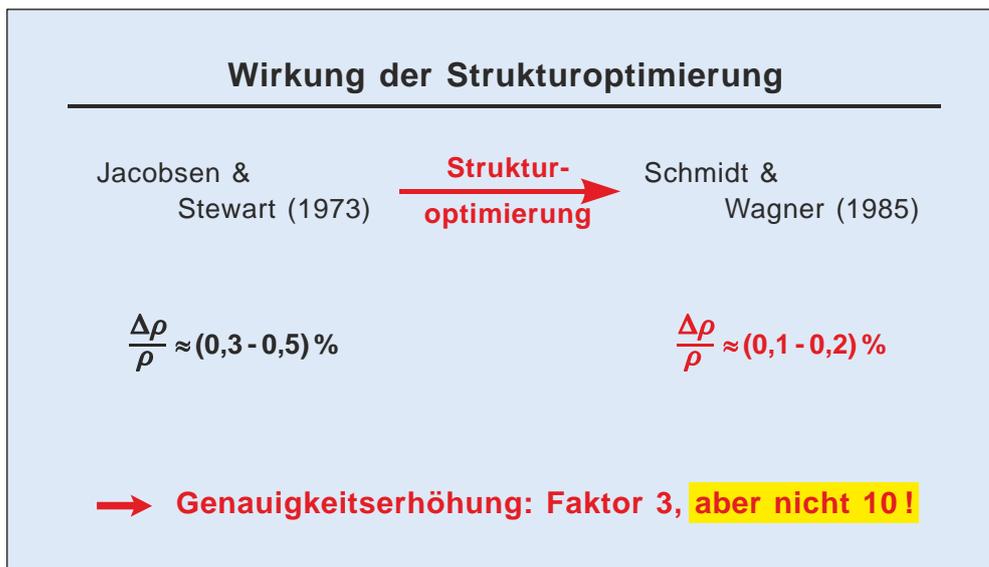


Bild 1.6. Wirkung der Strukturoptimierung bei der Entwicklung einer Zustandsgleichung für Sauerstoff.

Die strukturoptimierte Gleichung hat nur etwa 1/3 so große Abweichungen zu den Messwerten wie die Gleichung von Jacobsen und Stewart. Etwas lax ausgedrückt heißt das, die Genauigkeit ist dreimal größer.

Dreimal genauer ist super – *aber 3-mal ist nicht 10-mal!*

Ja, was war zu tun?

Da die Zustandsgleichungen an Messwerte angepasst werden, insbesondere an die Dichte, konnte es nur heißen, man braucht deutlich genauere Messungen der Dichte der Stoffe.

2. Das Bochumer Verfahren für sehr genaue Dichtemessungen über große Bereiche von Druck, Temperatur und Dichte

Bild 2.1 zeigt ein Druck, Dichte-Diagramm von Methan mit Isothermen und den Kreisen als Symbole der Messwerte der Dichten. Der Temperaturbereich geht von 90 K bis 523 K bei Drücken bis 20 MPa. Das ist auch etwa der Bereich, der uns interessiert.

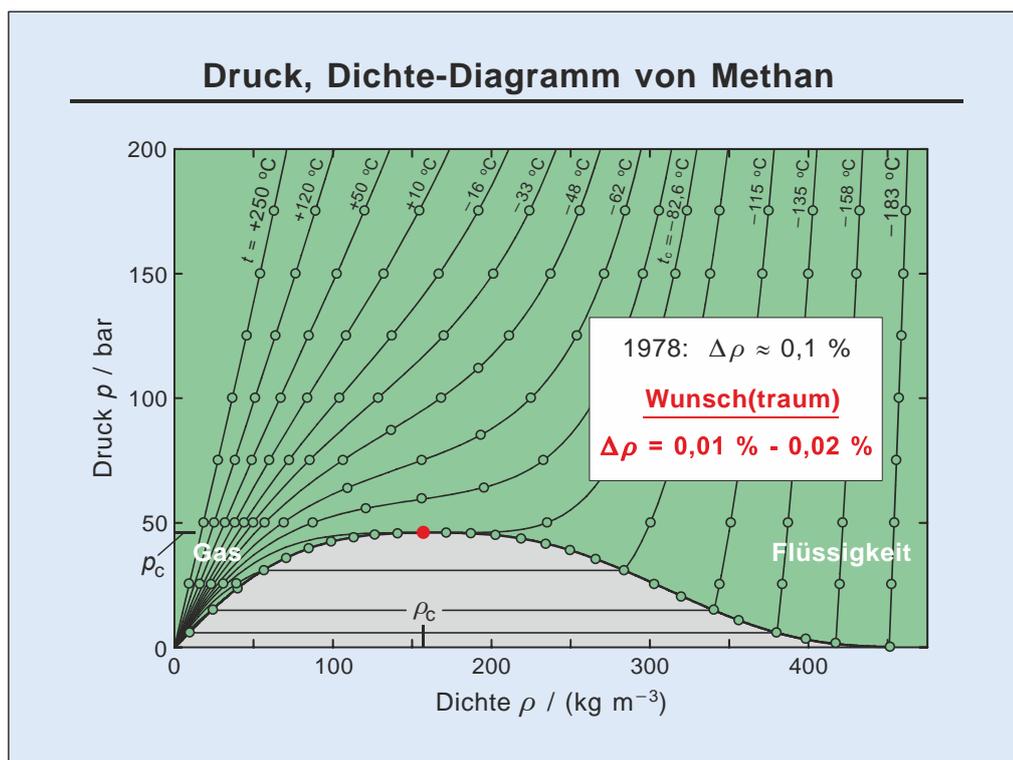


Bild 2.1. Druck, Dichte-Diagramm von Methan.

Ende der 1970er Jahre hatten die besten experimentellen Dichtedaten eine Unsicherheit von etwa 0,1%. *Mein Wunsch* waren Dichtemessungen, die etwa *10-mal genauer* sein sollten. Wiederum ziemlich unrealistisch!

Nachdem wir die diversen Dichtemessmethoden (Pyknometer, Piezometer, Schwingungsverfahren,...) untersucht hatten, haben wir das größte Verbesserungspotential in der Dichtemessung nach dem Archimedischen Prinzip gesehen.

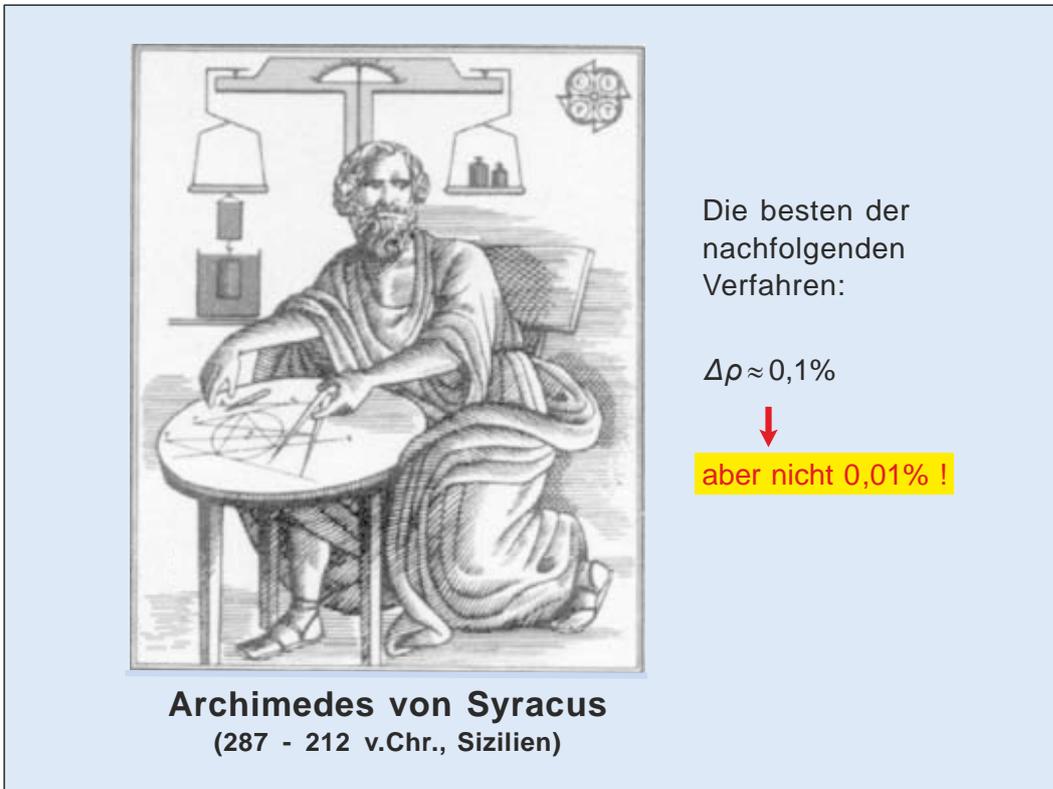


Bild 2.2. Archimedes von Syracus.

Nach dem Archimedischen Prinzip lässt sich die Dichte eines Fluids (Gas oder Flüssigkeit) dadurch bestimmen, dass ein sog. Senkkörper (Zylinder, Kugel,...) mit bekanntem Volumen, dessen Masse man durch Wiegen im Vakuum kennt, in ein Fluid eingetaucht und dann eingetaucht gewogen wird – so wie man es in Bild 2.2 sieht. Im Fluid ist der Senkkörper scheinbar leichter, nämlich um den Auftrieb, den der Körper im Fluid erleidet. Das ist allseits bekannt.

Ende der 1970er Jahre hatten die besten Dichtemessungen nach dem Archimedischen Prinzip Unsicherheiten von etwa 0,1%, wenn man etwas größere Temperatur- und Druckbereiche betrachtet, aber eben nicht 0,01%.

Was waren die Probleme, die keine geringeren Unsicherheiten als etwa 0,1% zugelassen haben?

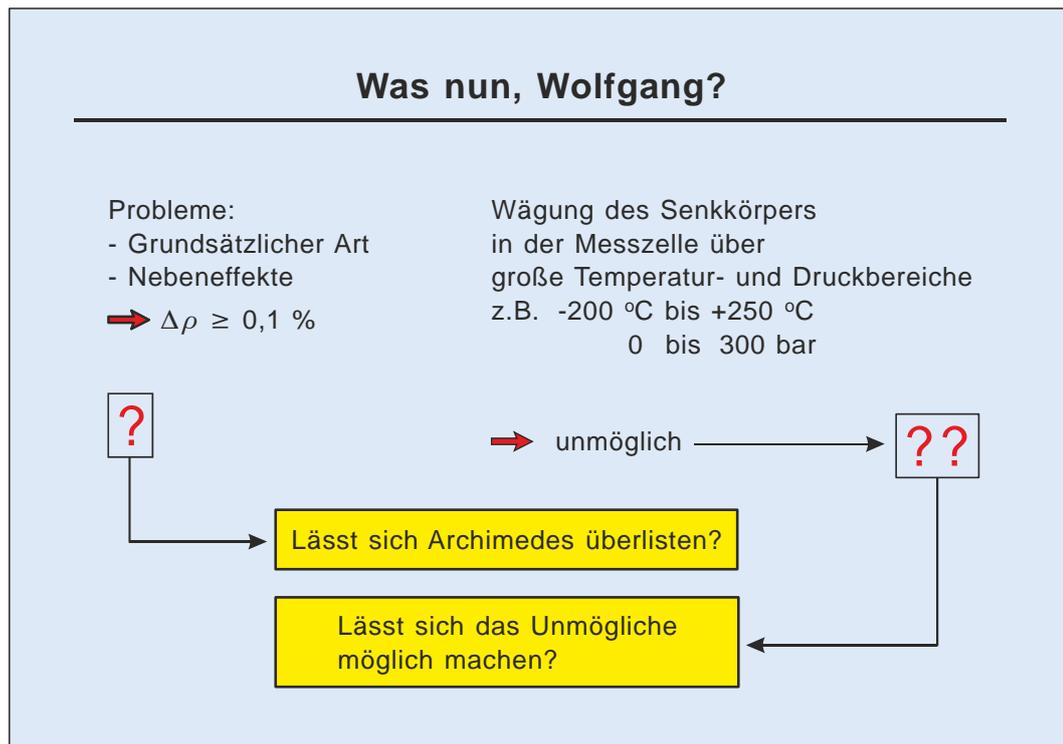


Bild 2.3. Probleme bei der Verbesserung des Archimedischen Prinzips zur Dichtemessung.

Ein Problem war ganz grundsätzlicher Art, nämlich die Bestimmung des geringen Auftriebs aus der Differenz zwischen zwei – im Verhältnis zum Auftrieb – großen Werten der Masse des Senkkörpers im Vakuum und im Fluid. Eine solche Situation ist immer schlecht für hohe Genauigkeiten von Differenzen. Es gab aber auch Einflüsse von Nebeneffekten, z. B. Einflüsse der Oberflächenspannung der Flüssigkeit an der Stelle, wo der Aufhängedraht des Senkkörpers durch den Flüssigkeitsspiegel geht. Ein weiterer unerwünschter Nebeneffekt ist die Adsorption am Senkkörper bei der Dichtemessung von Gasen.

Ein weiteres ganz grundsätzliches Problem war, dass der Senkkörper nicht in der Messzelle gewogen werden konnte, wenn die Messungen einen Temperaturbereich von 70 K bis 525 K bei Drücken bis 30 MPa abdecken sollten. Bei diesen Bedingungen kann eine Analysenwaage nicht innerhalb der Messzelle angeordnet werden.

Die Aufgabe war also, diese beim „normalen“ Archimedischen Prinzip auftretenden Probleme zu vermeiden bzw. zu umgehen. Wir haben Archimedes überlistet, indem wir statt des einen Senkkörpers zwei Senkkörper verwendet haben, die speziell aufeinander abgestimmt waren. Dieses Prinzip wird mit Hilfe von Bild 2.4 erläutert.

In der mit dem Fluid (blau dargestellt) gefüllten Messzelle befindet sich ein sog. Auflagekäfig für die Senkkörper. Der Auflagekäfig ist mit der Waage verbunden. Der Senkkörper 1

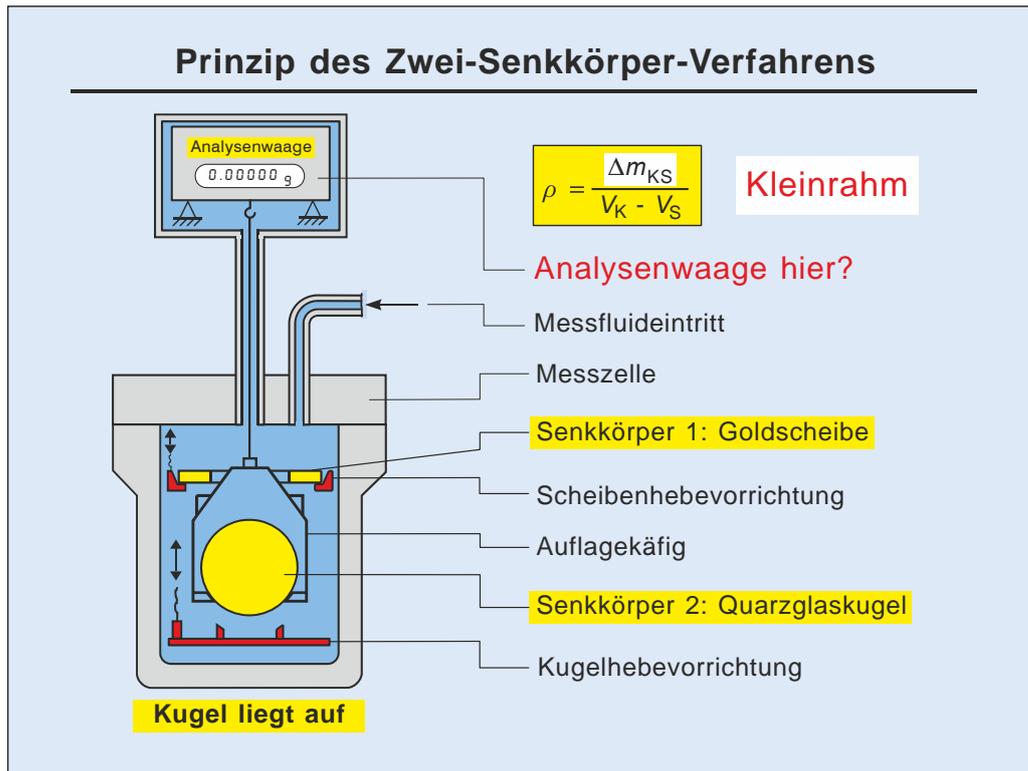


Bild 2.4. Prinzip des Zwei-Senkkörper-Verfahrens zur Dichtemessung.

ist eine Scheibe mit einem verhältnismäßig großen zentrischen Loch; siehe Bild 2.4. Der Senkkörper 2 ist eine Quarzglaskugel, die vergoldet ist. Beide Senkkörper haben die gleiche Masse. Aufgrund der stark unterschiedlichen Dichte von Gold und Quarzglas haben die Senkkörper ein signifikant unterschiedliches Volumen. Wegen der Differenz im Volumen haben die beiden Senkkörper im Fluid einen unterschiedlichen Auftrieb.

Anhand von Bild 2.4 wird die Dichtemessung beschrieben. Im Bild liegt die Kugel auf dem Auflagekäfig und kann mit der Kugelhebevorrichtung abgehoben werden. Die Scheibe liegt nicht auf dem Auflagekäfig, sondern auf der Scheibenhebevorrichtung. Durch Absenken der Scheibenhebevorrichtung kann die Scheibe auf den Auflagekäfig aufgelegt werden. Mit den beiden Hebevorrichtungen können die Scheibe und die Kugel unabhängig voneinander auf den Käfig aufgelegt und von diesem abgehoben werden. Die Hebevorrichtungen können von außerhalb der Messzelle auf und ab bewegt werden, worauf ich aber nicht weiter eingehe.

Die eigentliche Dichtemessung geschieht nun folgendermaßen. Die Kugel liegt (wie in Bild 2.4 dargestellt) auf dem Auflagekäfig. In dieser Stellung wird die Waage auf null tariert. Nun wird die Kugel vom Käfig abgehoben und die Scheibe wird aufgelegt. Da die Scheibe aufgrund des kleineren Volumens einen kleineren Auftrieb als die Kugel erleidet, ist sie

scheinbar schwerer als die Kugel und die Waage zeigt einen positiven Wert. Dieser Wert entspricht der erstmalst *direkt* gemessenen Auftriebskraftdifferenz (ohne über die scheinbaren absoluten Massen von Scheibe und Kugel zu gehen). Die Dichte des Fluids (Gas oder Flüssigkeit) ergibt sich dann aus der einfachen Gleichung

$$\rho = \Delta m_{KS} / (V_K - V_S),$$

wobei ρ die Dichte, Δm_{KS} die Auftriebskraftdifferenz zwischen Kugel und Scheibe, V_K das Volumen der Kugel und V_S das Volumen der Scheibe ist.

Da die beiden Senkkörper aber auch die gleiche Oberflächengröße und das gleiche Material an der Oberfläche (nämlich Gold) haben, werden die Nebeneffekte (z. B. Adsorption) kompensiert, weil sie bei beiden Senkkörpern in gleicher Weise auftreten. Der Effekt der Oberflächenspannung bei der Messung von Flüssigkeitsdichten hebt sich ebenfalls heraus, weil sich die Wirkung der Oberflächenspannung auf den Aufhängedraht des Auflagekäfigs beim Wechseln der Senkkörper praktisch nicht verändert.

Als Schlussfolgerung kann man sagen, dass *Dr. Kleinrahm* in seiner Dissertation Archimedes erfolgreich „überlistet“ hat.

Was ist mit der Analysenwaage in Bild 2.4? Wegen der großen Bereiche von Druck und Temperatur geht es jedenfalls *nicht* in der Weise wie im Bild dargestellt – die Waage darf nicht im Raum mit dem Fluid angeordnet sein.

Anstelle einer direkten Verbindung zwischen der Waage und dem Auflagekäfig für die Senkkörper wird eine bei uns entwickelte sog. Magnetschwebekupplung, wie in Bild 2.5 dargestellt, zwischen diesen beiden Bauteilen angeordnet.

Das Bild zeigt das Prinzip der Magnetschwebekupplung, das die *Schlüsselkomponente des neuen Wägesystems* ist. Damit wird die *Auftriebskraft kontaktlos* aus der unter Druck stehenden Messzelle *zur Waage*, die sich bei Umgebungsbedingungen befindet, *übertragen*. Die Kupplung besteht aus einem Elektromagneten, der mit dem Unterflurwägehaken der Waage verbunden ist. Der Auflagekäfig für die Senkkörper ist über einen dünnen Draht mit dem Permanentmagneten verbunden. Dieser befindet sich in einem druckfesten Kupplungsgehäuse, sodass das unter Druck stehende Fluid von der Umgebung getrennt wird. Dadurch sind die beiden Magnete ebenfalls getrennt. Das Kupplungsgehäuse besteht aus Kupferberyllium, einem nahezu unmagnetischen Metall.

Wenn die Kupplung eingeschaltet wird, wird der Permanentmagnet mit Hilfe eines *speziellen Regelkreises* ganz sanft in Richtung des Elektromagneten angezogen. Es dauert

nur wenige Sekunden bis der stabile Schwebezustand des Permanentmagneten erreicht ist. Die Waage „merkt“ gar nicht, dass keine direkte Verbindung zum Auflagekäfig besteht.

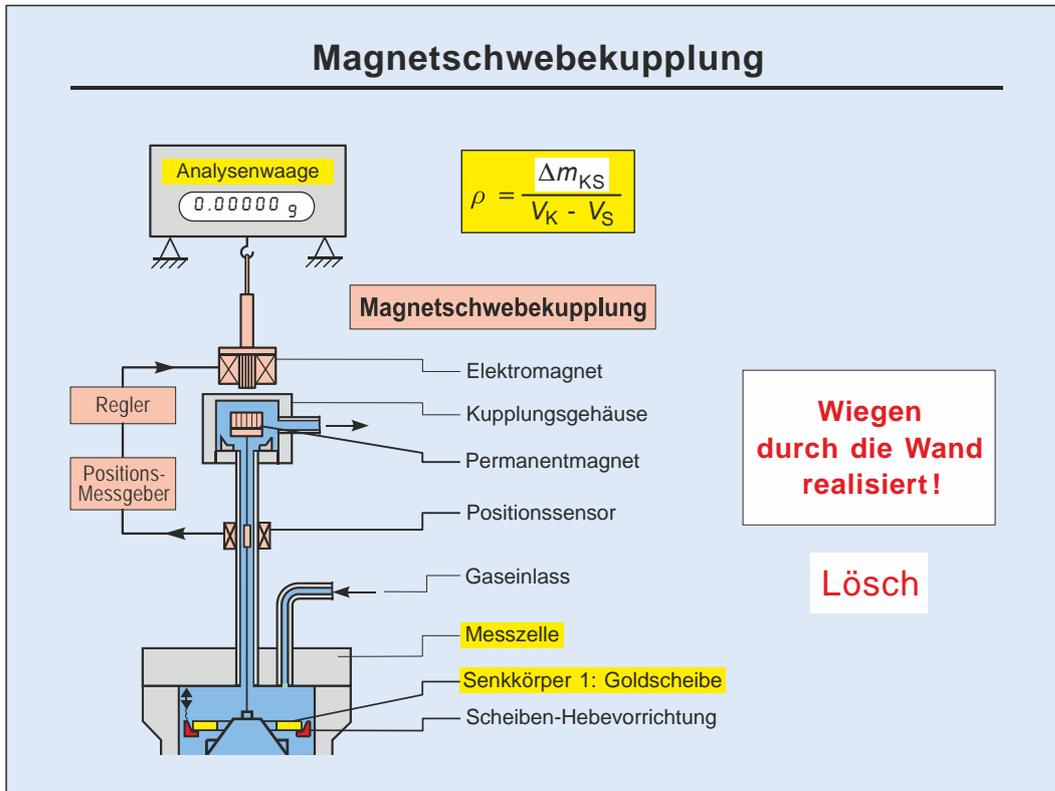


Bild 2.5. Prinzipieller Aufbau der Magnetschwebekupplung.

Mit diesem Ergebnis hat Dr. Lösch in seiner Dissertation das *Wiegen durch die Wand* der Messzelle *realisiert*. Damit wurde neben dem Zwei-Senkörper-Prinzip die zweite wichtige Voraussetzung für das Bochumer Verfahren der hochgenauen Dichtemessung erfüllt.

Mit der 1984 fertiggestellten Zwei-Senkörper-Dichtemessapparatur ist die experimentelle Unsicherheit tatsächlich von 0,1% auf 0,01% bis 0,02% reduziert worden – *mein experimenteller Wunschtraum ist also ebenfalls Wirklichkeit geworden*.

Der prinzipielle Aufbau der Messapparatur ist in Bild 2.6 dargestellt.

Wir hatten später zwei Dichtemessapparaturen, deren gesamter Arbeitsbereich im Bild aufgeführt ist, nämlich ein Temperaturbereich von 60 K bis 523 K bei Drücken bis 30 MPa.

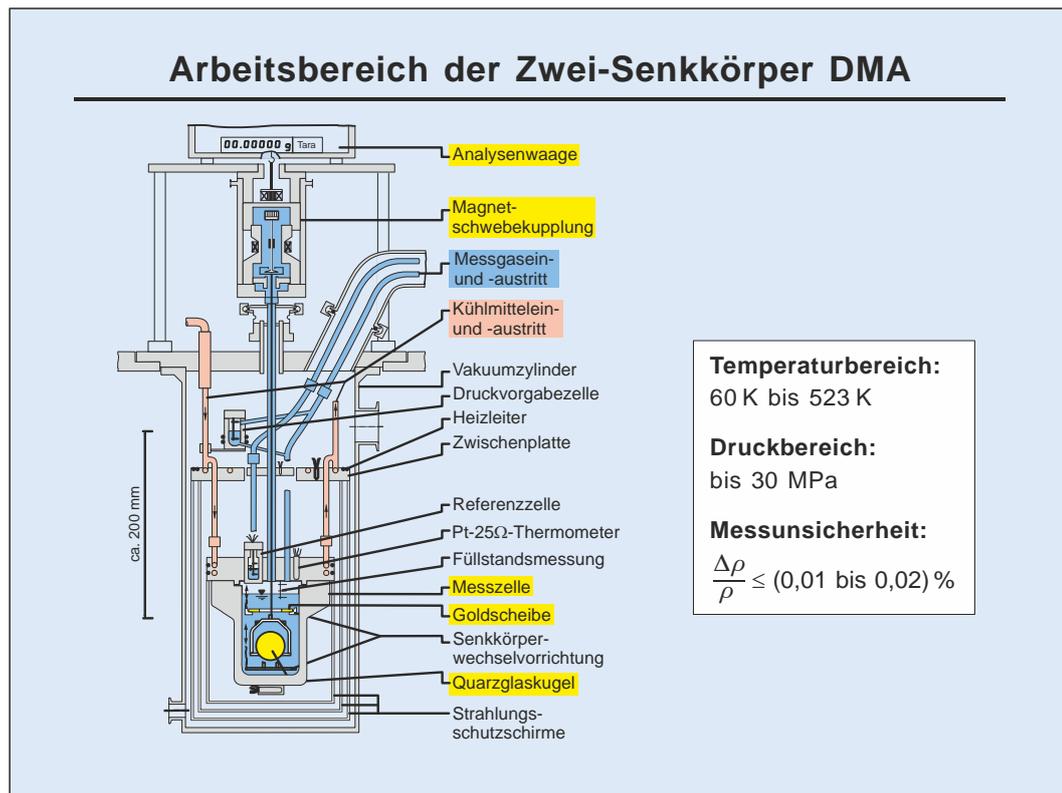


Bild 2.6. Prinzipieller Aufbau und Arbeitsbereich der Zwei-Senkkörper-Dichtemessapparatur.



Bild 2.7. Übernahme der „Bochumer“ Auftriebsverfahren zur Dichtemessung durch metrologische Staatsinstitute.

Man glaubt es ja kaum, aber unsere Methode zur Dichtemessung über große Bereiche von Temperatur, Druck und Dichte ist nach 30 Jahren immer noch die genaueste der Welt. Wie Bild 2.7 zeigt, wurde das Messprinzip von den metrologischen Staatsinstituten in Deutschland, Großbritannien, Japan, und den USA übernommen.

3. Auswirkungen der hochgenauen Dichtemessungen auf die Bochumer Zustandsgleichungen und Bemerkungen zur Industrie-Formulation für Wasser

Wie in Bild 1.4 dargestellt, werden unsere Zustandsgleichungen explizit in der dimensionslosen freien Energie formuliert, aufgespalten in den Anteil des idealen Gases α^0 und den residuellen Anteil α^r ; α^r ist der entscheidende Teil der Zustandsgleichung.

Die Auswirkung der hochgenauen Dichtemessungen zur Entwicklung unserer Zustandsgleichungen ist in Bild 3.1 am Beispiel der internationalen Referenz-Zustandsgleichung für Stickstoff gezeigt, wobei nur der residuelle Anteil α^r der Gleichung dargestellt ist.

Internationale Referenz-Zustandsgleichung für N₂
 Span, Lemmon, Jacobsen, Wagner, Yokozeki (2000)

$$\alpha^r(\delta, \tau) = \sum_{i=1}^6 n_i \delta^{d_i} \tau^{t_i} + \sum_{i=7}^{32} n_i \delta^{d_i} \tau^{t_i} \exp(-\delta^{k_i})$$

$$+ \sum_{i=33}^{36} n_i \delta^{d_i} \tau^{t_i} \exp(-\varphi_i (\delta - 1)^2 - \beta_i (\tau - \gamma_i)^2)$$

↖ Gauss'sche-Glockenkurven
für das kritische Gebiet

Gültigkeitsbereich: $63,151 \text{ K} \leq T \leq 1000 \text{ K}$ $p \leq 2200 \text{ MPa}$

„Multiproperty“ Anpassung

$p\rho T$, B , C , $\underbrace{p_\sigma \rho' \rho''}_{\text{Maxwell}}$, w , c_v , c_p , c_σ , Δh , μ

Bild 3.1. Internationale Referenzzustandsgleichung für Stickstoff, entwickelt von Span, Lemmon, Jacobsen, Wagner und Yokozeki.

Die funktionale Form dieser Gleichung wurde mit unserem Strukturoptimierungsverfahren ermittelt. Das Verfahren hat auch die Terme der Gauss'schen-Glockenkurven aus der „Bank of Terms“ herausgefunden, wodurch die Gleichung auch im kritischen Gebiet das Beste ist,

was es für Stickstoff gibt. Angepasst wurde die Gleichung an Messwerte der Zustandseigenschaften Dichte ($p\rho T$ -Daten), Virialkoeffizienten B und C , Schallgeschwindigkeit w und der weiteren in Bild 3.1 aufgeführten kalorischen Größen sowie an die Phasengleichgewichtsbedingung (Maxwell Bedingung), wobei die im Bild rot unterlegten Arten der Zustandsgrößen die wichtigsten sind.

In dem Gebiet, in dem die Gleichung an unsere Dichtemesswerte angepasst werden konnte, hat sie äußerst geringe Unsicherheiten zwischen 0,01% und 0,02%. Die Gleichung hat einen sehr großen Gültigkeitsbereich von 60 K bis 1000 K bei Drücken bis 2200 MPa.

Die Tabelle in Bild 3.2 listet die Stoffe auf, für die wir Zustandsgleichungen entwickelt haben, die alle *Referenzqualität* besitzen – *auch heute noch*. Bis auf Wasser beruhen alle Gleichungen ganz wesentlich auf unseren Dichtemesswerten, zum kleinen Teil gilt das auch für Erdgas.

Referenz-Zustandsgleichungen für folgende Substanzen				
Sauerstoff	(1985)	IUPAC-Standard	Ethan	(2002)
Methan	(1989)	IUPAC-Standard	<i>n</i> -Butan	(2002)
Kohlendioxid	(1992)		Isobutan	(2002)
Wasser	(1995)	IAPWS-95	Schwefelhexafluorid	(2006)
Wasser	(1997)	IAPWS-IF97	Propan (NIST)	(2006)
Argon	(1996)		Propylen (NIST)	(2015)
Ethylen	(1999)		Erdgase	GERG-2008
Stickstoff	(2000)		und andere Gemische	ISO-Standard

Bild 3.2. Entwickelte Referenz-Zustandsgleichungen für die aufgelisteten Stoffe.

Im Vergleich zu den früheren Zustandsgleichungen wurde eine Steigerung der Genauigkeit um den Faktor 5 – 10 erreicht!

Die internationalen Standards für die Zustandseigenschaften von Wasser sind in Bild 3.3 genannt.



Bild 3.3. Internationale Standards für die thermodynamischen Eigenschaften von Wasser.

Seit nunmehr 20 Jahren gibt es den wissenschaftlichen Standard für die Zustandseigenschaften von Wasser, die IAPWS-95 Formulation, die bei uns entwickelt worden ist. Die größte Schwierigkeit war nicht die Gleichungsentwicklung selbst (Wasser ist nicht schwieriger als andere Stoffe), sondern das Durchsetzen als Standard in einer so großen Institution wie die IAPWS mit allen wissenschaftspolitischen Tücken.

Für industrielle Anwendungen kommt es fast nur auf *kurze Rechenzeiten* an. Deshalb hatte die IAPWS 1990 beschlossen, dass eine neue Industrie-Formulation entwickelt werden sollte, die in der Rechengeschwindigkeit mindestens *dreimal schneller* sein sollte als die bis *dahin* gültige Industrie-Formulation. Und das nicht nur bei Berechnungen mit Druck und Temperatur als Eingangsgrößen, sondern auch für den Fall, dass Enthalpie und Entropie Eingangsgrößen sein können.

Aufgrund meiner Kontakte zur Thermodynamik-Gruppe von Prof. Dittmann an der TU Dresden, schon vor der Wende, und insbesondere durch die Teilnahme von Dr. Kretschmar am Workshop „Zustandsgleichungen“ 1990 in Bochum wurde deutlich, dass eine Zusammenarbeit bei der Entwicklung einer neuen Industrie-Formulation eine echte Win-Win-Situation sowohl für die Ruhr-Universität Bochum als auch für die Technische Universität Dresden werden könnte. Unter Leitung von Dr. Kretschmar hatte die Dresdner Gruppe Erfahrung mit sog. *Rückwärtsgleichungen*, mit deren Hilfe sich alle Iterationen vermeiden lassen, wenn es um die Eingangsgrößen Enthalpie und Entropie geht. Das war *die* Chance, um die kaum erreichbare Anforderung „3-mal schneller“ vielleicht doch erfüllen zu können.

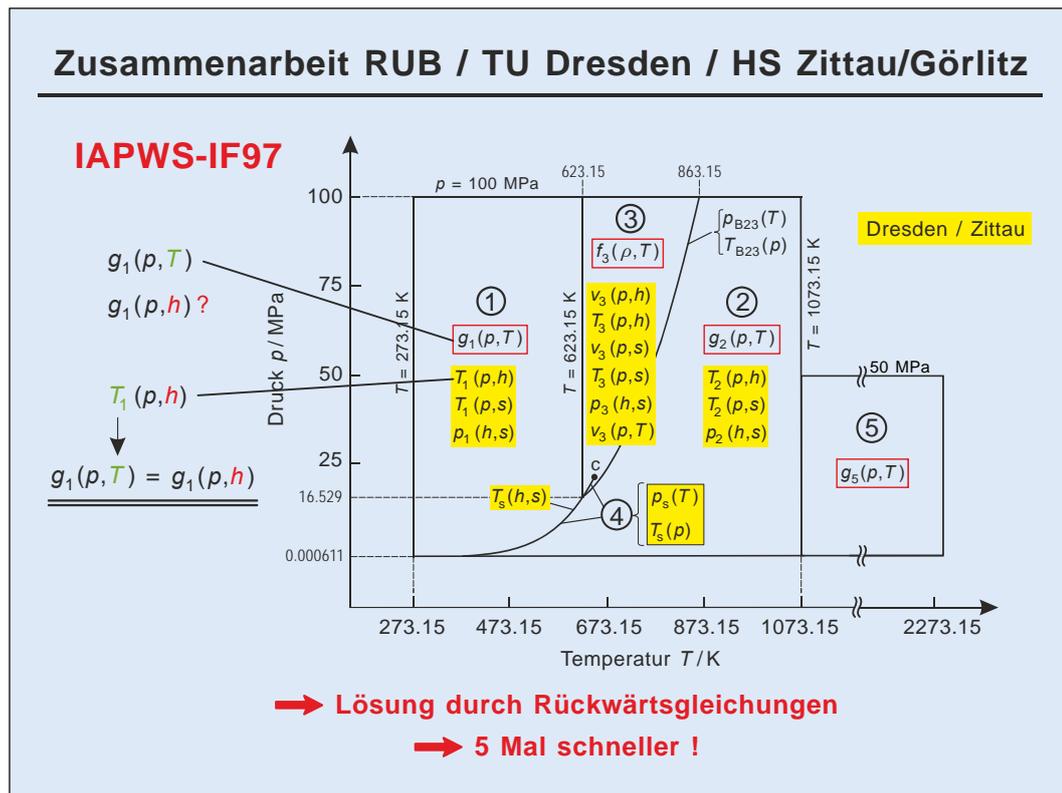


Bild 3.4. Zusammenarbeit der Ruhr-Universität Bochum, der TU Dresden und der Hochschule Zittau/Görlitz zur Entwicklung der Industrie-Formulation IAPWS-IF97.

Bild 3.4 zeigt den Gültigkeitsbereich der neuen Industrie-Formulation, nämlich Temperaturen von 273,15 K (0 °C) bis 1073,15 K (800 °C) bei Drücken bis 100 MPa (1000 bar) und Temperaturen von 1073,15 K (800 °C) bis 2273,15 K (2000 °C) bei Drücken bis 50 MPa (500 bar). Wie im Bild dargestellt, ist der gesamte Bereich in fünf Regionen aufgeteilt, die jeweils durch eine sogenannte Basisgleichung (rot umrandet) abgedeckt werden. Die Aufteilung in Regionen lässt sich grundsätzlich nicht vermeiden, wenn die technische Größe „Druck“ (und nicht die Dichte) eine der Eingangsgrößen ist, was gefordert war. Im Folgenden werden nur die Regionen 1 bis 3 näher betrachtet; die Regionen 4 (Phasengrenze Gas-Flüssigkeit) und 5 (Hochtemperaturregion) werde ich nur kurz ansprechen.

Mit unserer Strukturoptimierung haben wir dann die vier Basisgleichungen für die Regionen 1 bis 3 (und 5) entwickelt. In den Regionen 1 und 2 sind die Gleichungen explizit in der freien Enthalpie und, wegen des Drucks als der einen Eingangsgröße, nicht in der freien Energie.

Die sog. Rückwärtsgleichungen für die Regionen 1 bis 3 wurden zu Anfang in Dresden entwickelt. Nachdem Dr. Kretschmar auf die Professur „Thermodynamik“ an der Hochschule Zittau/Görlitz berufen worden war, wurde die Entwicklung in Zittau fortgesetzt.

Die Kombinationen der Variablen der zugehörigen Rückwärtsgleichungen für die Regionen 1-3 sind in Bild 3.4 gelb hinterlegt – eine der Variablen ist immer die Enthalpie h oder die Entropie s oder beide. Durch Kombination der Basisgleichungen mit den entsprechenden Rückwärtsgleichungen werden alle Iterationen vermieden. Sind beispielsweise für Berechnungen in der Region 1 (p, h) die Eingangsgrößen, gilt unter Verwendung der Rückwärtsgleichung $T_1(p, h)$ folgender Zusammenhang: $g_1(p, h) = g_1(p, T_1(p, h)) = g_1(p, T_1)$, d. h. die Rückwärtsgleichung $T_1(p, h)$ führt die Eingangsgrößen (p, h) auf die Eingangsgrößen (p, T) zurück, die zur Basisgleichung $g_1(p, T)$ passen. In Bild 3.4 ist dieses Beispiel mit dem Bezug zum Diagramm veranschaulicht. Die beiden Sättigungsgleichungen $p_s(T)$ und $T_s(p)$ für die Region 4 (Phasengrenze) wurden ebenfalls in Dresden entwickelt.

Die Rückwärtsgleichungen waren *die* Lösung des Rechenzeitproblems. Das Gesamtpaket dieser Gleichungen – Basis- und Rückwärtsgleichungen – war sogar *5-mal schneller* als die alte Industrie-Formulation - *Dank der effektiven Zusammenarbeit Bochum, Dresden und Zittau!*

Der in Bild 3.4 aufgeführte gesamte Satz von Gleichungen für die Regionen 1 bis 5 wurde 1997 von der IAPWS als neue Industrie-Formulation IAPWS-IF97 angenommen.

4. Die GERG-2008 Zustandsgleichung für Erdgase und andere Gemische

Der Name GERG-2008 bezieht sich auf die Annahme der neuen Referenz-Zustandsgleichung für Erdgase durch die GERG-Gruppe im Jahr 2008, siehe auch Bild 4.2. Im Folgenden wird überwiegend nur diese Kurzform verwendet.

Beispiele von Prozessen mit Erdgasen sind der Erdgas-Transport durch Pipelines mit den benötigten Kompressoren, Speicherung in Untertagespeichern, Verflüssigung von Erdgas und der Transport von verflüssigtem Erdgas (LNG) in LNG-Tankern. Bild 4.1 zeigt drei Beispiele für solche Prozesse.

Da es keine Zustandsgleichung gab, die für diese Anwendungen auch nur annähernd genau genug war, bestand die absolute Notwendigkeit, eine sehr genaue Zustandsgleichung für Erdgase zu entwickeln, die große Bereiche von Druck und Temperatur abdeckt.

Neben der Deutschen Forschungsgemeinschaft wurden diese Arbeiten von den in Bild 4.2 aufgeführten Firmen aus Spanien, Deutschland, Frankreich, den Niederlanden, Italien und Norwegen unterstützt, die Mitglieder der GERG-Gruppe (European Gas Research Group) sind.

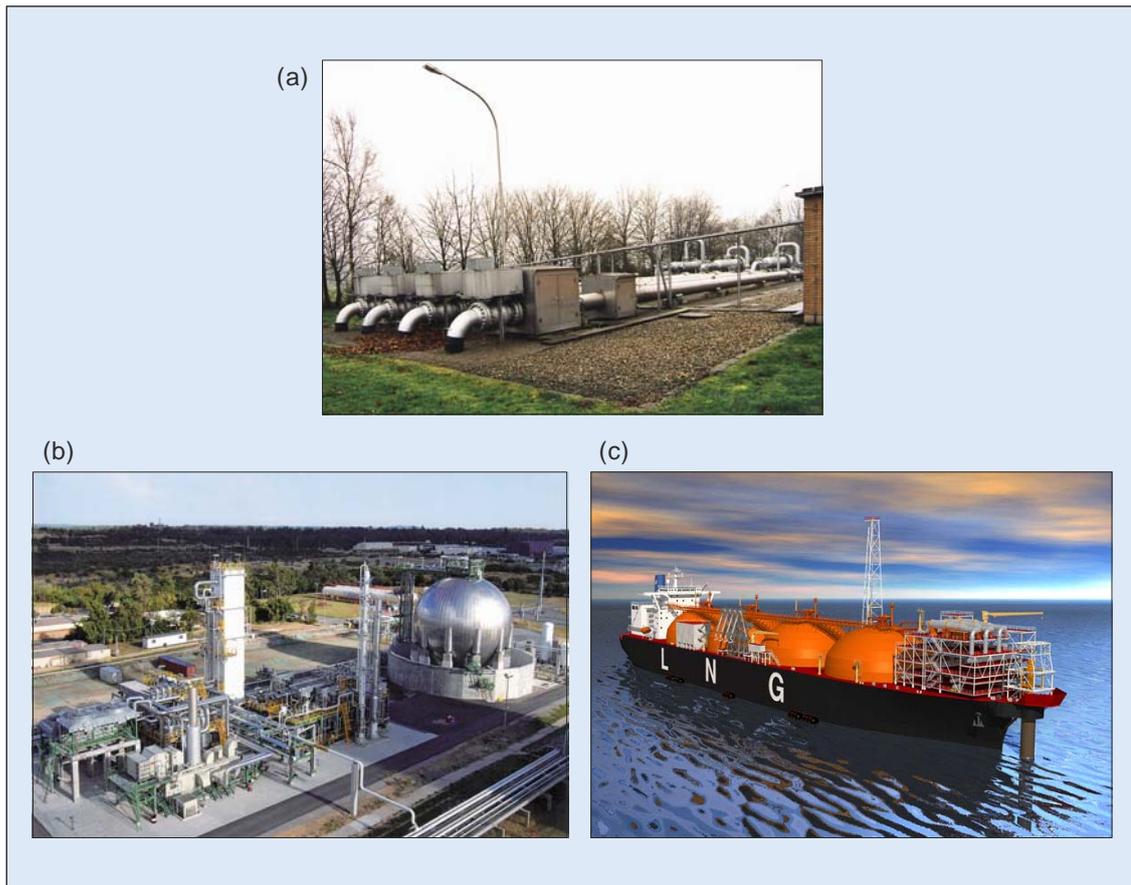


Bild 4.1. Beispiele für Prozesse mit Erdgas. (a) Messstrecke einer Erdgas-Pipeline. (b) Erdgas-Verflüssigungsanlage mittlerer Größe. (c) Tankschiff für verflüssigtes Erdgas (liquified natural gas, LNG) mit einer Wiederverdampfungsanlage an Bord.

Die GERG-2008 Zustandsgleichung für Erdgase und andere Gemische

Kooperation mit der GERG-Gruppe
(Groupe Européen de Recherches Gazières)

- Enagás (Spanien)
- E.ON Ruhrgas (Deutschland)
- Gaz de France (Frankreich)
- Nederlandse Gasunie (Niederlande)
- Snam Rete Gas (Italien)
- Statoil (Norwegen)

Bild 4.2. Kooperation mit Firmen der GERG-Gruppe.

Diese GERG-Gruppe hat auch die Anforderungen an die neue Zustandsgleichung gesetzt, die in den nächsten beiden Bildern zusammengefasst sind.

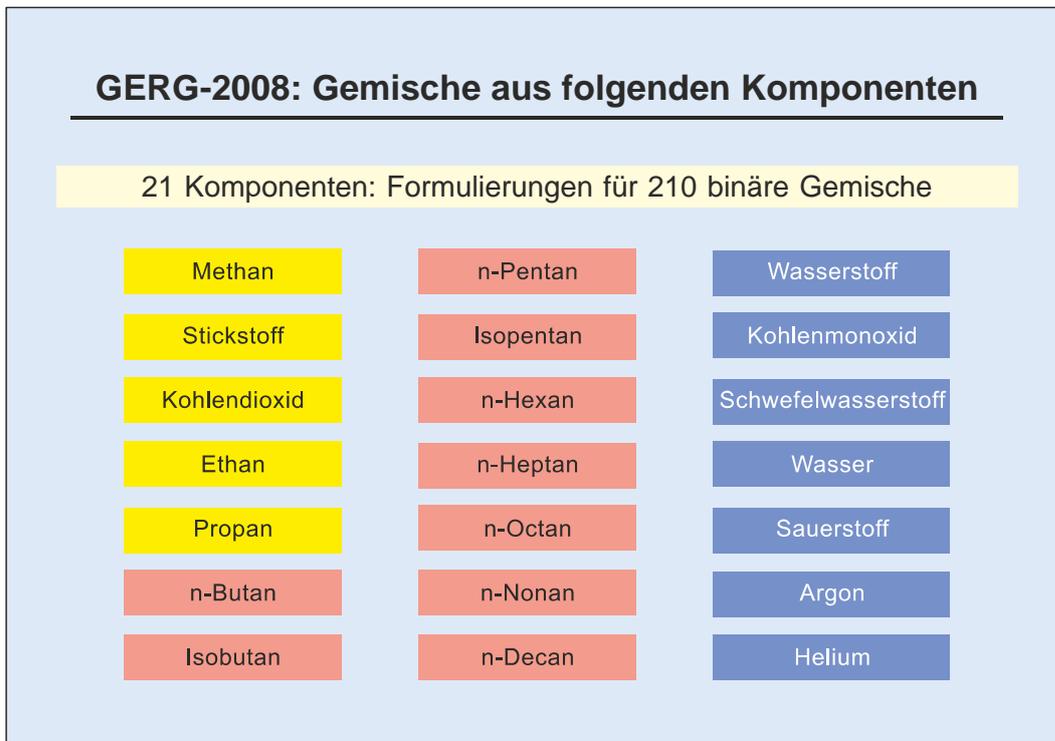


Bild 4.3. Reinstoff-Komponenten der für die GERG-2008 betrachteten Erdgase.

In Bild 4.3 sind die 21 Komponenten aufgelistet, die in den betrachteten Erdgasen vorkommen können. Die verschiedenen Erdgase enthalten praktisch immer nur einen Teil dieser Komponenten. Die Gleichung muss aber alle 21 Komponenten abdecken. Die gelben Felder zeigen die Hauptkomponenten (als wichtigste Methan), die roten Felder fassen die höheren Kohlenwasserstoffe zusammen und die blauen Felder enthalten weitere Komponenten, insbesondere die „schwierigen“ Komponenten Wasserstoff, Schwefelwasserstoff, Wasser und Helium. Aus diesen Komponenten lassen sich 210 verschiedene *binäre* Gemische bilden, auf denen die Gleichungsentwicklung beruht; siehe die Beschreibungen zu den Bildern 4.6 und 4.7.

In Bild 4.4 sind die geforderten Werte für den Gültigkeitsbereich und die Genauigkeiten der neuen Zustandsgleichung in einem Druck-Temperatur Diagramm zusammengefasst.

Dieses Druck-Temperatur Diagramm zeigt den geforderten Gültigkeitsbereich und die Genauigkeiten. Der Gültigkeitsbereich erstreckt sich von 90 K bis 350 K bei Drücken bis 30 MPa. Dieser Bereich umfasst die Gasphase (Kompressoren bis 30 MPa), die flüssige Phase,

aber auch das Phasengleichgewicht Gas-Flüssigkeit, z. B. für die Verflüssigung von Erdgas, aber auch für die Berechnung von Taupunkten.

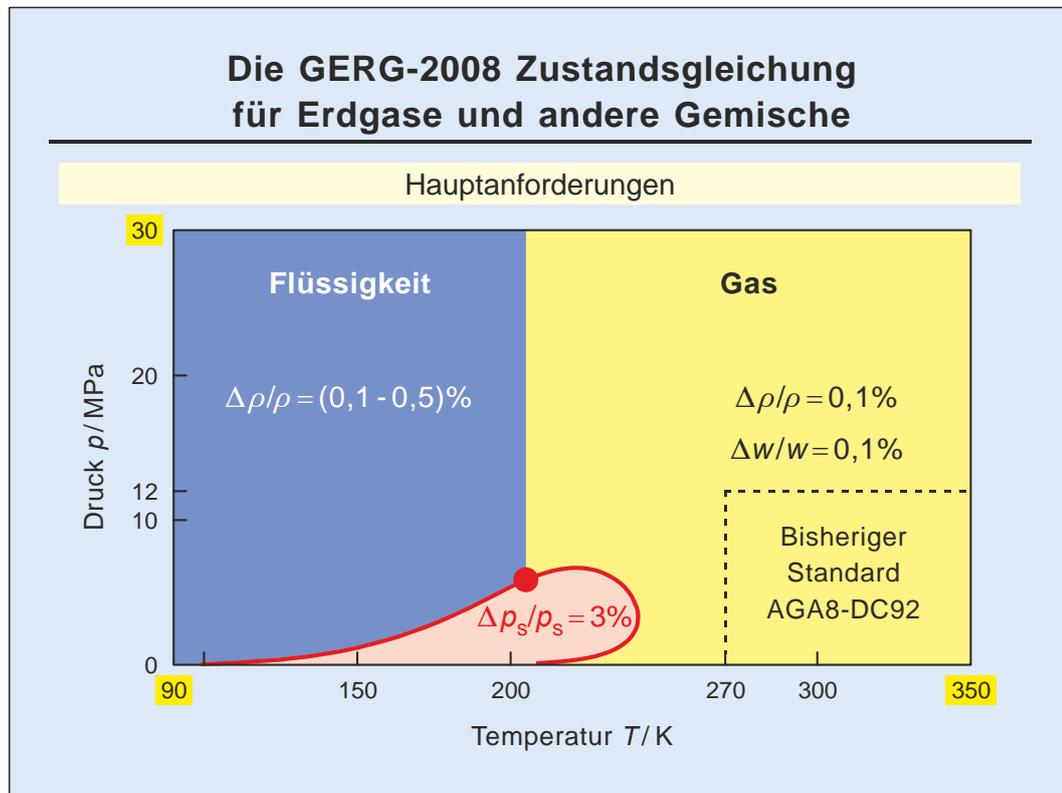


Bild 4.4. Geforderte Werte für den Gültigkeitsbereich und die Unsicherheiten der GERG-2008 Zustandsgleichung.

Der bisherige Standard, die AGA8-Gleichung, gilt nur innerhalb der im Bild gestrichelten Grenze, was für die reinen Pipeline-Anwendungen meistens ausreicht, aber wegen der unteren Temperaturgrenze schon nicht mehr in Sibirien und Alaska.

In Bild 4.4 sind auch die geforderten Genauigkeiten der GERG-2008 angegeben, also Unsicherheiten in der Dichte und der Schallgeschwindigkeit von maximal 0,1%, in der Flüssigkeit 0,1%-0,5%. Im Phasengleichgewicht sollte die Unsicherheit im Sättigungsdruck 3% nicht übersteigen, was der Unsicherheit der experimentellen Daten entspricht.

Bild 4.5 zeigt den grundsätzlichen Aufbau der GERG-2008. Basierend auf den Arbeiten von Tillner-Roth und Lemmon wurde die Gleichung als Multi-Fluid Ansatz entwickelt. Wie bei den reinen Stoffen, ist der Ansatz explizit in der dimensionslosen freien Energie α als Funktion der dimensionslosen Dichte δ , der inversen dimensionslosen Temperatur τ und der Konzentration x_i .

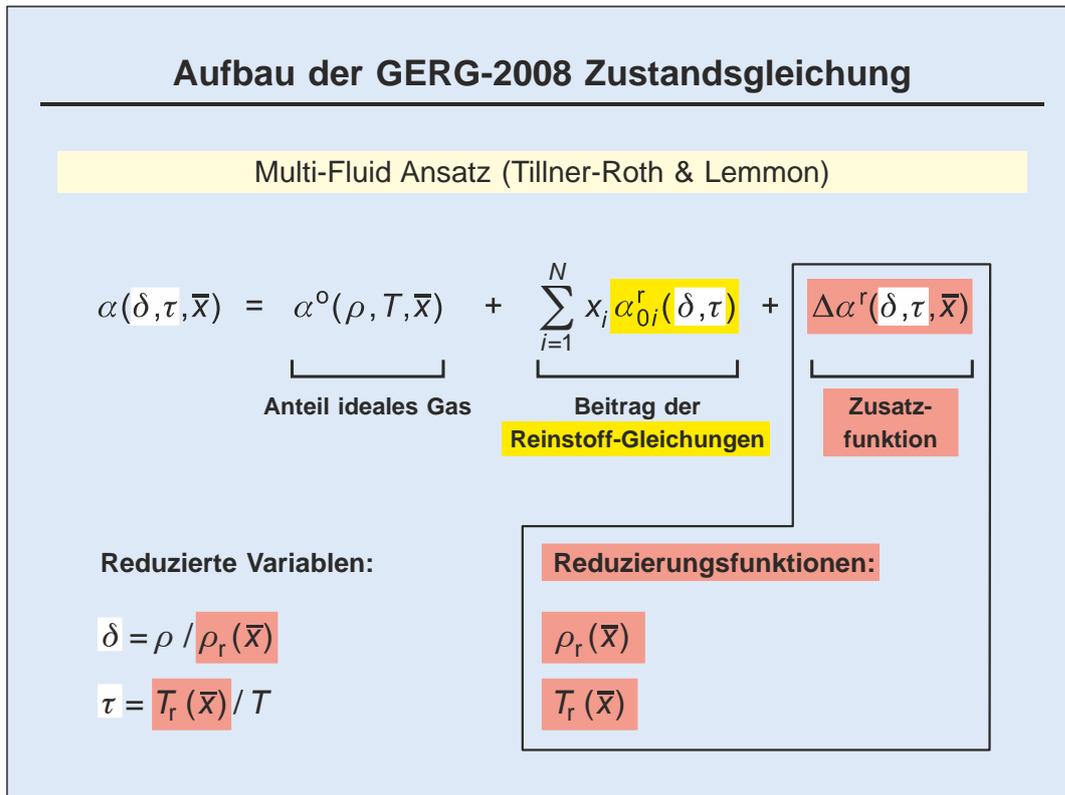


Bild 4.5. Aufbau der Zustandsgleichung GERG-2008.

Der Ansatz besteht aus drei Teilen:

- Anteil des idealen Gases,
- Beitrag der Reinstoffgleichungen,
- sog. Zusatzfunktionen zur Korrektur, was von den beiden anderen Anteilen noch nicht erfasst wurde.

Die dimensionslosen Variablen δ und τ entstehen aus der Dichte ρ bzw. Temperatur T durch Bezug auf die Reduzierungsfunktionen ρ_r und T_r , die konzentrationsabhängig sind.

Angepasst werden die Reduzierungs- und Zusatzfunktionen, die in Bild 4.5 (im Kasten rechts) zusammengefasst sind.

Die Bilder 4.6 und 4.7 enthalten die Gleichungen für die Reduzierungsfunktionen und Zusatzfunktionen. Diese Funktionen sind ziemlich komplex, und ich werde sie deshalb auch nur relativ kurz ansprechen.

Die in Bild 4.6 aufgeführten Reduzierungsfunktionen für die Temperatur und die Dichte sind nur konzentrationsabhängig und enthalten jeweils die zwei anpassbaren Parameter β_T und k_T bzw. β_V und k_V , die im Bild rot hinterlegt sind. Angepasst werden diese Parameter

Aufbau der GERG-2008 Zustandsgleichung

Reduzierungsfunktionen

Reduzierungsfunktion für die **Temperatur**:

$$T_r(\bar{x}) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_i x_j \beta_{T,ij} k_{T,ij} \frac{x_i + x_j}{\beta_{T,ij}^2 x_i + x_j} (T_{c,i} \cdot T_{c,j})^{0.5}$$

Reduzierungsfunktion für die **Dichte**:

$$\frac{1}{\rho_r(\bar{x})} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_i x_j \beta_{v,ij} k_{v,ij} \frac{x_i + x_j}{\beta_{v,ij}^2 x_i + x_j} \frac{1}{8} \left(\frac{1}{\rho_{c,i}^{1/3}} + \frac{1}{\rho_{c,j}^{1/3}} \right)^3$$

Entwicklung mit exp. Daten für binäre Gemische

Bild 4.6. Reduzierungsfunktionen der GERG-2008.

Aufbau der GERG-2008 Zustandsgleichung

Zusatzfunktionen

Binärspezifische Zusatzfunktion:

$$\Delta\alpha_{ij}^r(\delta, \tau, \bar{x}) = x_i x_j \sum_{m_{ij}=1}^{M_{ij}} n_{m_{ij}} \tau^{t_{m_{ij}}} \delta^{d_{m_{ij}}} e^{-\eta_{m_{ij}}(\delta - \varepsilon_{m_{ij}})^2 - \beta_{m_{ij}}(\delta - \gamma_{m_{ij}})}$$

Generalisierte Zusatzfunktion:

$$\Delta\alpha_{ij}^r(\delta, \tau, \bar{x}) = x_i x_j F_{ij} \sum_{m=1}^M n_m \tau^{t_m} \delta^{d_m} e^{-\eta_m(\delta - \varepsilon_m)^2 - \beta_m(\delta - \gamma_m)}$$

Zusatzfunktion des **Vielkomponenten-Gemisches**:

$$\Delta\alpha^r(\delta, \tau, \bar{x}) = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{N-1} \Delta\alpha_{ij}^r(\delta, \tau, \bar{x})$$

Bild 4.7. Zusatzfunktionen der GERG-2008.

nur an Daten von *binären* Gemischen aus den 21 Komponenten. Bei Gemischen mit einer schlechten Datenlage werden die Parameter gleich 1 gesetzt.

Bild 4.7 zeigt, dass es zwei Sorten von Zusatzfunktionen gibt – binärspezifische Zusatzfunktionen mit den anpassbaren Parametern n_m und generalisierte Zusatzfunktionen mit dem einen anpassbaren Parameter F ; die anpassbaren Parameter sind im Bild rot hinterlegt. Die Anzahl der anpassbaren Parameter liegt, je nach Gemisch, zwischen 1 und 12, für die meisten Gemische gibt es keine Zusatzfunktionen. Die Parameter werden wiederum nur an Daten von *binären* Gemischen angepasst. Die grün hinterlegte Zeile zeigt, dass die Zusatzfunktionen der Mehrkomponenten-Gemische durch einfache Addition der Zusatzfunktionen der binären Gemische entstehen. Auf der Basis der binären Gemische sind Zusatzfunktionen der Mehrkomponenten-Gemische eine reine Vorhersage.

In den folgenden beiden Bildern soll die Qualität der GERG-2008 für die Berechnung von Eigenschaften von Mehrkomponenten-Gemischen veranschaulicht werden.

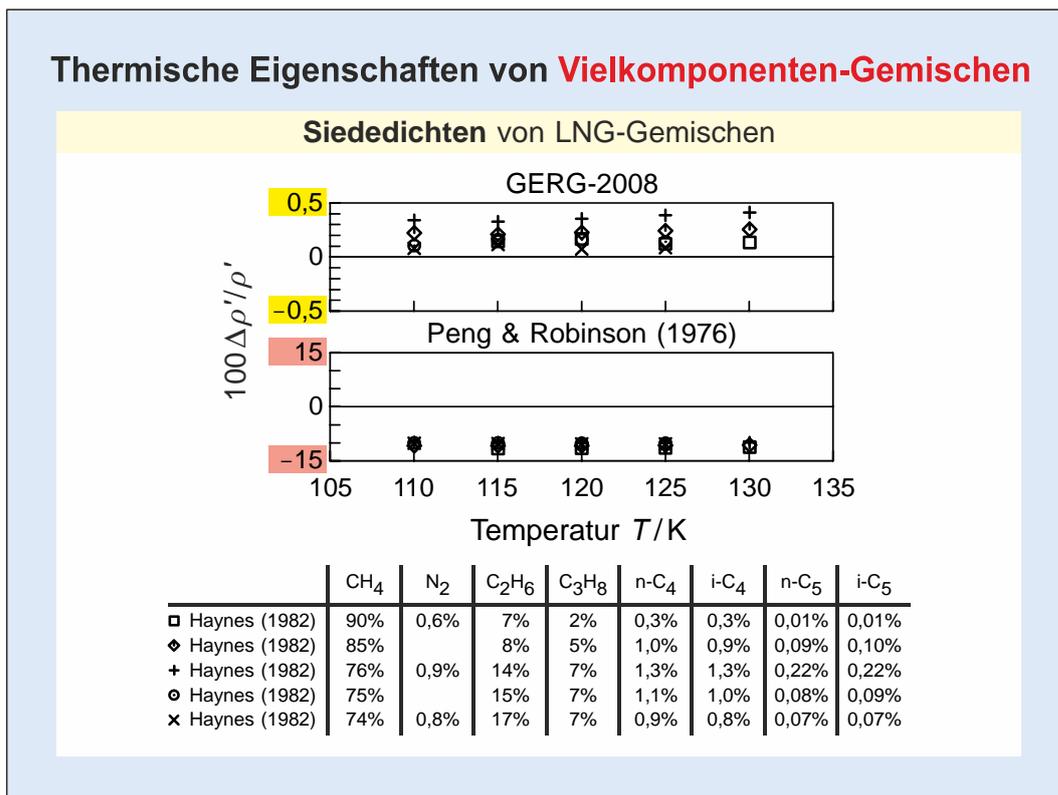


Bild 4.8. Wiedergabe der Siededichten von LNG-Gemischen aus acht Komponenten.

Bild 4.8 zeigt prozentuale Abweichungen experimentellen Siededichten von LNG-Gemischen, also von verflüssigtem Erdgas für ein 8-Komponenten-Gemisch. Im oberen Dia-

gramm sind die Abweichungen der Messwerte von den aus der GERG-2008 berechneten Siededichten aufgetragen. Das untere Diagramm veranschaulicht die Abweichungen der gemessenen Siededichten von den aus der immer noch sehr häufig benutzten Peng-Robinson-Gleichung berechneten Werten.

Bei der GERG-2008 liegen die Abweichungen zwischen 0,1% und 0,4%, wobei aber die Daten selbst eine Unsicherheit bis zu 0,3% haben. Im Gegensatz dazu betragen die Differenzen zwischen den Messwerten und den aus der Peng-Robinson-Gleichung berechneten Siededichten 10% und mehr.

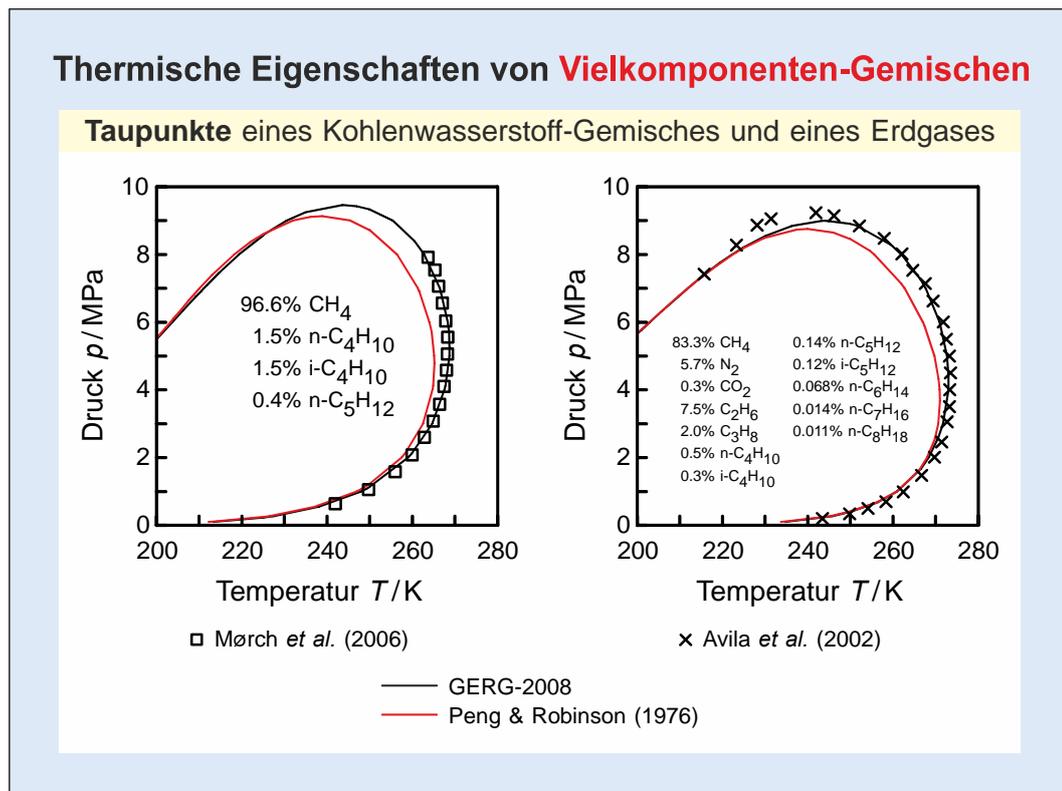


Bild 4.9. Wiedergabe von experimentellen Mehr-Komponenten Phasengleichgewichten, speziell von Taupunkten.

In Bild 4.9 sehen wir im Druck-Temperatur Diagramm gemessene Taupunkte (also Kondensation der Gasphase) eines Kohlenwasserstoff-Gemisches aus 4 Komponenten (linkes Diagramm) und eines Erdgases aus 12 Komponenten (rechtes Diagramm) - und das Ganze auch noch im kritischen Gebiet. Man sieht, dass die GERG-2008 (schwarze Linie) die Messwerte sehr gut trifft und die Peng-Robinson-Gleichung (rote Linie) systematisch von den Messwerten abweicht. Die größten Abweichungen dieser Gleichung betragen fast 10 K bzw. fast 1 MPa.

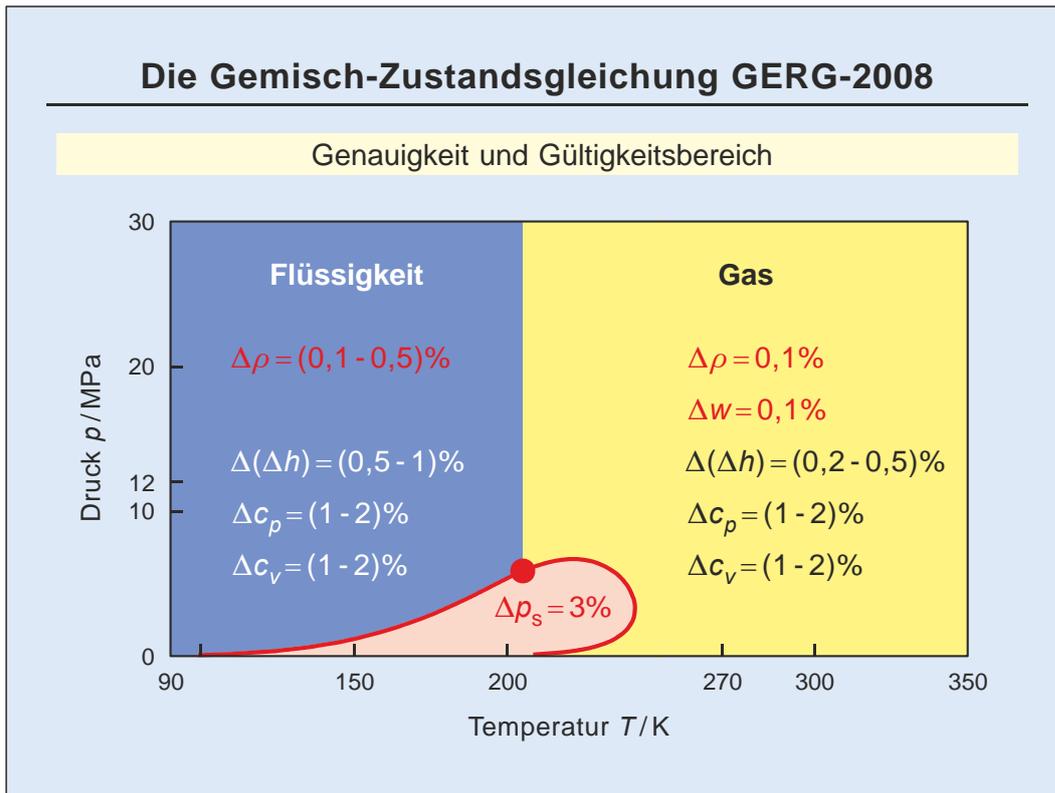


Bild 4.10. Genauigkeiten der GERG-2008.

Im Druck-Temperatur Diagramm von Bild 4.10 sehen wir die Angaben für die erreichten Genauigkeiten. Die roten Angaben entsprechen den geforderten Werten, also 0,1% in der Dichte und der Schallgeschwindigkeit (siehe Bild 4.4) und als „Zugabe“ die geringen Unsicherheiten in den kalorischen Größen Enthalpie und Wärmekapazitäten.

Der „normale“ Gültigkeitsbereich ist durch folgenden Temperatur- und Druckbereich gekennzeichnet:

$$90 \text{ K} \leq T \leq 450 \text{ K}$$

$$p \leq 35 \text{ MPa.}$$

Der erweiterte Gültigkeitsbereich ist durch folgende Angaben gekennzeichnet

$$60 \text{ K} \leq T \leq 700 \text{ K}$$

$$p \leq 70 \text{ MPa.}$$

Im erweiterten Gültigkeitsbereich sind die Unsicherheiten gegenüber den Angaben in Bild 4.10 etwas erhöht.

Die Aussagen zur GERG-2008 lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

Die GERG-2008 ist eine Zustandsgleichung für Erdgase und andere Gemische aus den spezifizierten 21 Komponenten mit hoher Genauigkeit für Gas, Flüssigkeit und für das Phasengleichgewicht. Beispiele für andere Gemische als typische Erdgase sind „rich natural gas“ (RNG, Gase mit einem sehr geringen Methangehalt, d. h. reich an den übrigen Komponenten), Hythane (Erdgase mit sehr wenig Methan und viel Wasserstoff), LPG (Autogas), Kältemittel aus Kohlenwasserstoff-Gemischen und sogar Luft. Diese Aussagen sind in Bild 4.11 grafisch veranschaulicht.



Bild 4.11. Zusammenfassende Aussagen zur Zustandsgleichung GERG-2008.

Die GERG-2008 wurde in der Zwischenzeit zum ISO-Standard erhoben; das ISO-Dokument „ISO 20765-2/3“ ist im Druck.

5. Von genauen Dichtemessungen zu kommerziellen Anwendungen

Ausgehend von unseren Apparaturen zur Dichtemessung zeigt die Skizze in Bild 5.1 das Prinzip einer kommerziellen Schwebewaage. Die hier verwendete Schwebekupplung erlaubt zwei, in der Höhe unterschiedliche, stabile Schwebelagen des Permanentmagneten. Dadurch kann die Probe im Messraum, allein mit Hilfe der Kupplung über den Käfig zur An- und Abkopplung mit der Waage verbunden oder von ihr getrennt werden. Das macht die wichtige Nullpunkteinstellung der Waage *während* der Messungen möglich.

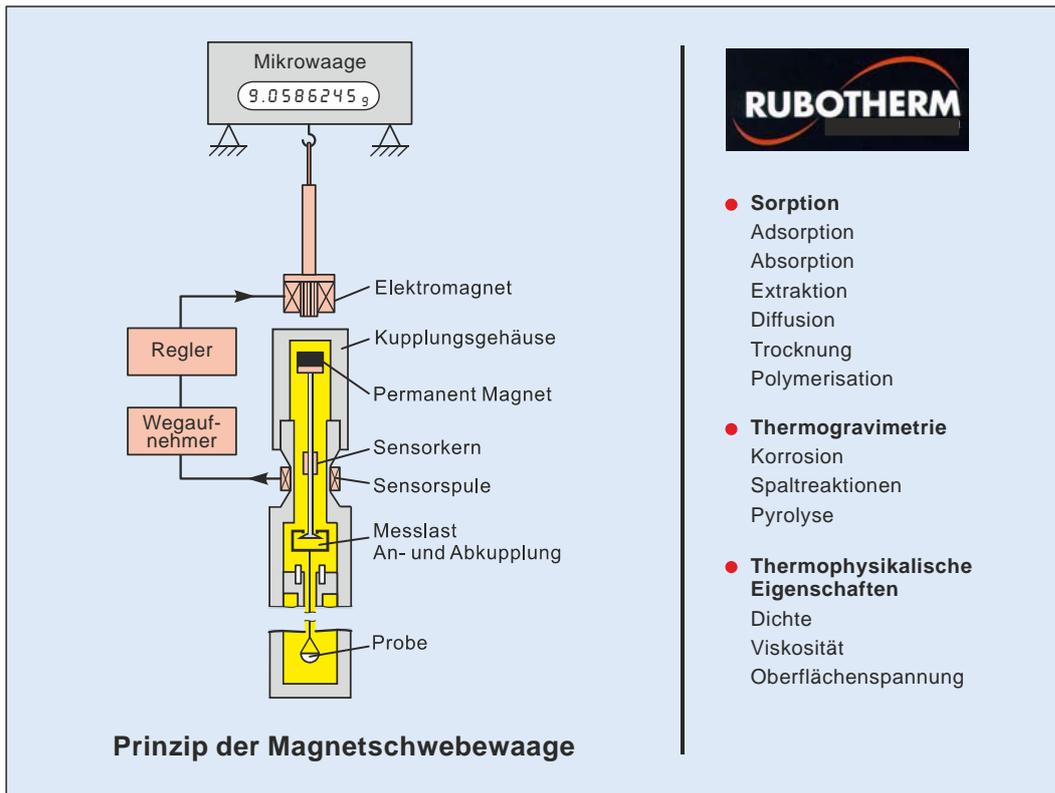


Bild 5.1. Prinzip der Schwebewaagen der Firma RUBOTHERM.

Mit diesem Gerät können alle physikalischen und chemischen Effekte untersucht werden, die sich gravimetrisch, also durch Wägung, verfolgen lassen. Die Schwebewaage erlaubt solche Untersuchungen über große Bereiche von Temperatur und Druck, auch *mit aggressiven Medien* im Probenraum.

Die Firma Rubotherm beschäftigt sich mit dem Bau und Vertrieb solcher Schwebewaagen und ist Spezialist für gravimetrische Analysen.

Es gibt drei grundsätzliche Einsatzgebiete solcher Geräte:

- Sorption (Ad- und Absorption, aber auch Diffusion und Trocknung)
- Thermogravimetrie (chemische Reaktionen, Korrosion, Pyrolyse,...)
- Thermophysikalische Eigenschaften (Dichte und Viskosität)

Die Firma wurde 1990 als Start-up des Lehrstuhls für Thermodynamik der Ruhr-Universität von Herrn Kleinrahm, Herrn Lösch und mir gegründet. Die Firma hat etwa 30 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter (siehe Bild 5.2), und es gibt zwei kleine Tochterfirmen in den USA und in China. In 30 Ländern gibt es Distributoren (Vertretungen), davon etwa die Hälfte in Europa. Rubotherm-Schwebewaagen stehen auf allen Kontinenten.

Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter von Rubotherm



Bild 5.2. Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter von RUBOTHERM.

Ich bin einer der Gesellschafter, aber nicht im operativen Geschäft tätig. Zwei Geschäftsführer von Rubotherm sind heute hier.

6. Mein Dank

Zum Schluss möchte ich die Frage stellen, wie haben sich unsere Forschungsergebnisse überhaupt erreichen lassen? Ich sehe drei Gründe:

1. Vision
2. Durchhaltevermögen
3. exzellente Mitarbeiter

Deshalb geht mein Dank an *alle* Mitarbeiter, *aber sechs* von ihnen möchte ich namentlich nennen. In Bild 6.1 sind die Fotos dieser Mitarbeiter, die maßgeblich zu unseren Innovationen beigetragen haben, zusammengefasst.

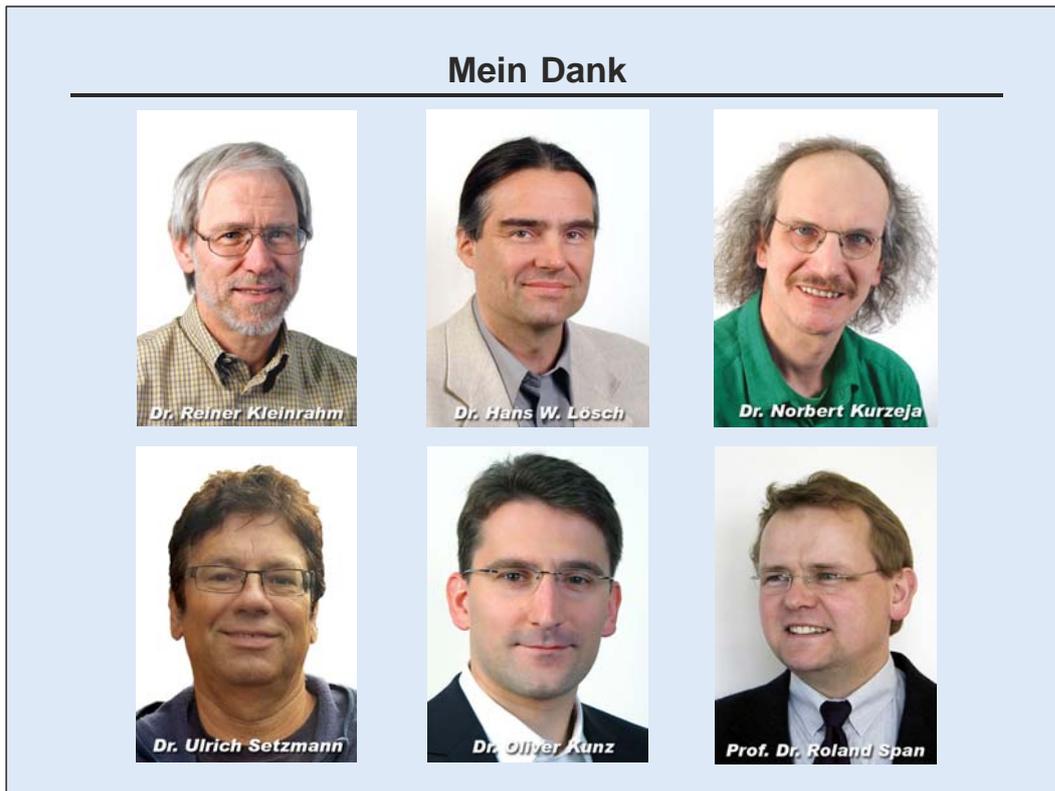


Bild 6.1. Mitarbeiter des Lehrstuhls für Thermodynamik, die maßgeblich zu unseren Innovationen beigetragen haben.

Als erstes zu den Experimentatoren:

(1) *Reiner Kleinrahm* hat in seiner 6-jährigen Promotionszeit die Zwei-Senkkörper-Dichtemessanlage entwickelt, aufgebaut und mit Messungen abgeschlossen. Wir waren damals ziemlich unerfahren, es gab kein Vorbild, und wir hatten nur wenig Geld.

(2) *Hans-Wilhelm Lösch* hat die Magnetschwebekupplung entwickelt und gebaut, ohne die es unsere beiden Dichtemessapparaturen und die Nachfolgeanlagen weltweit nicht geben würde.

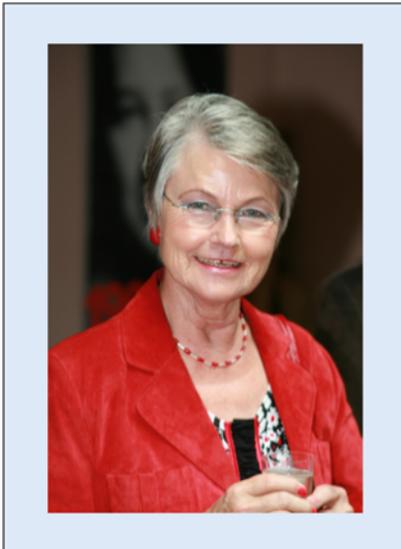
(3) *Norbert Kurzeja* hat unsere extrem genaue Kritische-Punkt-Apparatur aufgebaut, über die ich nicht berichtet habe. Seine Supermessungen sind die Basis für unsere Aussagen zum Verhalten der reinen Stoffe am kritischen Punkt. Wenn unsere Schlussfolgerungen richtig sind, haben wir die Lehrmeinung zu den sog. kritischen Exponenten gekippt.

Nun zu den Entwicklern unserer Zustandsgleichungen:

(4) *Ulrich Setzmann* hat das Strukturoptimierungsverfahren entwickelt, die rechentechnische Basis für alle unsere Zustandsgleichungen, auch für die GERG-2008.

(5) *Oliver Kunz* hat die Zustandsgleichung GERG-2008 für Erdgase und andere Gemische entwickelt. Das war eindeutig unser längstes und schwierigstes Zustandsgleichungs-Projekt.

(6) *Roland Span* ist mein Nachfolger auf dem Lehrstuhl für Thermodynamik. Er hat mit der Zustandsgleichung für Kohlendioxid promoviert und während seiner Habilitationszeit unsere Zustandsgleichungs-Projekte intensiv betreut. Er hat das Gebiet der sog. kurzen Zustandsgleichungen kreierte und Gleichungen entwickelt, die auch für nicht so gut vermessene Stoffe eine vernünftige Qualität haben – für industrielle Anwendungen ganz wichtig. Ich muss zugeben, dass ich vor etwa 10 Jahren gedacht habe, dass das Forschungsgebiet der Zustandsgleichungen in Deutschland zu Ende geht. Das war aber nicht so – Herr Span hat in Bochum wieder ein starkes Zustandsgleichungsteam aufgebaut – und das ist auch gut so.



Ich habe die ganzen Jahre wirklich viel gearbeitet. In all den Jahren hat mir meine Frau den Rücken frei gehalten und die Familie in allen Belangen gemanagt. Ohne ihre Geduld, ihr Verständnis und ihre Hilfe hätte ich meine beruflichen Ziele und die guten Ergebnisse auf keinen Fall erreichen können. Danke Anneliese!

Bild 6.2. Meine Frau Anneliese.

Für Impressionen der Festveranstaltung bitte umblättern!

IMPRESSIONEN DER FESTVERANSTALTUNG



Festversammlung.



Begrüßung durch den Rektor der Technischen Universität Dresden.



Begrüßung durch den Dekan der Fakultät Maschinenwesen.



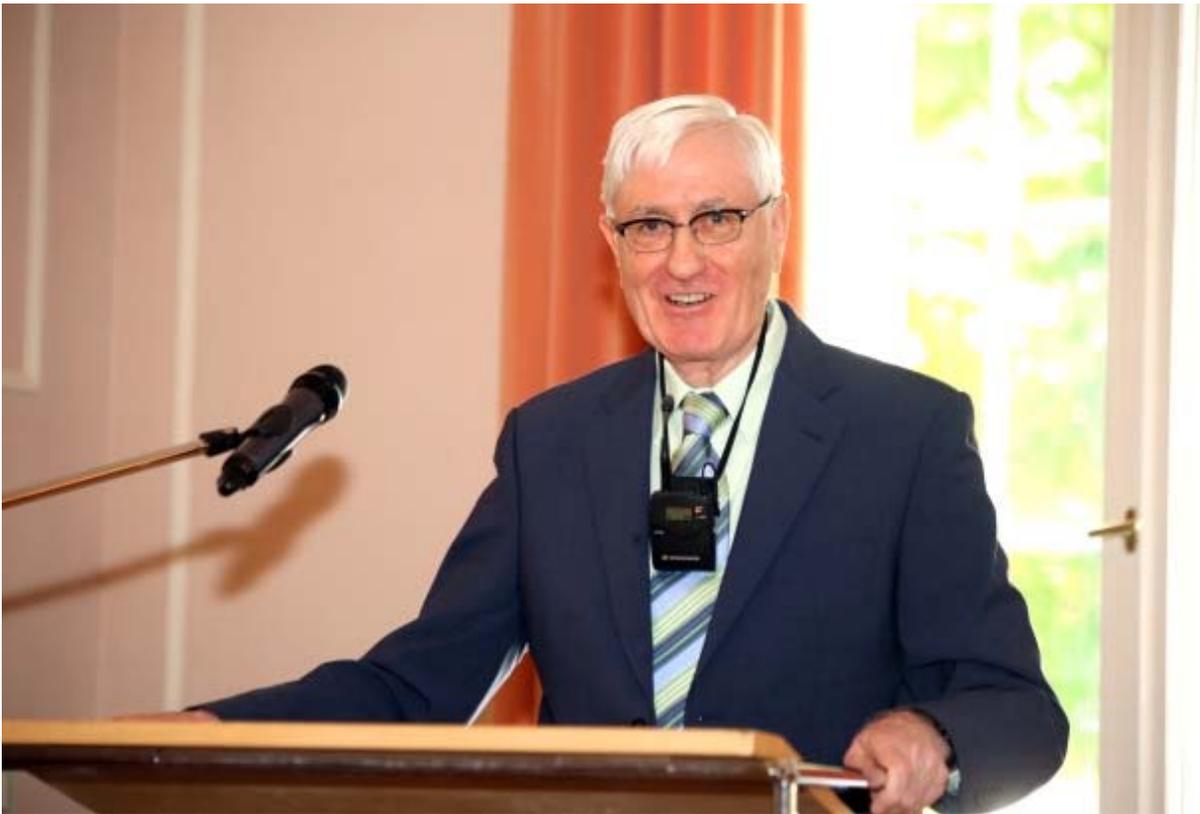
Grußwort des Vizepräsidenten und Vorsitzenden des Deutschen Nationalen Komitees der IAPWS.



Laudatio der Inhaberin der Professur für Technische Thermodynamik am Institut für Energietechnik der Fakultät Maschinenwesen.



Übergabe der Ehrenpromotionsurkunde.



Festvortrag des Ehrenpromovenden.



Familie Wagner mit dem Rektor.





