

Wärmeübertragung 1970

Rückblick und Ausblick von der Vierten Internationalen Konferenz für Wärmeübertragung

U. GRIGULL

Institut A für Thermodynamik der Technischen Universität München

Wärmeübertragung 1970*

Rückblick und Ausblick von der Vierten Internationalen Konferenz für Wärmeübertragung

U. Grigull, Institut A für Thermodynamik der Technischen Universität München

Die auf der Vierten Internationalen Konferenz für Wärmeübertragung vorgelegten 350 Arbeiten geben einen repräsentativen Querschnitt der aktuellen Probleme dieses Teilgebiets der Ingenieurwissenschaften. Runde-Tisch-Gespräche während der Konferenz zeigten die mögliche Weiterentwicklung der Lehre von der Wärmeübertragung in den siebziger Jahren auf, insbesondere die interdisziplinäre Zusammenarbeit mit benachbarten Fachbereichen. – Ein auf der Konferenz vorgeführter wissenschaftlicher Film zeigte die Möglichkeiten, Vorgänge der Wärmeübertragung sichtbar zu machen. Diese Visualisierung dient der qualitativen Darstellung ebenso wie der quantitativen Auswertung; auch ist der didaktische Wert derartiger wissenschaftlicher Filme für den akademischen Unterricht beträchtlich.

Die Vierte Internationale Konferenz für Wärmeübertragung, die Anfang September 1970 in Versailles stattfand, gibt Gelegenheit zu einem kritischen Überblick zur Lage auf diesem Teilgebiet der Ingenieurwissenschaften. Die Wärmeübertragung ist, verglichen mit ihren älteren Schwesterwissenschaften, der Mechanik und der Thermodynamik, noch verhältnismäßig jung. Wenn auch die älteste bisher nachgewiesene Veröffentlichung von *Sir Isaac Newton* aus dem Jahre 1701 stammt, begann die wissenschaftliche Durchdringung doch erst am Anfang unseres Jahrhunderts.

Es mag daher überraschen, daß internationale Konferenzen mit fast 1000 Teilnehmern zustande kommen und daß sich zu deren Vorbereitung eine Assembly for International Heat Transfer Conferences gebildet hat, die für die Kontinuität der Konferenzen verantwortlich ist. Man darf nicht übersehen, daß die Wärmeübertragung für sehr viele Gebiete der Technik ein Schlüsselproblem darstellt. Es ist jedem geläufig, daß ein Bauteil einer Maschine eine mechanische, durch die Festigkeit bedingte obere Anwendungsgrenze hat. Die hochentwickelte Festigkeitslehre, die im akademischen Unterricht von beträchtlicher Bedeutung ist, dient der Berechnung dieser mechanischen Grenze.

Thermische Anwendungsgrenze

Viel weniger geläufig ist es, daß meist auch eine „thermische Anwendungsgrenze“ besteht, die auch durch stärkere Dimensionierung nicht wesentlich heraufgesetzt werden kann. Die Beherrschung der Betriebstemperatur ist aber nahezu vollständig ein Problem der Wärmeübertragung. Am leichtesten ist diese Sachlage bei heißgehenden Teilen einzusehen, bei denen die Festigkeit unter dem Einfluß hoher Temperaturen drastisch abnimmt, also etwa bei Wärmekraftmaschinen. Aber auch der sog. kalte Maschinenbau kennt die thermische Anwendungsgrenze.

Die Belastung eines Lagers, die Zerspanungsleistung einer Werkzeugmaschine, die Leistung eines elektrischen Generators oder Transformators sind wesentlich durch Fragen der Wärmeübertragung bedingt, und auch die moderne Leistungselektronik ist in kurzer Zeit an dieser thermischen Grenze angelangt. Auch eine Telefonzentrale kann bei ungenügender Wärmeabfuhr ausfallen.

Der Verfahrenstechnik verdankt die Wärmeübertragung seit Jahrzehnten entscheidende Anregungen. Der Zwang, empfindliche Produkte in vollautomatischen Großanlagen herzustellen, bedeutet die Herausforderung, Fragen der Temperaturkontrolle und damit der Wärmeübertragung in großem Umfang zu untersuchen. So ist es auch kein Zufall, daß in den USA wie in der Bundesrepublik die zuständigen Fachausschüsse eng mit den verfahrenstechnischen Organisationen, bei uns mit der Verfahrenstechnischen Gesellschaft, zusammenarbeiten.

Weitere bedeutende Förderungen kamen von der Kerntechnik und der Weltraumforschung. Beiden ist gemeinsam, daß das fertiggestellte Gerät, der Kernreaktor oder die Rakete, nach Inbetriebnahme nicht mehr zugänglich ist. Bei beiden stellen Probleme der Wärmeübertragung Engpässe dar, die Wärmeabfuhr aus dem Core des Reaktors und die Kühlung beim Wiedereintritt der letzten Stufe. Es ist allgemein bekannt, daß in allen Industrienationen zur Lösung dieser Probleme beträchtliche Mittel für die theoretische und experimentelle Forschung aufgewandt wurden. Die Ergebnisse kommen auch den konventionellen Techniken zugute, und das wissenschaftliche Niveau der Lehre von der Wärmeübertragung ist durch diesen Aufwand beträchtlich angehoben.

Siedevorgänge

Die Konferenz in Versailles spiegelte in ihren Beiträgen sehr genau die Aktualität der einzelnen Teilgebiete. Von den etwa 350 angenommenen Arbeiten, die von 36 Rapporteurs kommentiert wurden, beschäftigten sich allein 89 mit Problemen des Siedens. Obwohl in letzter Zeit bedeutende Fortschritte im Verständnis der Teilphänomene

* Vortrag auf dem Jahrestreffen der Verfahrens-Ingenieure, 13. bis 15. Oktober 1970 in München.

des Siedevorgangs gemacht wurden, können wir doch heute noch nicht von einer vollständigen Beherrschung und damit Vorausberechnung sprechen.

Die Siedevorgänge können als Beispiel dienen für jene komplexen Phänomene, die heute im Mittelpunkt des Interesses stehen, wie es sich aus den Titeln der eingereichten Arbeiten leicht ablesen läßt. In der Frühzeit der Wärmeübertragung wurden verständlicherweise zunächst die einfachen Fälle behandelt, also jene mit einfachen Geometrien und wohldefinierten einfachen Randbedingungen. Demgegenüber beschäftigt sich die Forschung heute stark mit der Wechselwirkung zwischen Teilvergängen und Teilsystemen. Hierzu gehören die mehrphasigen Strömungen, die Wechselwirkung zwischen freier und erzwungener Konvektion, zwischen Konvektion und Strahlung, zwischen Konvektion und chemischer Reaktion, der Einfluß von Schwingungen und von künstlichen Rauigkeiten und der Einfluß von elektrischen und magnetischen Feldern auf den Wärmeübergang.

Datenbänke

Auch unter diesen komplexen Problemen gibt es wieder eine verhältnismäßig kleine Gruppe von einfachen Fällen, in denen wir über eine theoretische Lösung verfügen. Der gezielten Experimentalforschung bleibt noch ein weites Feld. Natürlich ist es das gemeinsame Ziel theoretischer und experimenteller Forschung, möglichst viele Fälle zu einfachen zu machen. Wegen der großen Zahl der Parameter ist eine allgemeine Lösung meist aussichtslos, es hat sich aber in den letzten Jahren eine in unserem Gebiet neuartige Forschungsmethodik herausgebildet, die der sog. Datenbänke.

Die schon erwähnten beträchtlichen Aufwendungen für die Experimentalforschung in der Kerntechnik und der Raumfahrttechnik haben eine Fülle von Einzelergebnissen für bestimmte gezielte Anwendungen erbracht, die ohne weitere Auswertung für einen allgemeinen Fortschritt verloren sein würden. Die große Speicherkapazität großer Rechenanlagen erlaubt es aber, die Ergebnisse mit ihren Einflußgrößen zu Datenbänken zusammenzustellen, die sich nun nach den verschiedensten Gesichtspunkten abfragen lassen. Für den Fachmann, der mit einem theoretischen Konzept diese Daten abfragt, steht damit ein Rohmaterial von bisher unerreichter Vollständigkeit zur Verfügung. Diese Methode hat schon erste Erfolge erzielt im Bereich der Stoffgrößen und der Zweiphasenströmung.

„Heat Transfer in the Seventies“

Auf der Konferenz in Versailles wurden aber nicht nur vorgelegte Arbeiten kommentiert und diskutiert, es wurde auch über die mögliche Weiterentwicklung des Fachgebietes Wärmeübertragung gesprochen. Im Auftrag der amerikanischen National Science Foundation hatte Prof. R. H. Sabersky, Pasadena, unter Mitarbeit zahlreicher Fachkollegen ein Gutachten mit dem Titel Heat Transfer Research in the Seventies erstellt, das er in einem Runden-Tisch-Gespräch zur Diskussion stellte. Neben einer Aufzählung ungelöster Probleme in den klassischen Anwen-

dungsgebieten der Wärmeübertragung enthielt dieses Gutachten auch eine Betrachtung über solche Disziplinen, in denen die Wärmeübertragung und mit ihr die thermische Konvektion zwar eine bedeutende Rolle spielt, eine Zusammenarbeit mit den Fachleuten unseres Gebietes aber bisher kaum zu verzeichnen ist. Von diesen Gebieten seien hier einige erwähnt, wobei die aufgeführten Teilprobleme naturgemäß z. T. die Verhältnisse auf dem amerikanischen Kontinent widerspiegeln:

Landwirtschaft, mit den Fragen der Lebensbedingungen von Nutz- und Haustieren in heißen Klimazonen und der möglichen Beeinflussung dieser Umwelt, den Fragen des zeitlichen Temperaturgangs in verschiedenen Böden und seines Einflusses auf den Ertrag und auf die Anwendung von künstlicher Düngung und von Pflanzenschutzmitteln, mit den Fragen künstlicher Reifung und der Konservierung von Lebensmitteln, und schließlich mit den Problemen des Lokalklimas in Stadt und Land und seiner künstlichen Beeinflussung, z. B. durch Parks in Großstädten. Weitere Arbeiten beschäftigten sich mit Biotechnik und Ökologie, mit den Fragen der thermischen Wechselwirkung zwischen dem lebenden System und der Umgebung, mit der Benutzung der Temperaturverteilung zur Diagnose, mit der Konservierung lebender Zellen, schließlich dem Verdunstungsmechanismus und dem Wasserbedarf von Pflanzen.

Weiter wurden als vordringliche Probleme die Wärmeabfuhr aus elektronischen Anlagen, Fragen des Brand-schutzes und der Brandbekämpfung sowie die Temperaturkontrolle bei den verschiedenen Verfahren der spanlosen und spanabhebenden Fertigung erwähnt.

Interdisziplinäre Zusammenarbeit

Von besonderer Bedeutung sind bei dieser Aufzählung Fragen der Wärme- und Stoffübertragung in der Meteorologie, der Geophysik und Astrophysik.

Die großräumige Konvektion in der Atmosphäre und im Ozean ist ja in der Tat auch ein Problem der Wärme- und Stoffübertragung, und es ist sehr erstaunlich, daß die interdisziplinäre Zusammenarbeit hierbei so gut wie vollständig eingeschlafen ist. Es muß daran erinnert werden, daß der Meteorologe *Wilhelm Schmidt* in den 20er Jahren jenen wichtigen Begriff einführte, der heute turbulente Austauschgröße genannt wird und der in der gesamten Strömungslehre eine bedeutende Rolle spielt. Der letzte deutsche Aerodynamiker von Rang, der noch in Begriffen der Nachbardisziplin gedacht hat, scheint *Ludwig Prandtl* gewesen zu sein, dessen bekanntes Lehrbuch mehrere Kapitel aus der Meteorologie und Ozeanographie enthielt.

Der Bericht von Prof. *Sabersky*, der in Versailles sehr lebhaft diskutiert wurde, umfaßte ein Forschungsprogramm von einem Umfang, der sich in übersehbarer Zeit nur durch gemeinsame Anstrengungen in vielen Ländern und durch übernationale Zusammenarbeit bewältigen läßt. Wir sollten uns auch in der Bundesrepublik zu einer Mitarbeit an diesen Fragen anregen lassen. Das Instrumentarium zu einer gezielten interdisziplinären Gemeinschaftsforschung ist in unserem Lande glücklicherweise bereits vorhanden. Man denke nur an die Schwerpunkte

der Deutschen Forschungsgemeinschaft und an die Sonder-Forschungsbereiche des Wissenschaftsrates. Daß viele der im Bericht genannten Forschungsthemen auch eng mit der Verfahrenstechnik zusammenhängen, sei nur der Vollständigkeit halber erwähnt.

Eine solche wissenschaftliche Kooperation über die Grenzen der Länder und der Fachbereiche hinweg dient nicht nur der Rationalisierung wissenschaftlicher Arbeit mit ihren ständig steigenden Aufwendungen, sie wird uns vielmehr gerade durch die Folgen der industriellen Entwicklung aufgezwungen. Hier sind vor allem die Probleme des Umweltschutzes zu sehen, der mit Recht heute in aller Munde ist und der in besonderem Maße eine Herausforderung an die Ingenieur-Wissenschaft bedeutet. Die Rolle der Übertragungsvorgänge von Wärme und Stoff ist dabei nicht gering.

Internationale Aktivitäten

In diesem Zusammenhang scheint eine kurze Betrachtung über weitere internationale Aktivitäten auf dem Gebiet der Wärmeübertragung angebracht.

Neben der schon erwähnten Assembly, die für die großen internationalen Konferenzen alle vier Jahre verantwortlich ist, existiert seit 1968 ein International Center for Heat and Mass Transfer mit dem Sitz in Belgrad. Dieses Zentrum veranstaltet jährlich ein Seminar über ein eng begrenztes Thema mit begrenzter Teilnehmerzahl in Herceg Novi an der dalmatinischen Küste. Die bisherigen Themen waren

- 1968 Wärme- und Stoffübertragung in turbulenten Grenzschichten,
- 1969 Wärme- und Stoffübertragung in abgelöster Strömung,
- 1970 Wärme- und Stoffübertragung in rheologischen Flüssigkeiten.

Für dieses und die nächsten Jahre sind folgende Themen geplant:

- Wärmeaustauscher,
- Wärme- und Stoffübertragung in der Umwelt,
- Wärme- und Stoffübertragung in flüssigen Metallen.

Die bisherigen Seminare verliefen nach übereinstimmendem Urteil der Teilnehmer sehr erfolgreich. In gelöster kollegialer Atmosphäre wurden freimütig die Ergebnisse der eigenen Arbeiten diskutiert, und in Open-Forum-Gesprächen kam manches zur Sprache, was den interessierten Forschungsstätten in Hochschulen und Industrie manche verborgene Bemühungen ersparen konnte. Geplant sind neben den Seminaren förmliche Fortbildungskurse in Advanced Heat Transfer, auch die Schaffung ständiger Arbeitsmöglichkeiten für Fachleute aus aller Welt in Verbindung mit leistungsfähigen Computern ist im Gespräch.

Mitte September 1970 tagte in Wien eine Besprechungsgruppe von etwa 20 Teilnehmern aus aller Welt, die von der International Atomic Energy Agency (IAEA) eingeladen war mit dem Ziel, Empfehlungen für ein stärkeres Engagement der Agency auf dem Gebiet der Wärmeübertragung auszuarbeiten. Hier bahnt sich eine sehr fruchtbare weitere internationale Zusammenarbeit an besonders deswegen, weil einerseits die Agency über bedeutende Möglichkeiten verfügt, Fachleute zu Ausspra-

chen über spezielle Themen zusammenzubringen, und weil andererseits die Kerntechnik an nahezu allen Teilgebieten der Wärmeübertragung interessiert ist. Glücklicherweise ist nicht an die Gründung einer weiteren internationalen Organisation gedacht als vielmehr an die Unterstützung bestehender internationaler Aktivitäten, insbesondere der Internationalen Konferenz für Wärmeübertragung und des Internationalen Zentrums für Wärme- und Stoffübertragung.

Schließlich sind noch Kontakte zur UNESCO zu erwähnen, die auf der Versailler Konferenz durch ihren Präsidenten vertreten war. Die UNESCO bevorzugt die Unterstützung von Fachgebieten, die für möglichst viele andere Gebiete Schlüsselprobleme enthalten und deren Entwicklung daher Engpässe beseitigen kann. In diesem Zusammenhang wurden genannt: Energie-Erzeugung, Nachrichtentechnik, Umwandlung von Stoffen (also Verfahrenstechnik), Transport, Biotechnik und Umwelttechnik. Natürlich gehört die Wärmeübertragung auch in diesen Katalog, da sie ja sogar an fast allen der genannten Gebiete maßgebend beteiligt ist.

Im Vergleich mit diesen internationalen Aktivitäten sind die Anstrengungen in der Bundesrepublik verhältnismäßig bescheiden. Nur 6% aller Beiträge zur Versailler Konferenz stammten aus unserem Lande, während 60% allein aus den drei englischsprachigen Ländern USA, Kanada und England eingereicht waren. Noch überraschender war es, daß nur 14% der Besucher Deutsche waren, während 22% aus USA und Kanada nach Versailles angereist waren. Wir müssen uns wohl etwas mehr anstrengen, um mit der wissenschaftlichen und technischen Entwicklung Schritt halten zu können. In der letzten Zeit sind einige Fortschritte erzielt worden. Hierzu gehört die Herausgabe einer neuen Zeitschrift „Wärme- und Stoffübertragung“, die sich in drei Jahren recht gut entwickelt hat, sowie die Einrichtung eines Schwerpunktes Siedevorgänge bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft, der lebhaftes Interesse bei den angesprochenen Hochschulinstituten gefunden hat. Weitere Maßnahmen in dieser Richtung sind vorgesehen.

Innovation

Bei der Diskussion des Sabersky-Reports in Versailles kam auch die Frage zur Sprache, ob man mehr die Grundlagenforschung oder die Anwendung wissenschaftlicher Erkenntnisse fördern sollte. Für diese alte Streitfrage fand man natürlich auch in Versailles keine Patentlösung, aber es wurde wieder einmal die Schwierigkeit deutlich, neue wissenschaftliche Erkenntnisse in die Praxis umzusetzen, also die Innovation zu fördern. Stellt das nach dieser Diskussion schon in den USA ein Problem dar, so ist natürlich die Frage berechtigt, wie es damit in unserem Lande steht. Nimmt man die Prospekte der Wärmeaustauscherbauenden Industrie als Maßstab, so muß man leider feststellen, daß häufig ohne die Anwendung neuerer Erkenntnisse gebaut wird, von Innovation also kaum die Rede sein kann. Hiervon gibt es bemerkenswerte Ausnahmen vor allem bei Firmen mit starken Auslandsbeziehungen. Man findet bei diesen vorzüglich ausgestattete Firmenschriften, die die Arbeit eines Fachmanns verraten.

Es lohnt schon, den Ursachen dieser starken Unterschiede nachzugehen. Um neue Erkenntnisse praktisch anzuwenden, muß es zunächst eine hinreichende Zahl gut ausgebildeter Ingenieure geben, die den Wert eines neuen Vorschlags erkennen. Eine Rundfrage bei 14 Hochschulen des deutschen Sprachgebietes ergab, daß (mit zwei Ausnahmen) für die Wärmeübertragung nur zwei Vorlesungsstunden während eines Semesters zur Verfügung stehen. Es ist völlig ausgeschlossen, in zwei Wochenstunden dieses umfangreiche Gebiet auch nur einigermaßen vollständig zu behandeln. Bei rund 200 Wochenstunden in 8 Semestern entfallen also nur 1% auf die Wärmeübertragung (oder 2% einschließlich zweier Übungsstunden). Das ist ein absurder Zustand, besonders wenn man englische oder amerikanische Lehrpläne zum Vergleich heranzieht.

Die zweite Voraussetzung für eine rasche Innovation ist eine regelmäßige Auswertung des Schrifttums. Es hat keinen Zweck, die Tatsache zu beklagen, daß allein über Wärmeübertragung einige tausend Arbeiten im Jahr erscheinen, zumal wir alles tun, um die Forschungsaktivität zu erhöhen. Auch ist es für die heutige Dokumentations-technik kein ernstes Problem, dieses Schrifttum für jeden beliebigen Zugriff bereitzustellen. Soweit hier noch Lücken bestehen, bieten sich den Wirtschaftsverbänden dankbare Aufgaben an. Was sich aber nicht mechanisieren läßt, ist die Umsetzung wissenschaftlicher Erkenntnisse in die betriebliche und bauliche Wirklichkeit. Man sollte das als eigenständige Aufgabe ansehen, die gleichberechtigt neben der Forschung steht und ohne deren Lösung die Grundlagenforschung letzten Endes ihren Sinn verliert. Das in Versailles diskutierte Problem ist also eigentlich ein Scheinproblem; es darf nicht heißen entweder-oder, sondern es muß heißen sowohl als auch.

Ignoranzfaktoren

Je weniger man einen Vorgang versteht, desto vorsichtiger wird man den zugehörigen Apparat dimensionieren. Man wird Sicherheitsfaktoren vorsehen, die in Wirklichkeit Faktoren des Nichtwissens sind. Diese Ignoranzfaktoren sind in mehrfacher Hinsicht nachteilig. Überdimensionierte Wärmeaustauscher belasten die Anlagekosten; da sie im Normalbetrieb mit gedrosseltem Kühlwasser gefahren werden müssen, sind sie der Ablagerung und Verkrustung, dem fouling ausgesetzt; und schließlich stellen die unnötigen Toträume die Regelfähigkeit einer vollautomatisierten Anlage in Frage. Kerntechnik und Raumfahrt haben uns gezeigt, wie man die Ignoranzfaktoren drastisch herabdrücken kann. Auch der Verfahrenstechnik und dem Apparatebau wird dieser Weg nicht erspart bleiben. Daß hierbei der Wärmeübertragung eine besondere Rolle zukommt, geht schon daraus hervor, daß im Durchschnitt 25% aller Chemie-Anlagen aus Wärmeaustauschern bestehen; im Bereich der Tieftemperaturtechnik ist der Anteil noch wesentlich höher.

In der besseren Ausnutzung der Ergebnisse der Grundlagenforschung, die jedem zugänglich sind, liegen noch nicht ausgebeutete Reserven, die sich mit angemessenem Aufwand aktivieren lassen. Wir wollen hoffen, daß die dazu notwendige Aktivierungsenergie aufgebracht werden kann.

Interferometrische Beobachtung von Wärmeübertragungs-Vorgängen

Nach diesen Betrachtungen, die sich dem kritischen Chronisten im Anschluß an die Konferenz in Versailles aufdrängen, wurde ein Film gezeigt, der auch in Versailles vorgeführt wurde und der sich mit der Sichtbarmachung von Vorgängen der Wärmeübertragung beschäftigt. Zuvor mögen einige Sätze angebracht sein zur Frage, warum sich ein Hochschulinstitut mit der Herstellung wissenschaftlicher Filme beschäftigt. Hierzu lassen sich mindestens drei Gründe angeben: die qualitative Betrachtung eines Vorgangs, die quantitative Auswertung von Interferenzbildern und der didaktische Wert von Filmen, die Wärmeübergang zeigen.

Im folgenden sollen diese Gründe durch Standphotos aus dem Film belegt werden.

Qualitative Beobachtung

Bei vielen Vorgängen der Wärmeübertragung ist es unumgänglich, sich durch visuelle Beobachtung von dem Charakter des Vorgangs zu überzeugen, von dem Bereich, in dem man sich befindet. Es kann sich handeln um laminare oder turbulente Strömung, um Film- oder Tropfenkondensation, um Blasen- oder Filmsieden. Da es auch pseudostabile Übergangsformen gibt, ist eine Entscheidung „von außen“ nicht immer eindeutig möglich. Es ist daran zu erinnern, daß auch *Osborne Reynolds* berühmte Entdeckung dessen, was wir heute die kritische Reynolds-Zahl nennen, das Ergebnis einer Sichtbarmachung war. Bei solchen qualitativen Beobachtungen findet man manchmal Einzelheiten, die sonst unentdeckt geblieben wären. Dazu bringen die folgenden Abbildungen¹⁾ zwei Beispiele.

Abb. 1 zeigt die Tropfenkondensation von Wasser, mit starker Vergrößerung aufgenommen. Der zeitliche Abstand zwischen den Bildern beträgt einige Hundertstel Sekunden. Durch Zusammenschluß von Tropfen (zwischen Abb. 1a und 1b) oder durch Abrollen (zwischen Abb. 1b und 1c) entstehen freie Flächen zur Bildung neuer Tropfen. Diese neuen Tropfen bilden sich nicht regellos, statistisch auf der Oberfläche verteilt, sondern die alten Konturen der letzten und vorletzten Tropfengeneration werden deutlich bevorzugt. Die mittlere Keimdichte ist also ein sehr komplexer Begriff.

Ein anderes Beispiel aus dem Filmsieden zeigt Abb. 2. Es handelt sich um Kohlendioxid in der Nähe des kritischen Punktes, der Heizdraht hat 1/10 mm Dmr. Wegen der geringen Dichtedifferenz und Oberflächenspannung steigt der Dampf in Säulen von ziemlich regelmäßigem Abstand auf. Dieser Abstand entspricht etwa der gefährlichsten Wellenlänge von Störungen, wie sie *G. I. Taylor* 1950 für einen ähnlichen Fall berechnet hat. Ein zufällig zu kleiner Abstand wird durch Zusammenschluß zweier Säulen zu einer ausgeheilt.

1) Die hier wiedergegebenen 12 Abbildungen stammen von meinen jetzigen oder früheren Mitarbeitern *S. Krischer* (Abb. 1a bis c), *E. Abadzic* (Abb. 2) und *W. Hauf* (Abb. 3 bis 12).

Quantitative Auswertung von Interferogrammen

Als Beispiel zeigt Abb. 3 einen rotierenden Zylinder in freier Luft bei mäßigen Reynolds-Zahlen. Der lokale Temperaturgradient läßt sich durch Messen der Streifenabstände ermitteln. Die Interferometrie dürfte hierin fast allen anderen Meßmethoden überlegen sein. Wegen der

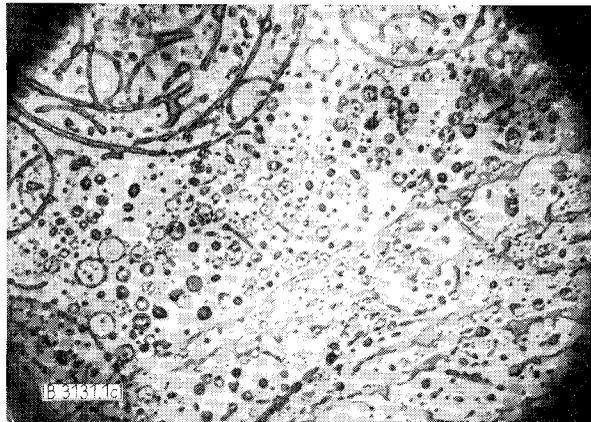
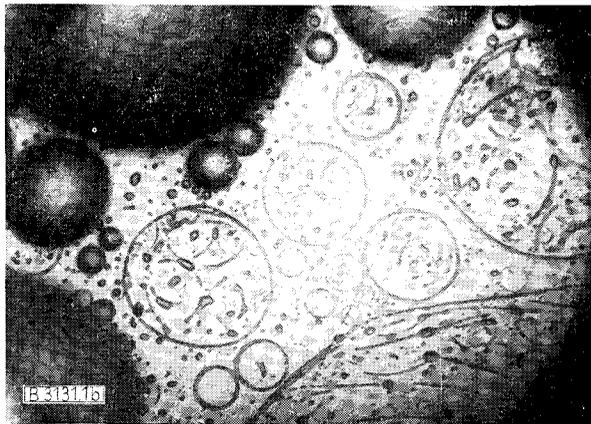
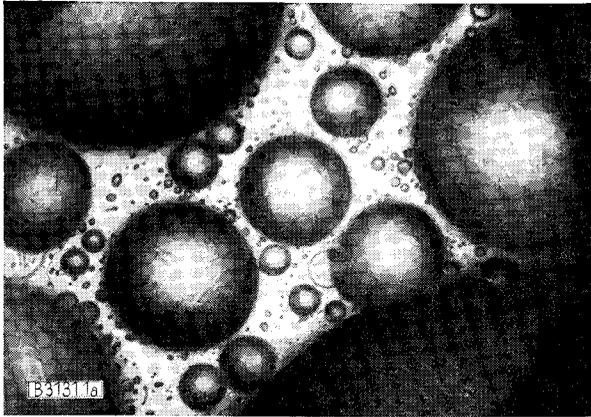


Abb. 1. a-c Tropfenkondensation von Wasser.

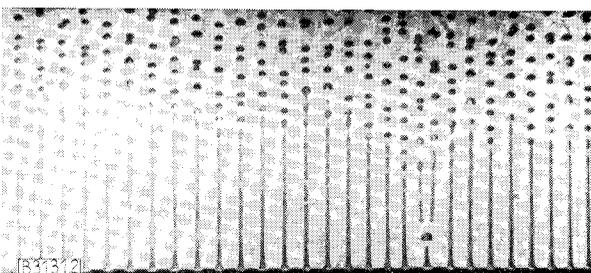


Abb. 2. Aufsteigende Dampfsäulen beim Filmsieden von CO₂ im kritischen Gebiet.

Verdickung der thermischen Grenzschicht am oberen Staupunkt erhält man an dieser Stelle nur eine Nußelt-Zahl von 91% der bei ruhendem Zylinder.

Didaktischer Wert der Sichtbarmachung

Die Wärmeübertragung gilt bei den Studenten als spröde, unanschaulich und daher schwierig, die Prüfungen sind gefürchtet. Bei dieser Sachlage scheint es vernünftig, alle Hilfsmittel zur Veranschaulichung im Unterricht heranzuziehen, dazu in erster Linie sichtbar gemachte Vorgänge in Dia und Film. Abb. 3 kann als Beispiel dienen. Der Student muß lernen, wie man eine thermische Grenzschicht berechnet, aber er hat noch keine gesehen und er weiß auch nicht, ob es eine gibt. Das ist kein triviales Problem.

Abb. 3 zeigt eine solche Grenzschicht, es gibt sie also wirklich. Der Student erkennt ihre charakteristische Form; im Stromlinienbild (das wir hier nicht zeigen) erkennt er, daß sie von außen gespeist wird, sie hat eine gewisse Dicke und endet außen ziemlich abrupt. Näherungsmethoden, die mit endlicher Grenzschichtdicke arbeiten, dürften also erfolgreich sein.

Sehr lehrreich ist auch der Vergleich des rotierenden Zylinders, Abb. 3, mit dem frei angeströmten nach Abb. 4. Auch bei gleicher Reynolds-Zahl ($Re = 590$) bilden sich zwei sehr verschiedene thermische Grenzschichten aus, je nachdem die Bezugsgeschwindigkeit für die Wand oder für den Freistrom gilt.

Abb. 5 zeigt einen Vorgang, der kein reines Grenzschichtproblem ist. Ein horizontaler Behälter wird plötzlich von außen beheizt. Zunächst stellt sich reine Wärmeleitung

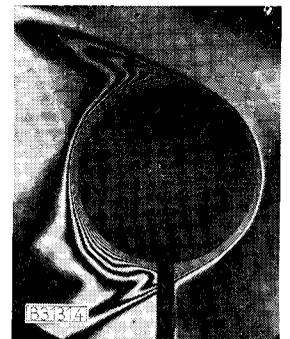
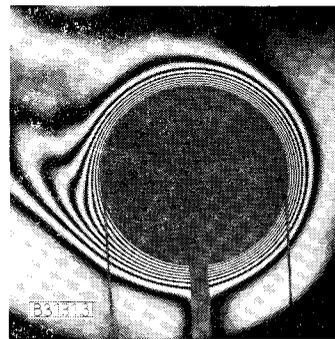


Abb. 3 (links). Rotierender Zylinder, $Re = 590$.

Abb. 4 (rechts). Kreuzstrom am Zylinder, $Re = 590$.

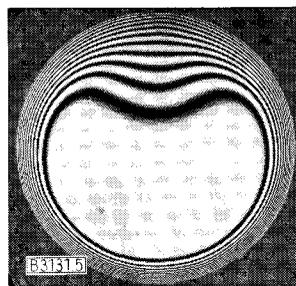


Abb. 5 (links). Mantelbeheizter horizontaler Behälter (nach 35 s.).

Abb. 6 (rechts). Mantelbeheizter horizontaler Behälter (nach 75 s.).

ein, aber dann erzwingt die Aufwärtsströmung in der Grenzschicht eine Abwärtsströmung in der Mitte. Nach 75 s, Abb. 6, ist der Bereich der ungestörten Flüssigkeit kleiner geworden und kurze Zeit später verschwindet die erste Isotherme. Der Endzustand wäre das weiße Feld nach vollständiger Aufheizung. Zur Berechnung des Temperaturfeldes darf man nicht die Vereinfachungen der Grenzschichttheorie benutzen.

Interferometer als Analogrechner

Wir betrachten das Interferometer nicht mehr nur als Gerät zur Visualisierung oder als Meßgerät, sondern als Analogrechner. Die Streifensysteme der Abb. 3 bis 6 sind Lösungen von Differentialgleichungen nebst ihren Randbedingungen, die auf analogem Wege, unter Benutzung der Temperaturabhängigkeit der Brechzahl, gewonnen wurden. Sie zeigen also genau dasselbe wie ein Zeichengerät, das an einen Digitalrechner angeschlossen ist. Das Interferometer ist dem Digitalrechner dadurch überlegen, daß es keine Stabilitätsprobleme wie bei einer numerischen Berechnung kennt. Auch lassen sich leicht komplizierte Geometrien und veränderliche Randbedingungen nachbilden. Diese gegenseitigen Beziehungen soll ein Beispiel verdeutlichen.

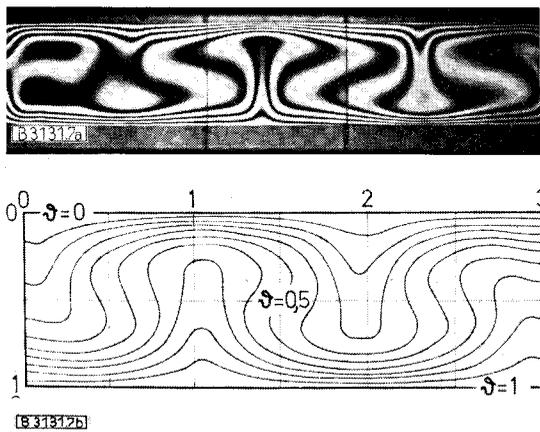


Abb. 7. Horizontaler, von unten beheizter Spalt. Berechnete Isothermen (unten) im Vergleich mit dem Interferenzbild (oben).

Abb. 7 zeigt den horizontalen, von unten beheizten Spalt, in dem bekanntlich bei Überschreiten einer gewissen Rayleigh-Zahl Konvektion einsetzt. Im zweidimensionalen Fall bilden sich einzelne Walzen, deren Isothermen Prof. Churchill, damals Ann Arbor, Michigan, berechnet und auf der 3. Konferenz in Chicago 1966 vorgelegt hatte (unten). Darüber ist eine Photographie eines entsprechenden Versuchs im Interferometer angeordnet. Die Übereinstimmung ist sehr befriedigend, wenn man auch den Unterschied in den Prandtl-Zahlen berücksichtigt, da beim Versuch Wasser ($Pr \approx 7$) verwendet wurde, während die Rechnung für $Pr = 1$ ausgeführt ist. Zur Berechnung hatte Churchill den Anlaufvorgang benutzt, d. h. der Computer begann mit dem homogen temperierten Spalt und berechnete schrittweise die Entwicklung des Temperaturfeldes bis zum Endzustand nach Abb. 7. Die Frage blieb damals (1966) offen, ob die Natur den gleichen Weg geht. Im Film konnte dafür die Bestätigung erbracht werden; beim Anheizvorgang bilden sich tatsächlich die

berechneten Profile aus. Diese Aufnahmen waren schwierig, da die nichtstationären Felder sehr empfindlich gegen thermische Störungen sind.

„Pathologische“ Fälle

Das Interferometer kann aber auch noch Vorgänge sichtbar machen, die sich normalerweise der numerischen Berechnung entziehen. Das sind die Übergänge von einem stabilen zu einem anderen stabilen Zustand mit Überschreiten einer Stabilitätsgrenze. In solchen Fällen, die von uns die „pathologischen“ genannt werden, kann man den Übergang durch vorsichtiges Regulieren stark verlangsamen und dadurch auch den instabilen Zwischenzustand sichtbar machen.

Ein Beispiel dafür zeigt Abb. 8, nämlich den gleichzeitigen Wärme- und Stoffübergang. Hier sieht man einen horizontalen Zylinder, der mit methanol-getränktem Fließpapier umgeben ist. Durch Heizung des Zylinders wird eine Dichte des Methanol-Dampfes erzeugt, die etwa gleich der Dichte der umgebenden Luft ist.

Der Methanol-Dampf kann in diesem Zustand weder eindeutig nach oben oder nach unten abströmen, was zu einer starken Verdickung der Grenzschicht führt. Dieser

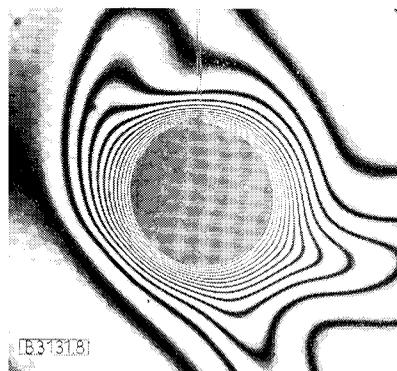


Abb. 8. Gleichzeitiger Wärme- und Stoffübergang (Methanol-Dampf).



Abb. 9. Fallwind am kalten Fenster.

Zustand ist extrem empfindlich gegen äußere Störungen, das System gerät in schwabbelnde Bewegungen. Außerdem läßt sich die Richtungsumkehr der Konvektion von abwärts nach aufwärts unter dem Einfluß der Heizung sichtbar machen.

Heizung und Lüftung, Meteorologie

Schließlich sollen noch einige Modellaufnahmen aus den Gebieten Heizung und Lüftung und der Meteorologie gezeigt werden. Abb. 9 zeigt rechts die kalte Luftströmung, die von einem großen Glasfenster im Winter ausgeht. Die darunter angebrachte Heizung lenkt den kalten Fallwind nach links unten ab, so daß unangenehme Zugserscheinungen eintreten können. Es läßt sich zeigen, daß die resultierende Strömung jede Richtung annehmen kann je nach der Stärke der Heizung.

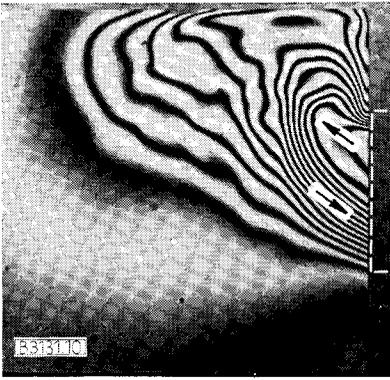


Abb. 10. Luftaustausch durch ein Fenster.

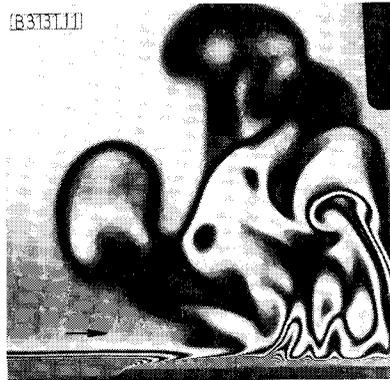


Abb. 11. Landwind - Seewind.

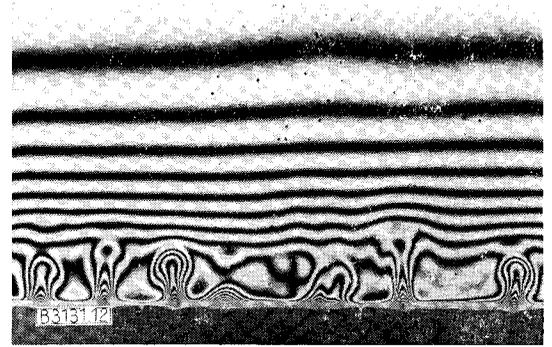


Abb. 12. Wirkung einer Inversionsschicht in der Atmosphäre.

Den Luftaustausch durch ein Fenster, hier im Sommer, zeigt Abb. 10. Kurz nach dem Öffnen strömt im oberen Teil der Fensteröffnung die warme Außenluft nach innen, im unteren Teil die kalte Innenluft nach außen. Der Austauschvorgang klingt schnell ab, aber der Raum unterhalb des Fensters nimmt am Austausch fast nicht teil. Für den Winterbetrieb (Außenluft kälter) braucht man das Bild nur auf den Kopf zu stellen.

Zum Schluß werden noch zwei meteorologische Probleme im Modellversuch gezeigt. Abb. 11 zeigt, wie der Seewind an einer Küste einige Stunden nach Sonnenaufgang entsteht. Die Luft wird über Land (rechts) stärker erwärmt als über See (links). Dadurch wird eine kräftige Brise von See her erzeugt, die die aufsteigende warme Luft

rechts abdrängt. Wir haben zur Verstärkung nicht nur rechts geheizt, sondern zusätzlich links gekühlt, was den Vorgang aber nicht grundsätzlich verändert.

Schließlich zeigt Abb. 12 die Wirkung einer Inversionsschicht in der Atmosphäre. Nach kalter, klarer Nacht hat sich über dem Boden eine überstabile Temperaturschichtung eingestellt. Die am Vormittag beginnende Konvektion in der bodennahen Luftschicht kann diese überstabile Schicht oft nicht bis zum Nachmittag durchstoßen, der Austausch mit den oberen Schichten ist gehindert. Die Folge ist eine Akkumulierung aller Abgase in Bodennähe und die gefürchtete Smog-Bildung. Im Film lassen sich verschiedene Stadien dieses Vorganges zeigen.

Eingegangen am 17. Dezember 1970 [B 3131]