Stefan Braun (Hrsg.)

Festschrift

anlässlich der Emeritierung von

O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Alfred Kluwick

Professor für Strömungsmechanik an der Technischen Universität Wien

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
Vienna University of Technology

Stefan Braun (Hrsg.)

Festschrift

anlässlich der Emeritierung von

O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Alfred Kluwick

Professor für Strömungsmechanik an der Technischen Universität Wien

ISBN 978-3-200-02304-8
© 2011 Stefan Braun / Eigenverlag
Technische Universität Wien,
Institut für Strömungsmechanik und Wärmeübertragung (http://www.fluid.tuwien.ac.at),
Resselgasse 3/E322, 1040 Wien, Österreich
Urheberschaft der Fotos vom Festkolloquium: © Norbert K. Schmeisser
Umschlaggestaltung: S.B.
Satz: LaTeX 2_ε, Times 11pt, TU blau
Druck: Grafisches Zentrum HTU GmbH, Wiedner Hauptstraße 8-10, 1040 Wien, Österreich
Printed in Austria

Vorwort

Die vorliegende Festschrift ist eine chronologische Sammlung von Laudationes, Ansprachen und Festvorträgen zu Ehren von Alfred Kluwick anlässlich seiner Emeritierung sowie der Verleihung der Johann Joseph Ritter von Prechtl-Medaille. Sie entstand aus der spontanen Idee, die in den einzelnen Beiträgen ihm gegenüber zum Ausdruck gebrachte hohe Wertschätzung und Würdigung seines wissenschaftlichen Werkes schriftlich festzuhalten, nicht zuletzt auch deshalb, weil sich darin rund ein Vierteljahrhundert Geschichte des Institutes für Strömungsmechanik und Wärmeübertragung und der Fakultät für Maschinenbau und Betriebswissenschaften an der Technischen Universität Wien widerspiegelt. Ergänzend findet sich im letzten Kapitel eine Zusammenstellung der von Alfred Kluwick veröffentlichten wissenschaftlichen Arbeiten (auf die in den Beiträgen, erkennbar an einer Buchstaben/Zahlenkombination, des Öfteren verwiesen wird) sowie der von ihm betreuten Dissertationen.
Mein besonderer Dank gilt allen Autoren für die freundliche Überlassung ihrer Manuskripte und Vortragsunterlagen.

Wien, im Juli 2011 S. Braun

Inhaltsverzeichnis

Rede im Rahmen der Sitzung des Fakultätsrates der Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften am 21. Okt. 2009 von Bruno Grösel **1**

Laudatio für Alfred Kluwick anlässlich der Emeritierungsfeier im Büro des Rektors am 15. Okt. 2010 von Wilhelm Schneider **2**

Programm des Festkolloquiums am 10. Dez. 2010 **5**

Festansprache von Sabine Seidler **7**

Festansprache von Bernhard Geringer **9**

Festansprache von Franz G. Rammerstorfer **11**

“Bemerkungen zu Alfred Kluwicks wissenschaftlichem Werk”, Festansprache von Wilhelm Schneider **13**

“Nonlinear Resonances”, Festvortrag von Edward A. Cox **18**

“Alfred Kluwick – ein Plädoyer für die Grundlagenforschung aus der Sicht eines Schülers”, Festvortrag von Stefan Braun **25**
Literatur 35

“Warum plagen sich Strömungsmechaniker immer noch mit analytischen Methoden herum?”, Festvortrag von Alfred Kluwick **36**
Literatur 52

Ausgewählte Fotos vom Festkolloquium **52**

Laudatio anlässlich der Verleihung der Johann Joseph Ritter von Prechtl-Medaille der Technischen Universität Wien an Alfred Kluwick am 15. Juni 2011 von Hendrik C. Kuhlmann **56**

Dankesworte anlässlich der Verleihung der Johann Joseph Ritter von Prechtl-Medaille der Technischen Universität Wien am 15. Juni 2011 von Alfred Kluwick **59**

Schriften- und Vortragsverzeichnis von Alfred Kluwick **61**
Bucheditorenschaft (B) 61
Wissenschaftliche Journale (J) 61
Buchbeiträge (C) 64
Tagungsbandbeiträge (T) 65
Vorträge und Poster-Präsentationen mit Tagungsbandbeitrag (P) 65
Vorträge und Poster-Präsentationen ohne Tagungsbandbeitrag (V) 72
Betreute Dissertationen (D) 76

Rede im Rahmen der Sitzung des Fakultätsrates der Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften am 21. Okt. 2009

von Bruno Grösel,
Dekanat für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften, TU Wien

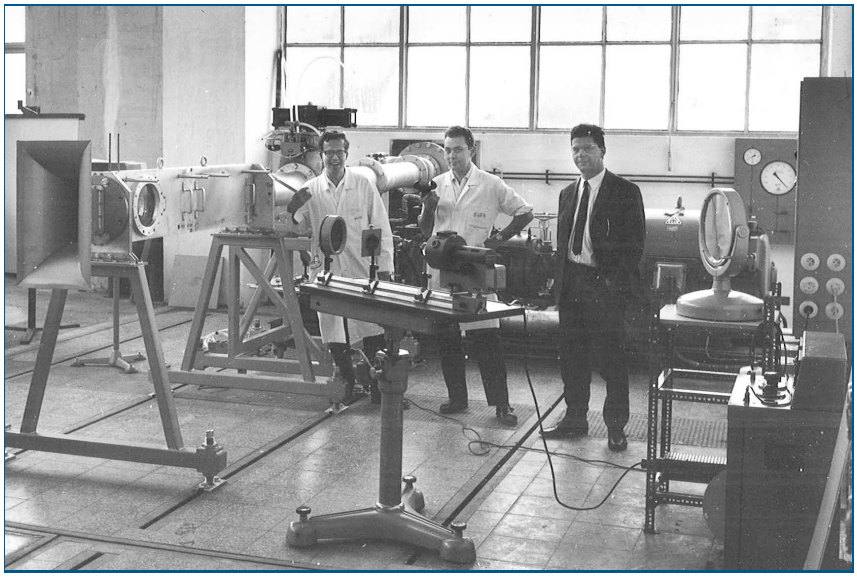
Lieber Alfred!
Mit Ende dieses Jahres trete ich nach 14 Jahren als Dekan ab und Prof. Geringer wird meine Funktion übernehmen. Dies ist daher für mich die letzte Sitzung des Fakultätsrates, an der ich teilnehme, und dies nehme ich gerne zum Anlass, Dich in besonderer Weise anzusprechen. Für Dich ist es zwar noch kein Abschied in die Emeritierung, aber auch für Dich endet damit eine lange Zeit als Vorsitzender des Fakultätsrates. Ab nächstem Jahr wirst auch Du diesem Gremium nicht mehr angehören, da Du im Jahr 2010 emeritieren wirst.
Du hattest mich in dieser meiner langen Tätigkeit als Dekan ja sehr lange als Vorsitzender des Fakultätsrates – vor einigen Jahren hieß dieses Gremium „Fakultätskollegium“ – begleitet und warst dazu bis zu meinem nunmehrigen Ausscheiden bereit. Ich hatte Dich immer wieder gebeten weiterzumachen, denn die Zusammenarbeit mit Dir war sehr angenehm und verlief ohne Reibungsverluste — wir haben an einem Strang gezogen.
Nicht nur ich, auch Du bist bzw. warst ein Langzeit-Funktionär in unserer Fakultät. Von 1987 bis 1991 warst Du Dekan unserer Fakultät und wurdest in dieser Funktion von allen geschätzt. Das Amt des Vorsitzenden des Fakultätskollegiums bzw. des Fakultätsrates bekleidest Du schon seit 1998.
O.Univ.Prof. wurdest Du im selben Jahr wie ich, nämlich 1986, warst aber nach Deiner Habilitation 1974 schon seit 1975 a.o.Prof. an unserer Universität. Damals wurde Euer Institut vom berühmten Professor Oswatitsch geleitet.
Du bist wissenschaftlich hervorragend ausgewiesen, warst in den Jahren nach 1975 Visiting Professor am Virginia Politechnic Institute and State University, ebenso an der University of Michigan.
Du bist Mitglied in vielen wissenschaftliche Organisationen, ich nenne nur einige:
die Society of Applied Mathematics and Mechanics (GAMM),
das American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA),
die International Society for the Interaction of Mechanics and Mathematics,
das Austrian National Committee for Theoretical and Applied Mechanics und
das International Centre for Mechanical Sciences (CISM).

Du hast über 100 Publikationen verfasst, die ich nun natürlich nicht aufzählen kann. Erwähnt sei aber, dass Du mit Deinen Forschungsarbeiten vor allem im Bereich der analytischen Strömungsmechanik ganz entscheidend zum hervorragenden internationalen Ruf unseres Universitätsinstitutes beigetragen hast. Du warst auch einige Jahre Vorstand des Institutes, hast Dich mit Deinen anderen Kollegen am Institut in dieser Funktion aber abgewechselt.
1996 wurde Dir von der Österreichischen Akademie der Wissenschaften der Erwin Schrödinger-Preis zuerkannt, der nur für wirklich hervorragende wissenschaftliche Leistungen von der mathematisch-naturwissenschaftlichen Klasse der Österreichischen Akademie der Wissenschaften vergeben wird. Seit 2000 warst Du korrespondierendes Mitglied der ÖAW und seit 2003 bist Du wirkliches Mitglied der Österreichischen Akademie der Wissenschaften.
Lieber Alfred! So danke ich Dir als Dekan im Namen der Fakultät für Deine wertvolle Tätigkeit als Forscher und Lehrer an unserer Universität und für Deine Bereitschaft zur Übernahme administrativer Führungsaufgaben in unserer Fakultät. Ich danke Dir persönlich für die besonders gute Zusammenarbeit in einem wohltuenden Vertrauensverhältnis. Ich wünsche Dir noch viele Jahre in Gesundheit an der TU Wien, vor allem aber auch im Kreise Deiner Familie und Du mögest in Zukunft noch mehr Zeit haben, Dich der Musik und dem Orgelspiel zu widmen.

Laudatio für Alfred Kluwick anlässlich der Emeritierungsfeier im Büro des Rektors am 15. Okt. 2010

von Wilhelm Schneider,
Institut für Strömungsmechanik und Wärmeübertragung, TU Wien

Magnifizenz,
zuerst ein Dankeschön an Sie – dafür, dass Sie mir die Möglichkeit geben, im Rahmen dieser Feier die Leistungen meines Kollegen Kluwick anlässlich seiner Emeritierung zu würdigen – so gut ich das halt kann. Die Emeritierungsfeiern in Ihrem eindrucksvollen Büro – in den Einladungen bescheiden als „Rektorszimmer“ bezeichnet – haben schon Tradition. Es ist eine schöne Art, der aussterbenden Spezies der Ordinarien den Übergang in den Status des „Emeritus“ – mit vielleicht unklaren Pflichten und Rechten – zu erleichtern. Herzlichen Dank!
Aber nun, liebe Kollegen und verehrte Gäste, zu einer der Hauptpersonen dieses Festaktes! Alfred Kluwick wurde wenige Tage vor der Mitte des Jahres 1942 in Wien geboren. (Die Jahreszahl muss erwähnt werden, weil er auf Grund der Emeritierungsbestimmungen auch fast ein Jahr älter sein könnte – aber jünger aussieht.) Er hat in Wien an unserer Technischen Hochschule (wie sie damals noch hieß) Maschinenbau studiert – „klassischen“ Maschinenbau mit umfangreichen Pflicht-Konstruktionsübungen in fast allen Anwendungsfächern. Das hat ihm, der sich natürlich schon früh für die sog. Grundlagenfächer interessierte, offenbar nichts geschadet – im Gegenteil, es kam ihm in seiner wissenschaftlichen Laufbahn immer wieder zugute, u.a. bei der Planung und Errichtung des ersten Überschall-Windkanals in Österreich. Diese bedeutende Ingenieurleistung erbrachte Alfred Kluwick aber quasi als „Nebentätigkeit“, denn für die Dissertation – und erst recht für die Habilitation – mussten beim weltberühmten Gasdynamiker Oswatitsch natürlich ordentliche theoretische Arbeiten durchgeführt werden.



Hans-Heinrich Weiss, Alfred Kluwick, Erich Leiter und der Überschall-Windkanal auf den Gründen des Arsenals im 3. Wiener Gemeindebezirk Ende der 1960er Jahre.

Obwohl Oswatitsch einen seiner Lieblingsschüler nicht gerne ziehen ließ, hat Alfred Kluwick darauf bestanden, seinen wissenschaftlichen Horizont in längeren Forschungsaufenthalten, u.a. am Virginia Polytechnic Institute und an der University of Michigan, zu erweitern. Seine Gattin hat ihn dabei begleitet und unterstützt – sicherlich unter Hintanstellung eigener privater und beruflicher Interessen. Trotz der sehr erfolgreichen Auslandsaufenthalte ist Alfred Kluwick jedoch der TU Wien treu geblieben. 1975 wurde er zum außerordentlichen Universitätsprofessor ernannt, 1986 zum ordentlichen Universitätsprofessor für Strömungslehre berufen. Diese scheinbar geradlinige Laufbahn war allerdings nicht so frei von

Schwierigkeiten, ja auch Enttäuschungen, wie Nachwuchswissenschaftler sich das heute oft vorstellen. Aber Alfred Kluwick hatte die Fähigkeiten und den Ehrgeiz (der alle bedeutenden Wissenschaftler auszeichnet), diese Schwierigkeiten zu überwinden. Und er hatte die menschliche Größe, sich nicht gekränkt zurück zu ziehen, sondern weiter mit großem Einsatz sein wissenschaftliches Fachgebiet in Lehre und Forschung zu vertreten.

Der Einsatz hat sich gelohnt! Schon 1 Jahr nach der Berufung zum Ordinarius wurde Alfred Kluwick zum Dekan gewählt, und nach Beendigung seiner Amtszeit als Dekan war ihm nur eine kurze Erholungsphase vergönnt, bevor er zum Vorsitzenden der Fakultät für Maschinenbau gewählt wurde. Auch das Amt des Institutsvorstands übte Alfred Kluwick über viele Jahre aus. In allen diesen Ämtern pflegte Alfred Kluwick einen kollegialen Führungsstil. Seine Pflichten, nicht seine Rechte, waren ihm dabei wichtig.

Auch international hat sich Alfred Kluwick rasch großes Ansehen erworben. In der IUTAM (der International Union of Theoretical and Applied Mechanics) hatte – und hat – er als Mitglied der Generalversammlung, des Kongresskomitees und schließlich des sog. „Bureau“ maßgebenden Einfluss auf die Entwicklung seines Fachgebiets. Ebenso wirkungsvoll war seine Tätigkeit als Mitglied des Vorstandsrates der GAMM (Gesellschaft für angewandte Mathematik und Mechanik). Als langjähriger Mitherausgeber der Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik und als Mitglied des Advisory Board der Acta Mechanica hat Alfred Kluwick wesentlich zum großen Ansehen dieser Zeitschriften beigetragen. Am CISM (dem International Centre of Mechanical Sciences in Udine) gehört Alfred Kluwick seit kurzem – nach der Wahl von Franz Rammerstorfer zum Rector des CISM – als Vertreter Österreichs dem Scientific Council an.

Zahlreiche und wichtige Ämter in der wissenschaftlichen Selbstverwaltung bedeuten natürlich einerseits eine große Ehre, andererseits aber auch eine Behinderung der eigenen wissenschaftlichen Arbeit. Es ist beeindruckend, wie Alfred Kluwick diesen „Spagat“ gemeistert hat. Die von ihm geleitete Abteilung hat auf allen Hauptarbeitsgebieten – Wellen, Grenzschichten (einschließlich turbulenter Strömungen), Dynamik realer Fluide – internationales Spitzenniveau erreicht. Diese Spitzenstellung zeigt sich in Publikationen in den führenden Fachzeitschriften ebenso wie in ehrenvollen Einladungen zu besonderen Hauptvorträgen, wie der Ludwig-Prandtl-Vorlesung, und zur Abhaltung von Sommerkursen auf höchstem Niveau am CISM, um nur zwei Beispiele zu nennen.

Die genannten Arbeitsgebiete werden von Alfred Kluwick in ungewöhnlicher Breite behandelt, so dass seine Publikationen nicht nur für Ingenieure, sondern auch für Physiker und Mathematiker von Interesse sind. Seine Forschungsarbeiten zeichnen sich durch aktuelle Themenwahl, Beherrschung klassischer ebenso wie moderner Methoden und hohen Schwierigkeitsgrad aus. Für ihn ist ein Problem erst dann so richtig interessant, wenn andere bereits vor den Schwierigkeiten kapituliert haben. Solche Zielsetzungen erfordern natürlich auch exzellente Mitarbeiter, die – nebenbei bemerkt – leider heute unter den Maschinenbau-Absolventen nicht immer zu finden sind.

Auch mit großen Übersichts- und Handbuchartikeln hat Alfred Kluwick die Entwicklung seines Faches stark beeinflusst. Über diesen Einfluss werde ich in Kürze bei einem Festkolloquium berichten können – leider auch nur, so wie hier, in einem Zeitrahmen von wenigen Minuten.

Selbstverständlich bleiben Leistungen, wie sie von Alfred Kluwick erbracht werden, nicht unbemerkt. Ehrungen sind eine, wenn auch nicht die einzige, Folge der Anerkennung durch die Kollegen – durch die „Scientific Community“, wie man heute auch unter Deutschsprechenden sagt. Ich erwähne nur die wichtigsten. Alfred Kluwick erhielt 1996 den Erwin-Schrödinger-Preis, das ist die höchste Auszeichnung, welche die Österreichische Akademie der Wissenschaften zu vergeben hat. Im Jahr 2000 wurde Alfred Kluwick zum korrespondierenden Mitglied und schon 3 Jahre später zum wirklichen Mitglied der Österreichischen Akademie der Wissenschaften gewählt. Erwähnen möchte ich auch noch, dass ihm dieses Jahr von unserer Universität die Viktor-Kaplan-Medaille verliehen wurde – allein der Name der Medaille bedeutet für einen „Maschinenbauer“ schon eine ganz besondere Auszeichnung.

Trotz zahlreicher Ehrungen ist vielleicht noch Platz für die eine oder andere wohlverdiente „Perle in der Krone“. Deshalb wünsche ich Dir, lieber Alfred, dass Du als Emeritus noch viele Jahre aktiv sein kannst. Ich bin sicher, dass Du dann noch viele wichtige Ergebnisse zum Fortschritt auf Deinem – unserem –

Fachgebiet beitragen wirst. Ich wünsche Dir aber auch, dass Du bei guter Gesundheit weiterhin Deinen künstlerischen Neigungen mit all Deinen Talenten und mit dem Dir eigenen Elan nachgehen kannst. Außerdem werden das Wandern und andere Aktivitäten mit Deiner geliebten Familie nicht zu kurz kommen dürfen. Vermutlich werde ich daher auch in Zukunft – so wie bisher – berechtigte Zweifel haben, ob Dir pro Tag nur jene 24 Stunden zur Verfügung stehen, mit denen unsereins auskommen muss.
Meine Damen und Herren, ich danke Ihnen für Ihre Aufmerksamkeit.

Programm des Festkolloquiums am 10. Dez. 2010

FESTKOLLOQUIUM ANLÄSSLICH DER
EMERITIERUNG VON

O.UNIV.PROF. DIPL.-ING. DR.TECHN. A. KLUWICK

FREITAG, 10. DEZEMBER 2010, 16 UHR S.T.
KUPPELSAAL DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT WIEN,
HAUPTGEBÄUDE, 4. STOCK,
WIEN IV, KARLSPLATZ 13

FESTFOLGE

BEGRÜSSUNG UND MODERATION

UNIV.PROF. DIPL.-PHYS. DR.RER.NAT. H.C. KUHLMANN

ANSPRACHEN

VIZEREKTORIN O.UNIV.PROF. DIPL.-ING. DR.TECHN. S. SEIDLER
DEKAN UNIV.PROF. DIPL.-ING. DR.TECHN. B. GERINGER
O.UNIV.PROF. DIPL.-ING. DR.TECHN. F. RAMMERSTORFER
EM.O.UNIV.PROF. DIPL.-ING. DR.TECHN. DR.H.C. W. SCHNEIDER

FESTVORTRÄGE

E.A. COX BSC, MSC, PHD
Nonlinear Resonances

AO.UNIV.PROF. DIPL.-ING. DR.TECHN. S. BRAUN
Alfred Kluwick – ein Plädoyer für die Grundlagenforschung aus der Sicht eines Schülers

KAFFEE & TEE - PAUSE

MUSIKEINLAGE

J. Haydn: *Allegro aus dem Londoner Trio in C-Dur*
J.S. Bach: *Menuett und Badinerie aus dem Suite Nr. 2 in h-Moll*
A. Vivaldi: *"Domine Deus" Sopran-Arie aus dem Oratorium Gloria*

FESTVORTRAG

EM.O.UNIV.PROF. DIPL.-ING. DR.TECHN. A. KLUWICK
Warum plagen sich Strömungsmechaniker immer noch mit analytischen Methoden herum?

MUSIKEINLAGE

J. Brahms: *Ungarischer Tanz Nr. 5 in g-Moll*
J. Massenet: *Meditation aus der Oper Thais*
V. Monti: *Csardas*

KALTES & WARMES BUFFET

ES MUSIZIEREN:

S. KONCZ - Violoncello / Berliner Philharmoniker
CH. KONCZ - Violine / Wiener Philharmoniker
TH. KONCZ - Sopran
MAG. E. KONCZ - Flöte
MAG. TH. KONCZ - Klavier / Universität für Musik und darstellende Kunst Wien

Das Koncz-Ensemble Wien besteht aus 5 Mitgliedern einer ungarisch-österreichischen Musikerfamilie, der Vater Thomas ist ein ungarischer Dirigent, Dozent an der Musikuniversität Wien, die Mutter Elisabeth ist Flötistin mit Orchestervergangenheit im Bruckner-Orchester Linz, Theresia ist als Klavier- und Gesangpädagogin tätig, Stephan war 2008-10 Cellist der Wiener Philharmoniker und ist seit September bei den Berliner Philharmonikern engagiert, Christoph ist seit 2008 Stimmführer bei den Wiener Philharmonikern und war 1998 Hauptdarsteller im Oscar-gekrönten kanadischen Spielfilm *Die Rote Violine*.

Festansprache

von Sabine Seidler,
Rektorat, TU Wien

Sehr geehrter Herr Prof. Kluwick,
werte Festgäste,
liebe Kolleginnen und Kollegen,

Emeritierungsfeiern sind Veranstaltungen, die vermutlich alle Teilnehmenden mit einem lachenden und einem weinenden Auge betrachten. Das lachende, weil wir damit einen Kollegen ehren wollen, der wie nur wenige das Bild der Fakultät national und international geprägt hat, das weinende, weil wir uns sozusagen "offiziell" verabschieden, aber da kommt schon gleich wieder das lachende, weil es ja kein wirklicher Abschied ist.
Sie Prof. Kluwick haben jetzt die Freiheit, die Dinge zu tun, die Sie schon immer tun wollten, wofür Sie aber nie Zeit hatten, zumindest theoretisch haben Sie jetzt die Möglichkeit. Ohne über eigene Erfahrungen diesbezüglich zu verfügen, muss ich aus Erzählungen emeritierter Kollegen schlussfolgern, dass dies wirklich nur eine Theorie ist, augenscheinlich steht nach der Emeritierung noch weniger, zumindest aber nicht mehr Zeit zur Verfügung steht.
A propos Zeit, diese vergeht, wie wir alle wissen, viel zu schnell. Vor wenigen Wochen wurde mir das sehr deutlich bewusst, als Frau Titzer mich im Zusammenhang mit einem Berufungsverfahren bat, als "Älteste" die konstituierende Sitzung einzuberufen. Voller Entsetzen habe ich sofort überprüft, wer außer mir Mitglied der Kommission ist und ich hatte Glück ... es fand sich noch ein älterer Kollege.
Üblicherweise sind die Festredner zu Veranstaltungen wie der heutigen Weggefährten. Ich glaube nicht, dass ich dieses Prädikat verdient habe, aber ein Stück Ihres Weges durfte ich Sie auch beobachten. Ich weiß nicht, ob Sie sich an unser erstes Zusammentreffen erinnern, das war eher zufällig, oder auch nicht, vor ziemlich genau 15 Jahren. Ich war damals nach einem Berufungsmarathon im Ministerium, anschließendem Besuch der TU und meinem zukünftigen Institut, der damaligen Rektorenkonferenz, weil der damalige Vorsitzende Rektor Skalicky mich dort empfangen wollte, vollgestopft mit Eindrücken am Abend in die Baracke in der Resselgasse zu Prof. Schneider und Prof. Zeman eingeladen. Beide wollten mich davon überzeugen den Ruf hier an die TU anzunehmen und ich glaube, jeder der erfahren hatte, dass ich in der Resselgasse sein würde war auch dort, um mich zu begrüßen.
Lieber Prof. Kluwick, wir haben unsere gemeinsame Zeit in Sitzungen verbracht, sei es am Institut, in der Kurie oder im Fakultätsrat. Dabei ist immer besonders auffällig gewesen, dass Sie, üblicherweise unendlich geduldig, regelmäßig Ihre nahezu sprichwörtliche Ruhe verloren haben, wenn wieder eine Maßnahme angekündigt oder umzusetzen war von der zu befürchten war, dass Sie der Qualität der Forschung und den Forschenden selbst nicht zuträglich ist. Ihre Ansprüche sind hoch, an Ihre StudentInnen, AssistentInnen aber auch an sich selbst.

Sie genießen auf nationaler und insbesondere auf internationaler Ebene nicht nur als Wissenschaftler sondern auch als Vertreter in wissenschaftlichen Gremien hohes Ansehen.
Sie haben es nicht dabei belassen, einfach nur Mitglied zu sein, Sie haben in diesen Gremien Verantwortung übernommen und tun das bis heute. Beispielhaft für Ihr vielseitiges Engagement möchte ich Ihre Tätigkeit an der österreichischen Akademie der Wissenschaften hervorheben. Sie sind dort auf der Homepage als “wirkliches” Mitglied geführt, damit niemand auf falsche Gedanken kommt, neben den “wirklichen” Mitgliedern gibt es nicht “unwirkliche”, sondern “korrespondierende”. Sie sind Vorsitzender der Fachgruppe Technik der mathematisch-naturwissenschaftlichen Klasse und in den Vergabekomitees verschiedenster ÖAW-Förderprogramme von APART bis DOC-fFORTE, Programme, die sich insbesondere die Nachwuchsförderung zum Ziel gemacht haben. Wir wissen alle, und können es leider im Moment nahezu jeden Tag in der Zeitung lesen, dass diesbezüglich viel zu wenig getan wird. Deshalb ist gerade Ihr Engagement für die Ingenieurwissenschaften und die Nachwuchsförderung nicht hoch genug einzuschätzen.
Ihre wissenschaftlichen Arbeiten beschäftigen sich mit Turbulenzen, Schockregulierungen, kritischen bzw. fast kritischen Phänomenen, eine hervorragende theoretsiche Basis für Ihre Tätigkeiten im Rahmen der akademischen Selbstverwaltung, sei es als Dekan, in mehr als turbulenten Zeiten, ich kann mir in etwa vorstellen, was die Abwicklung eines Studienzweiges für “fast kritische Phänomene” hervorgebracht hat, aber auch als Fakultätsratsvorsitzender oder Mitglied des Senates.
Ich bin selbst, wie Sie wissen, keine Mechanikerin, schon gar keine, die sich mit Strömungen beschäftigt, aber die Hochachtung, mit der man den Namen Oswatitsch ausspricht, ist auch für einen ausländischen Laien wie mich zu bemerken. Auf der Homepage Ihres Institutes kann man lesen “In more recent times, from March 29, 1960 to 1980, Klaus Oswatitsch held the chair of fluid mechanics. His work on super- and hypersonic flows, condensation effects, and the dynamics of gases in general have received international attention.” Nach einer Aufzählung der bedeutendsten Publikationen geht es weiter: “Klaus Oswatitsch was succeeded by Maximilian F. Platzer in March 1982. In 1984 Max Platzer moved to the Naval Postgraduate School in Monterey, CA, where he became Department Chair of Aero- and Astronautics. Currently, he is still active there as a professor emeritus.”
Ich wünsche Ihnen viel Gesundheit und hoffe noch lange sagen zu können “he is still active here at TU Vienna as a professor emeritus”.

Festansprache

von Bernhard Geringer,
Dekanat für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften, TU Wien

Der Jubilar hat eine bewegte Kindheit und Jugend – nicht ungewöhnlich in der Zeit des 2. Weltkrieges und der schwierigen Jahre danach. Prof. Alfred Kluwick wurde am 28. Juni 1942 in Wien geboren und hatte bereits in den ersten Jahren einen Schutzengel: eine Bombe traf zwar sein Haus – detonierte aber nicht. Die Nachkriegszeit verbrachte er mit seiner Mutter und seinen beiden Schwestern im damals etwas ruhigeren und nicht zerstörten Pinzgau im Land Salzburg. Hier besuchte er auch die 1. und 2. Klasse Volksschule.

1951 übersiedelte er wieder nach Wien und trat 1952 ins Gymnasium ein, wo er alle 8 Klassen der Mittelschule und 1960 die Reifeprüfung ablegte. Im Wintersemester 1960/61 begann er das Studium Maschinenbau an der damaligen Technischen Hochschule Wien und trat bereits 1965 zur II. Staatsprüfung an. Diese bestand er – wie sollte es anders sein – mit der Note “sehr gut”.

Mit Hilfe eines staatlichen Stipendiums begann er am Institut für Strömungslehre bei Prof. K. Oswatitsch mit der Dissertation und nahm 1967 am selben Institut eine Assistentenstelle an. Er arbeitete mit an der Errichtung des Überschallwindkanals und wurde 1968 mit der Leitung des Labors für Hochgeschwindigkeitsgasdynamik betraut. Am 6. Februar 1970 hat er das Rigorosum mit Auszeichnung bestanden. In den Folgejahren betreute er eine Reihe von theoretischen Diplomarbeiten auf dem Gebiet der Wellenausbreitungsvorgänge und setzte gleichzeitig den Ausbau des Labors fort. Seine Lehrtätigkeit führte zur Verleihung der Lehrbefugnis am 12. Juni 1974 als Hochschuldozent für “Strömungsmechanik”.

Die beruflichen Erfolge und der Aufstieg von einer Erfolgsstufe zur nächsten waren maßgebend unterstützt vom familiären Glück durch seine Hochzeit und die Geburt der beiden Töchter.

Aber nicht nur am Institut und im privaten Umkreis zeigte Prof. Kluwick großes Engagement und Hingabe: als Mitglied der Fakultät und zwar im Rahmen seiner Tätigkeit als akademischer Lehrer war er überaus aktiv. Er war bereits in den Jahren 1987–1991 Dekan der Fakultät für Maschinenbau und von 1998 bis zu seiner Emeritierung 2010 (!) der Vorsitzende des Fakultätsrats – also einer sehr verantwortungsvollen und in den Zeiten des früheren Universitätsgesetzes extrem wichtigen Funktion.

Aber damit nicht genug, auch als langjähriges Mitglied des Senats der TU Wien fungierte er sehr erfolgreich für unsere Fakultät. In diesen Funktionen der Selbstverwaltung der TU wurde er nicht müde als objektiver und sehr kritischer Beurteiler der leider immer wieder für den Fortgang von Lehre und Forschung negativen Entwicklungen durch politische Vorgaben aufzustehen und klar seine Meinung zu äußern. Auch wenn es manchen unangenehm und ihm vielleicht auch nicht positiv angerechnet wurde. Mit dieser seiner klaren und eigenen Meinungsäußerung machte er sich aber viele Freunde und Bewunderer wie ich dies noch heute bin.

Die wissenschaftlichen Leistungen sind und werden an vielen Stellen dieser Festschrift detailliert abgehandelt, deshalb nur die Eckdaten, die für unsere Fakultät als Ganzes einen hohen Stellenwert ha-

ben: Er genießt hohes internationales Ansehen als herausragender Wissenschaftler auf dem Gebiet der Strömungsmechanik und Strömungsphysik. Es gibt sehr viele – ja nahezu unendlich viele - Auszeichnungen und Anerkennungen die Prof. Kluwick erhalten hat. Er ist wissenschaftlicher Beirat und Mitherausgeber von 2 Fachzeitschriften. Zu den wichtigsten nationalen Auszeichnungen von Prof. Kluwick zählen sicherlich: Er ist wirkliches Mitglied der Österreichischen Akademie der Wissenschaften (ÖAW) und Vorsitzender der Fachgruppe "Technik". Weiters ist er Träger der höchsten Auszeichnung der ÖAW, dem "Erwin Schrödinger-Preis" 1996.

Im Zeitraum 1995–2000 war er für die Vergabe von Forschungsförderungsprogrammen für den gesamten Bereich der technischen Wissenschaften in Österreich zuständig und für sein Institut selbst hat er 7 FWF-Projekte erfolgreich eingeworben. Diese renommierten Tätigkeiten in der ÖAW zeichnen gerade Mitglieder von Fakultäten wie der unsrigen aus, die ja oft als stark anwendungsbezogen und wenig oder gar nicht wissenschaftlich angesehen werden. Eine solche Funktion eines unserer Professoren in diesem erlauchten Gremium zeichnet ein anderes und passenderes Bild der Tätigkeiten in der Maschinenbau-Fakultät.

Für diese wertvollen Verdienste um die Fakultät für Maschinenbau und Betriebswissenschaften ehrte ihn die Fakultät mehrfach: 2010 wurde ihm die Viktor-Kaplan-Medaille verliehen und die Anregung um Verleihung der Johann Joseph Ritter von Prechtl-Medaille – als höchste Auszeichnung der TU Wien – wurde 2011 positiv vom Rektorat befürwortet.

Aber mit all den Auszeichnungen und Erfolgen gibt sich Prof. Kluwick – wie wir ihn alle kennen – sicher nicht zufrieden: Sein großes Interesse gilt nach wie vor insbesondere dem physikalischen Verständnis eines technischen Vorganges. Deshalb wird er sich weiter mit physikalischen Phänomenen in der Strömungsmechanik beschäftigen und uns sicherlich noch interessante neue Erkenntnisse präsentieren.

Aber nicht nur der Forschung, auch der Lehre fühlt er sich verpflichtet und hat sich bereit erklärt an der TU mit der Wahlpflichtlehrveranstaltung "Strömungen realer Fluide" zur Verfügung zu stehen, die laut seinen eigenen Angaben zufolge die erste dieser Art weltweit ist.

Herzlichen Dank Herr Prof. Kluwick von Ihrer Fakultät, für die vielen interessanten – aber sicherlich auch oft mühsamen – Jahre. Wir vergessen Ihre Leistungen nicht, sondern diese helfen uns in Ihrem Sinne die Arbeiten fort zu setzen.

Festansprache

von Franz G. Rammerstorfer,
Institut für Leichtbau und Struktur-Biomechanik, TU Wien

Lieber Alfred,
dass Du von mir keine Laudatio erwartest, weiß ich; es wäre geradezu anmaßend von mir, so etwas als Festkörper-Mechaniker (noch dazu stark numerisch orientiert) zu versuchen. – Daher werde ich mich kurz auf einen einzigen Aspekt Deiner Persönlichkeit beziehen:

Manche wissen es, viele wissen es noch nicht, was A. Kluwick noch ist, neben einem herausragenden Wissenschaftler, engagierten akademischen Lehrer, liebevollen Gatten, herzlichen Vater und Großvater, begeisterten Erwanderer der heimatlichen Bergwelt ... also, viele wissen wohl nicht, was Prof. Kluwick noch alles ist, welche Qualitäten ihm noch zugeordnet werden können. – Was ich meine, ist: er ist auch Organist, also er spielt Orgel. – Ich habe ihn zwar noch nie an der Orgel gesehen, aber ich kann's mir gut vorstellen - ich sehe ihn gerade jetzt, wie er an der Orgel sitzt ...

Ein mathematisch orientierter Naturwissenschaftler, ein Vertreter der analytischen Strömungsmechanik – der Orgel spielt? – Wie geht denn das zusammen? Nun, so verwundern sollte das nicht: Schließlich gibt es viele Naturwissenschaftler mit ausgeprägten künstlerischen Talenten, und auch an unserer Universität waren große Genies der bildenden und angewandten Künste – und speziell der Musik – schon seit der Gründung unserer hohen Schule vor nahezu 200 Jahren tätig; nicht zuletzt sei erwähnt, dass auch Johann und Josef Strauß hier studiert haben – nicht Musik, sondern technik-orientierte Studien. Also: so verwundern sollte das nicht, dass Alfred Kluwick auch Organist ist. Und schließlich ist gerade die Orgel ein Musikinstrument, das seiner Wissenschaftsdisziplin sehr, sehr nahe kommt: Alfred Kluwick befasst sich mit dynamischen Vorgängen in Fluiden, also auch mit Wellenausbreitungsvorgängen – nun und solche Dinge spielen sich in den Orgelpfeifen ab; bei Labialpfeifen sind es vorzugsweise die Schwingungen der Luftsäule, also stehende Wellen, die für den Ton verantwortlich sind, und bei den Lingualpfeifen haben wir es mit einem Zungenblatt zu tun, das durch den Luftstrom zum Schwingen angeregt wird – also eine klassische Fluid-Struktur-Interaktion (mit turbulenter Ablösung?). Alfred: Denkst Du, wenn Du die Orgel spielst, an die Differentialgleichungen, welche die dabei gerade stattfindenden Phänomene beschreiben? – Ich kann mir allerdings gut vorstellen, dass es *eine* Orgel gibt, die Dich – wenn Du sie spielst – für die Zeit des Spielens alle Differentialgleichungen und Randbedingungen vergessen lässt. Und wenn Du möchtest, sollst Du diese Orgel spielen – eine der berühmtesten Orgeln, auf der ganz große Organisten und Komponisten, wie Augustinus Franz Kropfreiter ... und ... Anton Bruckner gespielt und komponiert haben, nämlich die Bruckner-Orgel im Stift St. Florian. – Ich darf Dir die Einladung zu diesem Spiel überreichen ...

Alfred Kluwick ist also Organist, er spielt Orgel; er war und ist auch Orgánist. Der Begriff “Orgel” kommt aus dem Griechischen: ὄργανον, d.h. “Werkzeug, Instrument”, und auch “Orgán”. – In zweierlei Hinsicht war nun Professor Kluwick Orgánist.

1. Als akademisches “Orgán”: Institutsvorstand, Dekan, Fakultätsratsvorsitzender, Senatsmitglied ..., und er hat dies immer sehr “orgánisch” betrieben; will heißen, dass er stets darauf geachtet hat, nicht einfach mechanistisch Tagesordnungen abzuhaken, sondern organisch auf die Entwicklung des Instituts, unserer Fakultät und der TU zu achten.

2. Orgánist war Professor Kluwick auch, weil er sich wissenschaftlich mit menschlichen Organen beschäftigt hat – so zum Beispiel mit den Strömungsvorgängen in der Lunge.

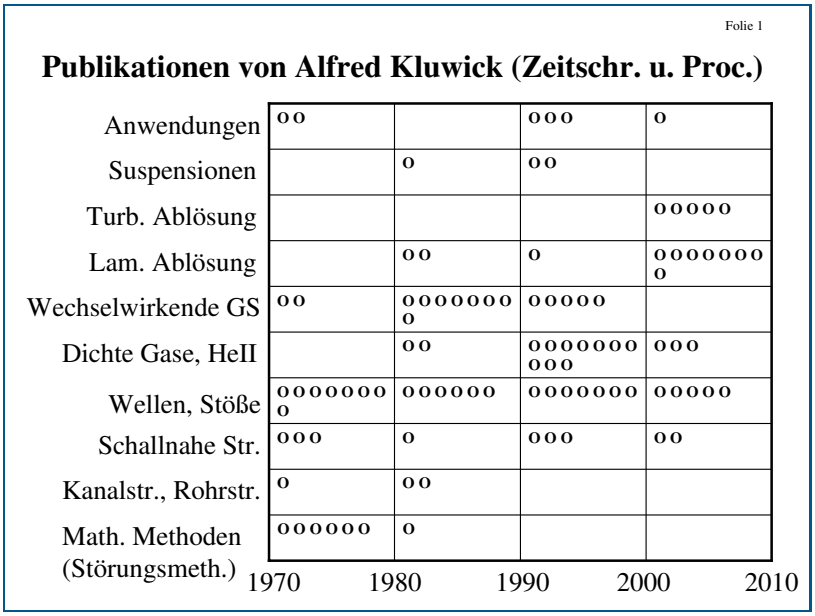
Alfred Kluwick ist also Orgánist. – Dass Du zusätzlich zu Deinen Funktionen in einer Vielzahl hochrangiger wissenschaftlicher Organe (IUTAM, GAMM, u.s.w.) nun seit relativ kurzer Zeit Mitglied eines ganz speziellen Organs bist, darüber freue ich mich besonders: Prof. Kluwick ist seit etwa einem Jahr Mitglied des Scientific Councils des CISM, des International Centre for Mechanical Sciences in Udine, und, lieber Alfred, wenn wir nun künftig wohl nicht mehr so viel in Organen unserer Universität zusammenarbeiten, beim CISM rechnen wir jedenfalls weiterhin mit Deinen wertvollen Beiträgen, für die ich Dir im Namen des CISM an dieser Stelle herzlich danken möchte.

Danken möchte ich Dir für vieles, auch für so manchen persönlichen Gedankenaustausch, – und wünschen möchte ich Dir vieles; wünschen möchte ich Dir, dass Du nun nach Deiner Emeritierung, von Deinen vielen Pflichten hier im Hause befreit, weiterhin Deinen wissenschaftlichen und kulturellen Vorlieben mit Freude nachgehen kannst, dass Du Freude an und mit Deiner Familie hast (und diese an und mit Dir) und dass Gott Deinen Lebensweg weiterhin mit seinem Segen begleiten möge.

Bemerkungen zu Alfred Kluwicks wissenschaftlichem Werk

Festansprache von Wilhelm Schneider,
Institut für Strömungsmechanik und Wärmeübertragung, TU Wien

Verehrte Frau Vizerektorin,
sehr geehrter Herr Dekan,
lieber Alfred,
meine Damen und Herren,
die drei schönen Ansprachen, die wir bereits gehört haben, machen es mir, als Viertem, nicht leicht, noch etwas einigermaßen Neues hinzuzufügen. Eine kurze, allgemein gehaltene Laudatio, wie ich sie anlässlich der Emeritierungsfeier im Büro des Rektors bereits halten durfte, wäre für einen Teil der heutigen Zuhörer eine langweilige Wiederholung und – schlimmer noch – für Alfred Kluwick eine herbe Enttäuschung. Wir waren uns ja immer darin einig, dass Doppel-Publikationen abzulehnen sind! Ich möchte daher versuchen, in den mir zur Verfügung stehenden wenigen Minuten darzulegen, woran Alfred Kluwick wissenschaftlich gearbeitet hat und welche Beachtung die Ergebnisse seiner Arbeit nachweislich gefunden haben.



Die erste Folie zeigt eine Tabelle der wissenschaftlichen Arbeiten, die Alfred Kluwick, teilweise gemeinsam mit Mitarbeitern, im Laufe von vier Jahrzehnten verfasst hat. Jedes o steht für eine Originalarbeit,

die in einer Fachzeitschrift oder in einem Tagungsband publiziert wurde. Die Arbeiten sind einzelnen Teilgebieten der Strömungsmechanik zugeordnet, wobei die Grenzen natürlich unscharf und die Zuordnungen nicht immer eindeutig sind. Ohne in Details, die zu weit führen würden, zu gehen, lassen sich an der Tabelle einige interessante Beobachtungen machen.

Zunächst können wir sehen, dass am Beginn der wissenschaftlichen Tätigkeit von Alfred Kluwick die Beschäftigung mit den mathematischen Methoden der Strömungsmechanik stand. Aber auch die praktischen Anwendungen der Strömungsmechanik sind schon früh vertreten, wobei man die Arbeiten über Suspensionen zumindest teilweise zu den Anwendungen zählen kann, beispielsweise die Entwicklung von Methoden zur Berechnung von Lawinen. Wie man sieht, hat die Herausforderung, die Ergebnisse seiner Grundlagenforschung den Anwendungen zugänglich zu machen, ihre Attraktivität bis heute nicht verloren. Ein anderes Gebiet erwies sich in noch stärkerem Maße als zeitlos: Wie ein „roter Faden“ zieht sich die Erforschung der Eigenschaften von Wellen (einschließlich Stoßwellen) in Gasen und Flüssigkeiten durch die vier Jahrzehnte wissenschaftlicher Arbeit von Alfred Kluwick.

Schließlich möchte ich auf die Häufung von o-Symbolen an der Diagonale von links unten nach rechts oben aufmerksam machen. Man kann dies als eine Art von wissenschaftlichem „Aufstieg“ interpretieren. Am Beginn der wissenschaftlichen Laufbahn von Alfred Kluwick stand die Anwendung der mathematischen Methoden auf schallnahe Strömungen (ein Lieblingsgebiet seines – auch meines – Lehrers Klaus Oswatitsch) und auf Wellenausbreitungsvorgänge im Vordergrund des Interesses. Dann folgte der „Aufstieg“ zu neuen Gebieten, nämlich zu Strömungen von Gasen mit sehr hoher Dichte („reale Fluide“) einerseits und zu wechselwirkenden Grenzschichten andererseits. Letztere führten zum Problem der Strömungsablösung, zuerst für laminare Strömung, aber schließlich, quasi als Krönung des bisherigen Werkes, zur turbulenten Ablösung – trotz Jahrhunderte-langer Bemühungen der Größten des Faches immer noch eines der großen ungelösten Probleme der Strömungsmechanik.

Die in Folie 1 gezeigte Tabelle verrät auch ein Erfolgsrezept, das vor allem für jene jüngeren Kollegen von Interesse sein dürfte, die es langweilig finden, ein Leben lang auf ein- und demselben Forschungsgebiet tätig zu sein. Alfred Kluwick ist auch hierzu ein Vorbild: Wenn man das Gebiet wechseln will, dann ist man offenbar gut beraten, den Wechsel so einzurichten, dass man zunächst teilweise, sozusagen „mit einem Bein“, auf dem vertrauten Gebiet bleibt. Das gibt einem die Sicherheit, rasch und erfolgreich auf dem neuen Gebiet produktiv werden zu können.

Die Tabelle enthält viele Symbole o, aber was bedeutet das für die Entwicklung des Fachgebietes? Heute werden zur Beantwortung dieser Frage oft die Anzahl der Zitierungen, der h-Index oder andere automatisch generierte „Kennzahlen“ herangezogen. Ich habe mich sowohl an der Universität als auch in der Akademie der Wissenschaften immer gegen die unkritische Anwendung dieser Kennzahlen ausgesprochen. Als Alternative bevorzuge ich die – allerdings mühsamere – Erkundung, welche Beachtung die Forschungsergebnisse eines Wissenschaftlers in Lehrbüchern und Monographien anderer Autoren gefunden haben. Alfred Kluwicks Arbeiten liefern hierzu schöne Beispiele, von denen ich hier nur einige wenige nennen kann.

Die ersten zwei Beispiele sind dem Standardwerk über Gasdynamik von Klaus Oswatitsch entnommen (Folien 2 und 3). In Abschnitt 12 des Buches geht es um exakte Lösungen der so genannten „gasdynamischen Gleichung“ - wie der Name schon sagt, eine der Grundgleichungen der Theorie der Gasströmungen. Von Alfred Kluwick stammen zwei exakte Lösungen, die Oswatitsch erwähnenswert fand. Es ist bemerkenswert, dass diese exakten Lösungen aus der Dissertation von Alfred Kluwick stammen. Ich kenne nur ganz wenige Beispiele von Dissertationen, die Eingang in die Lehrbuch-Literatur gefunden haben – darunter die Dissertation eines späteren Nobelpreisträgers! Interessant ist auch, dass Oswatitsch die zweite, in Gl. (98) wiedergegebene, exakte Lösung als „weniger naheliegend“ bezeichnete – offenbar hatte er Zweifel, ob er selbst imstande gewesen wäre, diese Lösung zu finden. Wie ebenfalls im Buch von Oswatitsch dargelegt, hat Alfred Kluwick schon früh in seiner wissenschaftlichen Laufbahn auch wesentliche Beiträge zur Theorie der Verdichtungsstöße geliefert (Folie 3). Die 1974 publizierte „Formulierung“ hat die Berechnung schwacher Verdichtungsstöße wesentlich vereinfacht, wovon später zahlreiche Doktoranden von Oswatitsch profitieren konnten.

Spezialgebiete der
Gasdynamik

Schallnähe, Hyperschall, Tragflächen, Wellenausbreitung

K.Oswatitsch

Folie 2

12. Exakte Lösungen

Noch viel mehr als die exakte gasdynamische Gleichung gestaltet die gasdynamische Gleichung für Schallnähe eine große Anzahl einfacher exakter Lösungen, die für das Studium des lokalen Verhaltens der Strömung, insbesondere bei Schall-Durchgang wertvolle Dienste leisten können. Es sei mit ebenen Strömungen, also mit Gl. (35) begonnen, und zwar mit zwei von A. Kluwick [15] angegebenen Lösungen. Es läßt sich zeigen, daß

Diss., 1970

$$\varphi_1 = Kx\bar{y}; \qquad \varphi_{1x\bar{y}} = v_{1x} = K \tag{97}$$

Lösung von Gl. (35) ist. Die Konstante K kann als reduzierte Krümmung der Stromlinien angesehen werden, die gemäß (97) positiv ist, wenn die Stromlinie nach oben konkav ist. Es handelt sich um die Umgebung des horizontalen Teiles der Schallinie eines Potentialwirbels, Abb. 18. In der vorliegenden Näherung ist die Schallinie die x-Achse und kein Kreisbogen wie in der exakten Lösung, [13] Abschnitt VI.9.

Weniger naheliegend ist die Lösung:

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= v_1^*\bar{y} + \frac{1}{2}\frac{K}{m}\bar{y}^2 + \frac{1}{m^3}(mx-\bar{y}) - \frac{1}{3}\frac{m}{K}\left[\frac{1}{m^4} + 2\frac{K}{m^2}(mx-\bar{y})\right]^{3/2}, \\ u_1 &= \varphi_{1x} = \frac{1}{m^2} - \left[\frac{1}{m^4} + 2\frac{K}{m^2}(mx-\bar{y})\right]^{1/2}. \end{aligned} \tag{98}$$

Es ist ein Spezialfall einer vom genannten Verfasser [15] angegebenen Lösung für instationäre Strömung. Sie ist durch konstante u_1-Werte auf parallelen Geraden $\bar{y} = mx +$ konst. ausgezeichnet, wobei die Schallinie im vorliegenden Spezialfall durch den Ursprung geht. Die drei Konstanten sind der Reihe nach die reduzierte $\bar{y}$-Komponente im Ursprung, v_1^*, die reduzierte Krümmung der Stromlinie im Ursprung, K, und die Neigung der Linien konstanter Geschwindigkeit, m. In

Folie 3

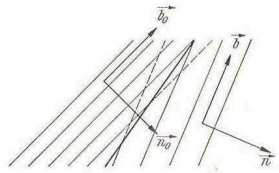


Abb. IV,10. Stoß- und Wellenfront in der $\vec{b}_0$, $\vec{n}_0$-Ebene.

J. de Méc. 1974

Für die Herleitung der Stoßfrontgleichung sei die von A. Kluwick [8] stammende Formulierung für einen schwachen Stoß verwendet. Danach kann eine Stoßfront als eine Machwellenfront aufgefaßt werden, deren Geschwindigkeitsvektor, Machvektor usw. in einem bestimmten Punkt der Front das arithmetische Mittel der gleichen Größen der dort von beiden Seiten einlaufenden Machflächen sind. Die gleiche Aussage kann dann auch für die entsprechenden Störgrößen getroffen werden. Da aber die Störung vor einer Kopfwelle verschwindet, ist die Störung einer schwachen Kopfwelle gerade halb so groß wie die Störung der im betrachteten Punkt von rückwärts einlaufenden Machwelle.

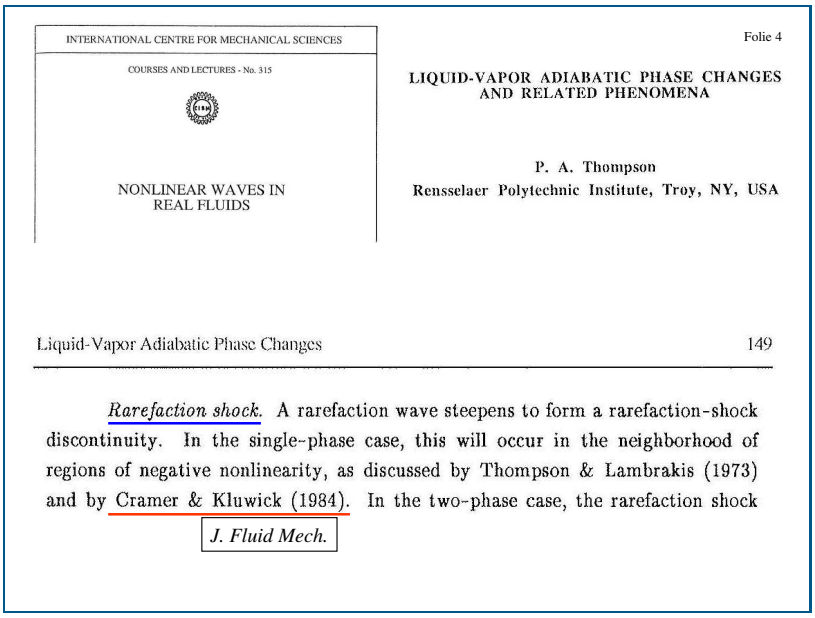
Mit Gl. (39) gilt dann für den Störvektor der *Stoßfront*:

$$(\vec{r}_{1\lambda}\,\vec{n}_0)_{st} = \frac{1}{2}\,\delta\,|\vec{r}_{0\lambda}|\,\mathrm{tg}\,\alpha_\infty\,\vec{M}_1\,\vec{n}_0. \tag{41}$$

In Folie 4 wird ein Ausschnitt aus einem Buch der renommierten Reihe „Lectures and Courses“ des International Centre of Mechanical Sciences (CISM) gezeigt. P.A. Thompson, einer der Pioniere auf dem Gebiet der Gase mit sehr großer Dichte, erwähnt in seinem Kapitel des Buches einen Beitrag von Alfred Kluwick zur Theorie der Verdünnungsstöße (die in der klassischen Gasdynamik auf Grund des Widerspruchs mit dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik „verboten“ sind).

Die beiden nächsten Beispiele (Folien 5 und 6) betreffen das Problem der Strömungsablösung – ein Problem, das sowohl für die theoretischen Grundlagen der Strömungsmechanik als auch für die praktischen Anwendungen große Bedeutung hat. Ein gemeinsam mit P. Gittler veröffentlichtes Ergebnis wurde in der englischen Ausgabe eines von vier russischen Autoren verfassten Buches mit dem Zusatz „of fundamental importance“ hervorgehoben (Folie 5), und einer dieser russischen Kollegen erwähnt eine Arbeit von Alfred Kluwick auch in seinem Beitrag zu den Proceedings eines Symposiums der International Union of Theoretical and Applied Mechanics (Folie 6).

Mit der letzten Folie (Folie 7) schließlich möchte ich zeigen, wie sehr auch ich selbst immer wieder von den wissenschaftlichen Arbeiten Alfred Kluwicks beeindruckt war. Diese Folie enthält Ausschnitte aus einem Buch, das wegen seines ungewöhnlichen Konzeptes einer Erklärung bedarf. Ludwig Prandtl war



INTERNATIONAL CENTRE FOR MECHANICAL SCIENCES

COURSES AND LECTURES - No. 315

NONLINEAR WAVES IN REAL FLUIDS

Folie 4

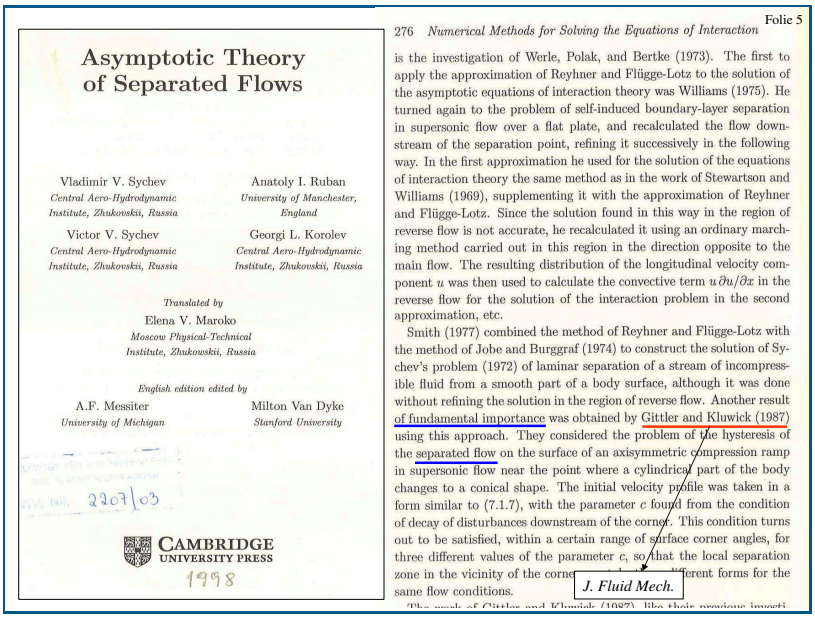
LIQUID-VAPOR ADIABATIC PHASE CHANGES AND RELATED PHENOMENA

P. A. Thompson
Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY, USA

Liquid-Vapor Adiabatic Phase Changes 149

Rarefaction shock. A rarefaction wave steepens to form a rarefaction-shock discontinuity. In the single-phase case, this will occur in the neighborhood of regions of negative nonlinearity, as discussed by Thompson & Lambrakis (1973) and by Cramer & Kluwick (1984). In the two-phase case, the rarefaction shock

J. Fluid Mech.



Asymptotic Theory of Separated Flows

Vladimir V. Sychev, *Central Aero-Hydrodynamic Institute, Zhukovskii, Russia*
Anatoly I. Ruban, *University of Manchester, England*
Victor V. Sychev, *Central Aero-Hydrodynamic Institute, Zhukovskii, Russia*
Georgi L. Korolev, *Central Aero-Hydrodynamic Institute, Zhukovskii, Russia*

Translated by
Elena V. Maroko, *Moscow Physical-Technical Institute, Zhukowskii, Russia*

English edition edited by
A.F. Messiter, *University of Michigan*
Milton Van Dyke, *Stanford University*

2207/03

CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS

1998

Folie 5

276 *Numerical Methods for Solving the Equations of Interaction*

is the investigation of Werle, Polak, and Bertke (1973). The first to apply the approximation of Reyhner and Flügge-Lotz to the solution of the asymptotic equations of interaction theory was Williams (1975). He turned again to the problem of self-induced boundary-layer separation in supersonic flow over a flat plate, and recalculated the flow downstream of the separation point, refining it successively in the following way. In the first approximation he used for the solution of the equations of interaction theory the same method as in the work of Stewartson and Williams (1969), supplementing it with the approximation of Reyhner and Flügge-Lotz. Since the solution found in this way in the region of reverse flow is not accurate, he recalculated it using an ordinary marching method carried out in this region in the direction opposite to the main flow. The resulting distribution of the longitudinal velocity component u was then used to calculate the convective term $u\,\partial u/\partial x$ in the reverse flow for the solution of the interaction problem in the second approximation, etc.

Smith (1977) combined the method of Reyhner and Flügge-Lotz with the method of Jobe and Burggraf (1974) to construct the solution of Sychev's problem (1972) of laminar separation of a stream of incompressible fluid from a smooth part of a body surface, although it was done without refining the solution in the region of reverse flow. Another result of fundamental importance was obtained by Gittler and Kluwick (1987) using this approach. They considered the problem of the hysteresis of the separated flow on the surface of an axisymmetric compression ramp in supersonic flow near the point where a cylindrical part of the body changes to a conical shape. The initial velocity profile was taken in a form similar to (7.1.7), with the parameter c found from the condition of decay of disturbances downstream of the corner. This condition turns out to be satisfied, within a certain range of surface corner angles, for three different values of the parameter c, so that the local separation zone in the vicinity of the corne[illegible]ferent forms for the same flow conditions.

J. Fluid Mech.

nicht nur als Schöpfer der Grenzschicht-Theorie, der Tragflügel-Theorie und zahlreicher weiterer fundamentaler Arbeiten berühmt geworden, auch sein Buch „Führer durch die Strömungslehre“ war einzigartig in der Erfassung der gesamten Strömungsmechanik einschließlich bedeutender Rand- und Anwendungsgebiete, wie beispielsweise der Meteorologie. In Anspielung auf den Titel dieses Buches wurde von G.E.A. Meier anlässlich eines Jubiläums das Buch „Ludwig Prandtl, ein Führer in der Strömungslehre“ herausgegeben. Mir wurde dabei Gelegenheit geboten, einen autobiographischen Beitrag mit dem Titel „Prandtls ‚Führer durch die Strömungslehre’ - 40 Jahre erlebte Geschichte eines Buches“ zu verfassen. Darin stellte ich abschließend die Frage „Was hätte Ludwig Prandtl über unsere Bemühungen gedacht?“, und ich versuchte, diese Frage an Hand von Beispielen aus der Forschungstätigkeit der Generation der wissenschaftlichen Enkel Prandtls zu beantworten. Das vielleicht schönste Beispiel stammte aus einem Beitrag, den Alfred Kluwick zur 8. Auflage des „Führer durch die Strömungslehre“ verfasst hatte. Aus voller Überzeugung konnte ich hierzu anmerken, dass diese Arbeiten „gewiss im Sinne Prandtls“ gewesen seien.

Meine Damen und Herren, wie an Hand der Tabelle der ersten Folie gezeigt wurde, stellt die Turbulenz das derzeitige Lieblingsgebiet des forschenden Alfred Kluwick dar. Hierzu möchte ich den leider im

International Union of Theoretical and Applied Mechanics

V. V. Kozlov, A. V. Dovgal (Eds.)

Separated Flows and Jets

IUTAM-Symposium, Novosibirsk, USSR
July 9 – 13, 1990

Marginal Separation Theory

A. I. RUBAN

Central Aerohydrodynamic Institute
Zhukovsky-3, 140160, USSR

Folie 6

The boundary layer on the surface of a circular cylinder placed into a uniform incompressible fluid flow and rotating about its axis was investigated by Negoda and Sychev [10]. At a sufficiently high cylinder rotation speed the boundary layer equation solution is regular throughout the boundary layer. A minimum longitudinal velocity vector component in the boundary layer is reached at some distance from the wall in the section with a maximum pressure value. This minimum value drops as the cylinder rotation speed decreases and vanishes at a certain relation between the cylinder surface velocity and the free-stream velocity. At this moment a singularity appears in the solution of the boundary layer equations. Since its structure differs considerably from that detected in [3] the marginal separation theory version developed by Negoda and Sychev [10] proves to differ significantly from that formulated in [1,2]. The solution for the interaction theory equation in this case is unique and does not indicate the possibility of a "burst" of the local zone of the recirculating flow at any cylinder rotation speed.

The first three-dimensional version of the marginal separation theory was developed by Zametaev [11,12]. He analysed the incipient separation on the thin cone at a small angle of attack and concluded that in this case two symmetrical interaction regions form in the boundary layer on its surface. Each of them originates at the cone tip and occupies the vicinity of a specially chosen ray. The evolution of the boundary layer along the cone has a considerable influence on the flow in the interaction region. It leads to the fact that the equation for A turns out to be a partial differential equation.

Another paper of Zametaev [13] is devoted to the study of the properties of the three-dimensional boundary layer near the symmetry plane on the body of revolution. The same problem was also investigated by Duck [14] whose aim was the extention of the Brown's [8] theory to the case of essentially three-dimensional flows. Kluwick [15] investigated the marginal separation on a body of revolution

Z. Flugwiss. 1989

Folie 7

Prandtls "Führer durch die Strömungslehre"

40 Jahre erlebte Geschichte eines Buches

W. Schneider*

"Was hätte Ludwig Prandtl über unsere Bemühungen ... gedacht?"

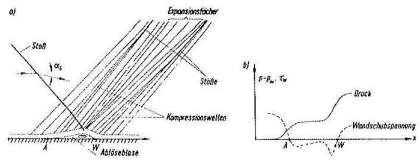


Abb. 8: Reflexion eines schiefen Verdichtungsstoßes an einer ebenen Platte bei laminarer Grenzschicht (schematisch). *A* Ablösepunkt; *W* Wiederanlegepunkt
a) Strömungsfeld
b) Druck- und Wandschubspannungsverteilung

A. Kluwick in [8. Aufl., 1984, Bild 5.29]

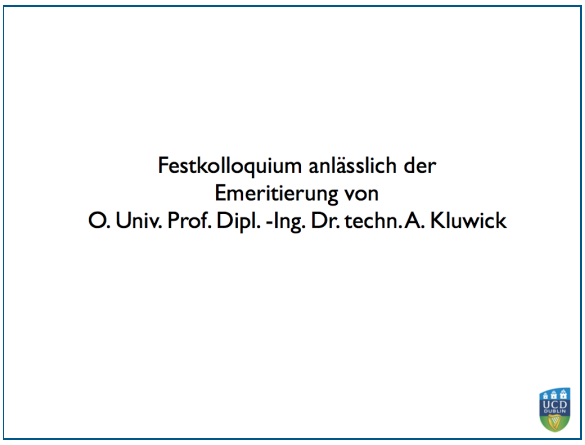
"... gewiss im Sinne Prandtls ..."

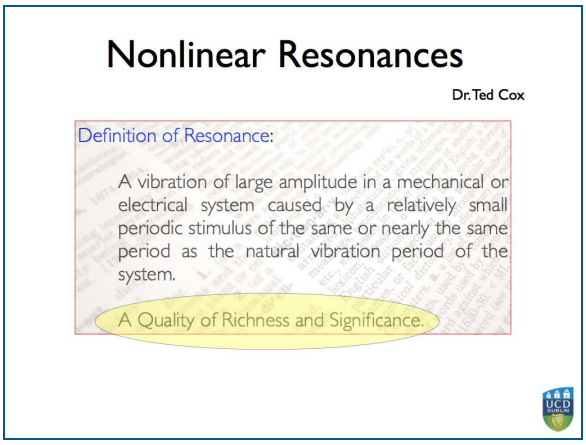
Vorjahr verstorbenen, für viele von uns jedoch unvergesslichen Hans Walter Liepmann vom CALTECH zitieren. Liepmann, der für seine scharfe Zunge ebenso berüchtigt wie für seine wissenschaftlichen Arbeiten berühmt war, sagte einmal: "A man studies turbulence until his mind becomes as turbulent as the flow he studies". Wie wir alle sehen können, trifft diese Vorhersage auf Alfred Kluwick bis heute noch keinesfalls zu, und ich wünsche ihm, dass es noch viele, sehr viele, Jahre so bleiben möge!

Nonlinear Resonances

Festvortrag von Edward A. Cox,
School of Mathematical Sciences, University College Dublin

It is a privilege to speak at this colloquium in honor of Professor Kluwick and to celebrate his retirement. I bring with me also the best wishes from my colleagues in University College Dublin and in particular colleagues in the School of Mathematical Sciences, University College Dublin.





I have taken as a theme for what I want to say the title 'Nonlinear Resonances' for two reasons. Firstly: It was a problem in nonlinear acoustic resonance that began our collaboration. Then secondly, and most importantly this afternoon, while we are familiar with the scientific definition of resonance:

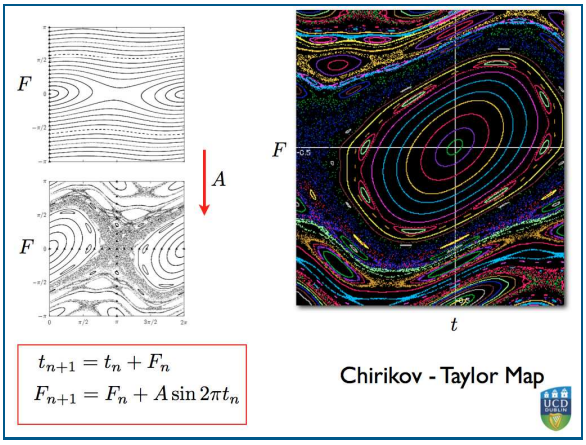
Resonance: A vibration of large amplitude caused by a relatively small periodic stimulus

a dictionary definition will also describe resonance as:

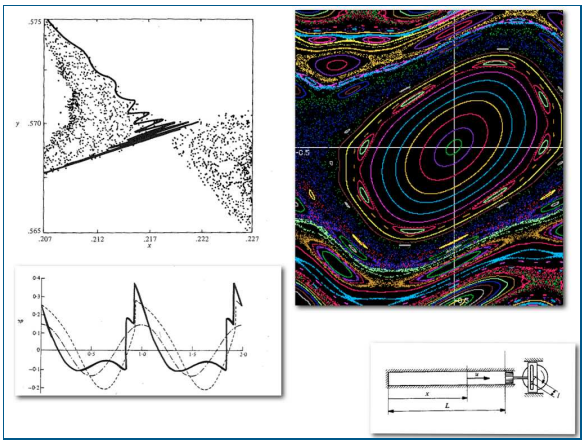
a quality of richness and significance.

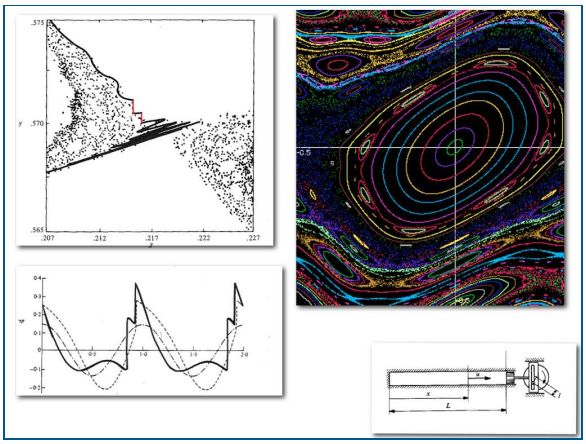
It is that quality of richness and significance in the work of Alfred Kluwick that I would like to highlight this afternoon.
My collaboration with Alfred extends now over almost a quarter of a century and has involved many visits to the Institute of Fluid Mechanics and Heat Transfer, TU Vienna and Alfred to the School of Mathematical Sciences in UCD.
I was thinking of the links between Ireland and Austria and perhaps unfortunately these links have been strengthened in recent days - I am sure Austria now owns a good percentage of Irish Banks after the

EU/IMF financial bailout of Ireland. However in terms of history we can go back to St. Colman in the 11th Century. Colman was an Irish monk on pilgrimage to Jerusalem when he was arrested and because he could not speak the local language was convicted of being a spy and sentenced to death. Let me say that while likewise being unable to speak the local language I have always experienced the warmest of welcomes in Vienna. Other notable figures include Ludwig Wittgenstein, the Philosopher (and Mechanical Engineer!) who in later years of his life spent some time in a small farmhouse in County Wicklow, Ireland. Then of course Erwin Schrödinger, who established the 'Institute for Advanced Studies' in Dublin. However it is the collaboration with Alfred that I would like to talk about this afternoon.



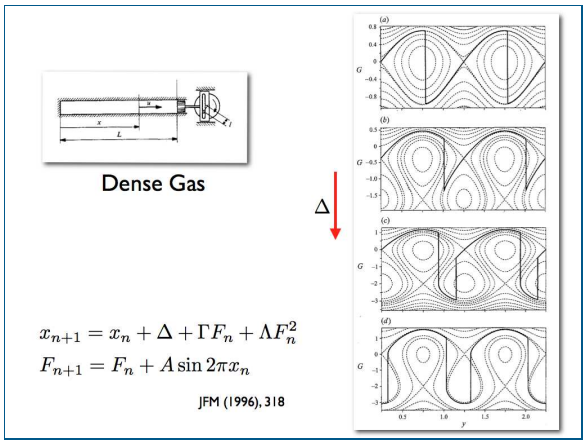
The problem that initiated our collaboration had its origins in the dynamics of the Taylor-Chirikov map which is perhaps one of the best known nonlinear models showing the onset of chaos in Hamiltonian systems. One of the most intriguing aspects of this mapping is the sudden transition from smooth to chaotic orbits (as you see here) when the coupling parameter A is increased above a critical value. This mapping describes with some level of approximation many physical systems.



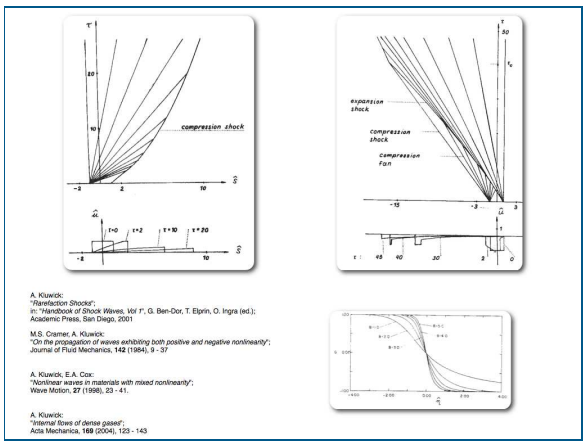


One such system arises in the problem of a gas contained in a resonant tube. The pressure profile in the gas subject to imposed periodic disturbances can be described by the Chirikov-Taylor map. The complex dynamics generated by iterating line segments can be interpreted, if we do something sensible, as generating multiple shocks. These are observed in experimental pressure profiles. The theory suggests that the shocks are chaotically distributed in the pressure signal.

It wasn't until some time later that Alfred and I published a paper on resonant oscillations in dense gases where the so-called fundamental gasdynamic derivative which characterizes the curvature of isentropes in the P, v diagram may change sign. These resonant oscillations are described by a new chaotic mapping which in the non-chaotic limit (a so-called small rate limit where the signal evolves slowly) generates novel features. Here results are presented for the long time steady state behaviour. As the imposed pi-



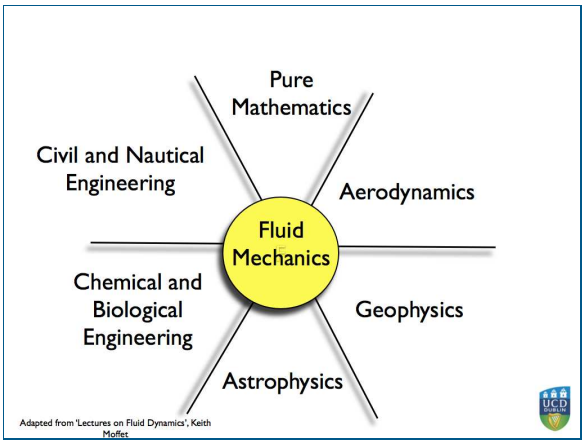
ston frequency is traversed through a resonant band shock waves are exhibited in the pressure profile. Solutions similar to classical gas results are observed at one edge of the resonant band with a single compression shock. However there is a limit to the strength of this compression shock. A single shock cannot be sustained as the resonant band is traversed and a subsequent frequency change (given by Δ) produces coexisting stable compression and rarefaction shocks. The compression shock remains sonic in this compound structure.

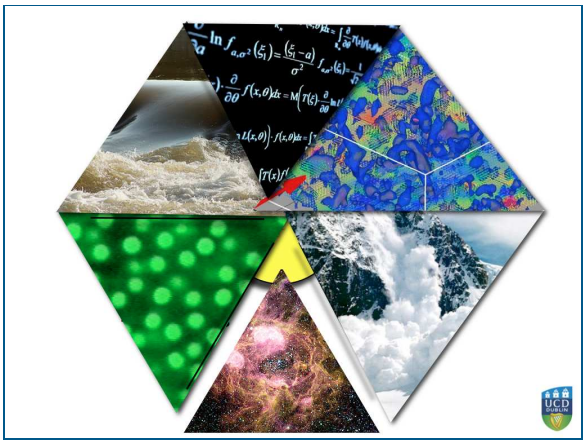


Of course our understanding of these nonclassical effects relies on the comprehensive analysis carried out by Alfred in previous papers. Let me use his words (and his diagrams) to describe the phenomena. Firstly he describes the propagation of a square pulse in a classical gas leading to the formation of a compressive shock and expansion fan. With the shock weakening in interaction with the fan we have the characteristic sawtooth shape profile. Then in a dense gas a single expansion fan cannot be sustained and we have a sonic expansion shock/fan combination. A single trailing compression shock cannot be sustained either and we have a sonic compression shock/fan combination. A weakening expansion shock sheds characteristics to form a region completely detached from the initial data. Colliding shocks ultimately result in an abrupt discontinuous reduction in shock strength. And again we end up with a sawtooth wave. The inclusion of dissipative effects replaces the so-called 'Taylor shock structure' with, for sonic shocks, an exponential behaviour upstream and a slower algebraic decay downstream.

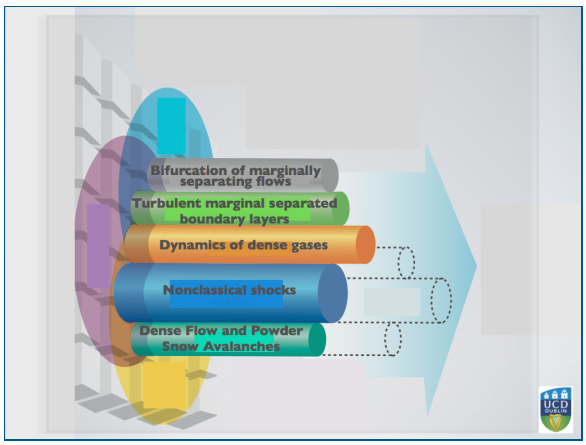
Dense gas dynamics reflects only one aspect of Alfreds multi-faceted contribution to fluid mechanics - which we are here to recognise this afternoon. The fluid dynamic community is humbly egocentric - believing that we really are at the centre of all that is useful in science and engineering. This diagram adapted from a lecture given by Professor Keith Moffet usefully describes scientific disciplines impacted by fluid dynamics. Most fluid dynamicists can claim an impact on one of these areas.

As I thought of the impact of Alfred's research the breadth of applications extends to geophysics with





models of avalanche dynamics, to areodynamics with turbulent boundary layers, to mathematics with asymptotic analysis, nonlinear partial differential equations, weak solutions and nonclassical shocks, to ocean dynamics with analysis of bore solutions in two layer flows, to chemical and biological fluids with waves in suspensions. However there is a gap, there is a missing piece (in Astrophysics). We will be looking forward to seeing new results in cosmic fluid dynamics to complete the picture.



I cannot do justice to all the research that Alfred has carried out but I can give some headline stories which describe what over the years he and his students have accomplished:

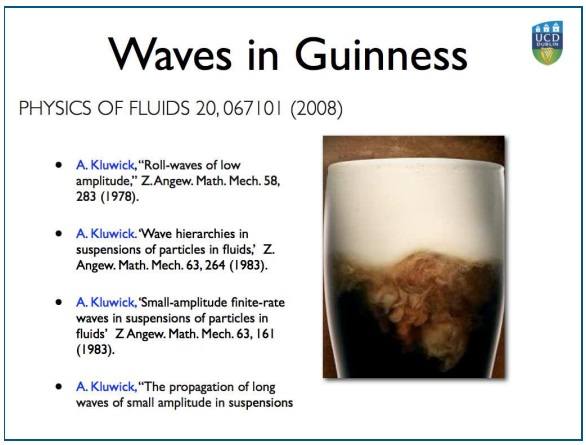
1. In bifurcation theory of marginally separating and triple deck flows he has shown that the so-called Fisher equation represents a canonical equation for the description of near critical flows. This allows for a rigorous treatment of the separation bubble dynamics (bubble bursting, self sustained bubble oscillations).

2. There is the first rational description of turbulent marginally separated boundary layers by means of asymptotic analysis in the limit of large Reynolds number. A description which is independent of specific turbulence models. This is in contrast to laminar flows where the correct asymptotic theory of boundary layer separation (triple deck theory) is known since about 1969.

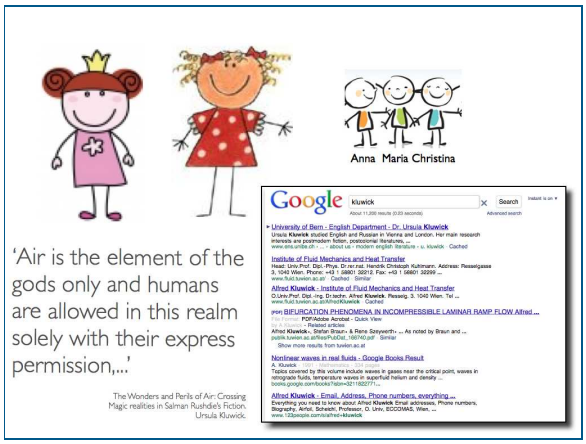
3. There is work on weakly nonlinear unsteady and steady flows of dense gases leading to a number of new phenomena including rarefaction shocks, sonic shocks, split shocks, etc. Flows of fluids exhibiting this property (BZT fluids) are expected to be of importance in the field of internal aerodynamics as it is found that they lead to a significant increase of the lower critical Mach number thereby allowing for shockless and therefore dragless flows up to almost Mach number 1. Also, since rarefaction waves are associated with a pressure drop they do not cause boundary layer separation.

4. He has investigated flows with nonclassical shocks. In contrast to earlier investigations focussing on single phase, low Reynolds number flows he has shown that such shocks can occur also in suspensions of particles in liquids and two layer fluids.

5. Finally there is a description of the combined effects of dense flow and powder snow avalanches leading to a computer program SAMOS which allows the study of propagation of avalanches over arbitrary topography. This program was successfully checked against real avalanche events and is now used in Austria but also other countries to detect endangered regions.



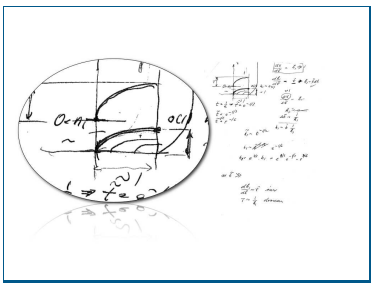
The impact of Alfred's research also reaches out, as I have already indicated, into many diverse applications - like ripples in a pond or 'Waves in Guinness'. An industrial contract with Guinness Brewing Company to improve the pouring of their beer led to a paper by some Irish researchers published recently in the journal, *Phys. Fluids*. However the basis of their model is some earlier papers of Alfreds.

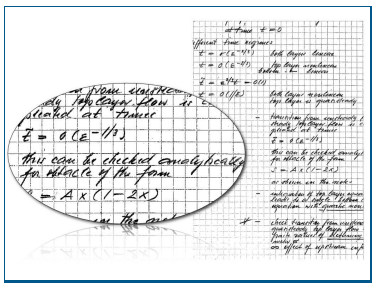


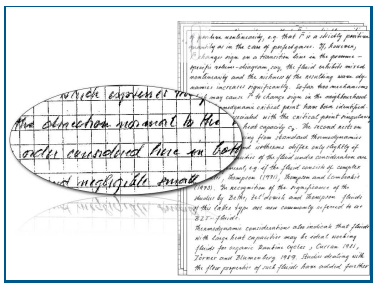
The past 25 years have seen a lot of changes. Asking about the family, in the early days, Alfred would tell me about two little girls. Now he tells me about two daughters with careers in English Literature and Medicine and now three little girls (Anna, Maria and Christina) the children of Veronika and Hermann. Times have really changed. Type in 'Kluwick' on Google to get access to the latest paper from Alfred on marginal separation and you are more likely to read a paper on historiographic metafiction, magic realism and literary theories. Type in 'Kluwick' in Google and in top spot displacing her father is Dr. Ursula Kluwick. But there is something in the genes! The daughter of an aerodynamicist is writing papers on 'The wonders and perils of Air' with the reminder of how the Greeks viewed those who ventured into aerodynamics.

The hospitality of Christl, Alfred's wife over all the years has made my visits to Vienna so welcoming and enjoyable. It was a hospitality we attempted to reciprocate when we encourage the Kluwick family

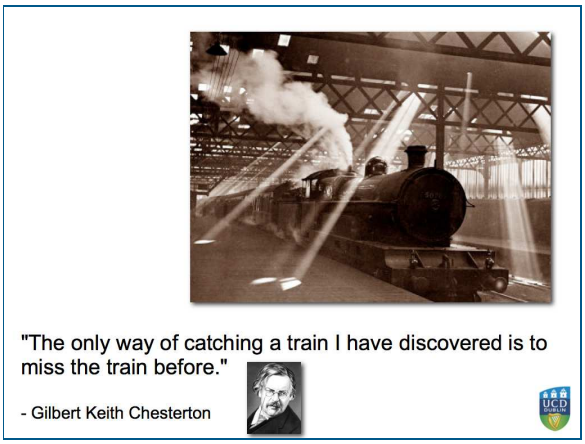
to visit Ireland. The watercolors Alfred painted look like this and tell the story of their Irish holiday. The beauty of Ireland captured - and hidden by the rain - the unseen beauty never seen. If I remember correctly they went to Greece the next week to dry out.

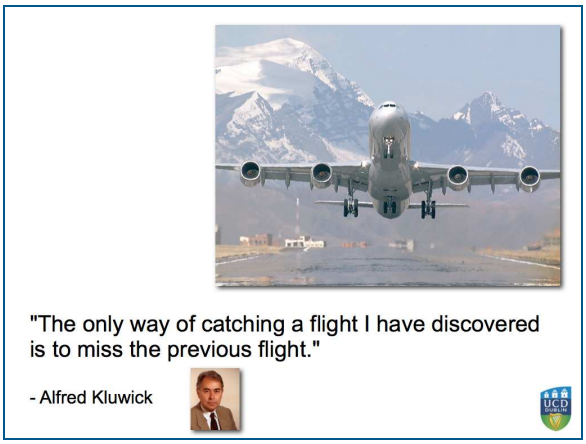






So what is working with Alfred like? It involves pages and pages of calculations that are shaped by physical insight, geometric reasoning and above all an ability to make mathematics work - and there's usually a small parameter somewhere, not just somewhere, everywhere! It's also always about generating more problems than we solve and making lists of new problems. Inevitably its about a long manuscript carefully written - comprehensive, definitive and with detailed analysis.





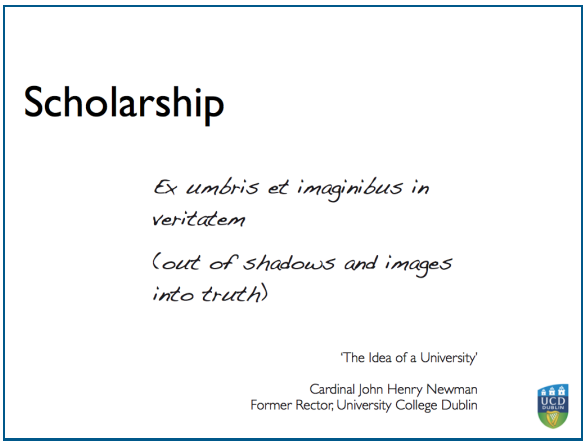
Now Alfred has certain eccentricities. The English writer G.K. Chesterton was known for his punctuality and was quoted as saying

> *the only way of catching a train I have discovered is to miss the train before.*

I would suggest a similar phrase for Alfred

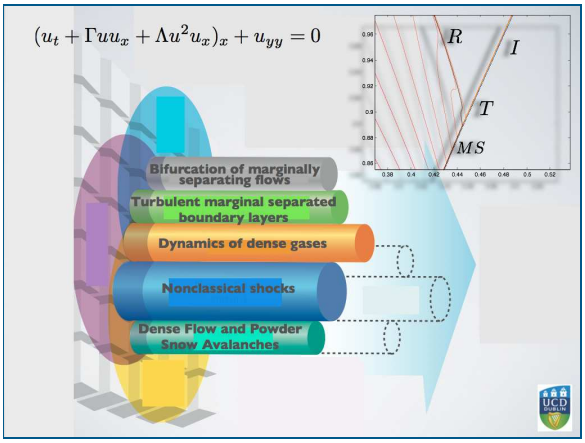
the only way to catch a plane is to miss the flight before

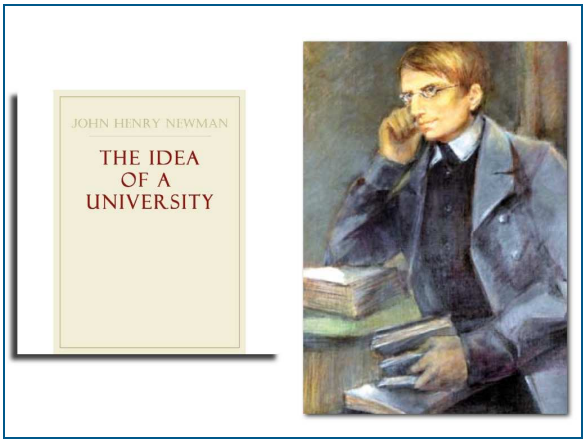
to describe his concerns never to miss his flight that has him spending long hours at the airport. But this is not a problem with papers to review, calculations to carry out and books to read.



On a more serious note I would like to highlight two qualities associated with a long collaboration. The first quality I would like to highlight is generosity. My office is filled with notes, ideas, drafts of papers he has been working on, calculations that he has not yet published. What I have heard him say often, and demonstrate over and over again, is that there is no place for secrecy in science.

The second quality is Scholarship. This resonates with the words of Cardinal John Henry Newman who was the Founder and First Rector of University College Dublin. Words from his lectures given in Dublin in the mid 1800's on 'The idea of a University' and where he describes the function of a university - 'Ex umbris et imaginibus in veritatem' (out of shadows and images into truth). Through works of scholarship you Alfred have dispelled many shadows and vague images in Fluid Dynamics and sharpened our understanding of what is really taking place across the spectrum that includes triple deck asymptotics, turbulent marginally separated boundary layers, dense gas dynamics, nonclassical shocks to name just some of the research areas you have worked in.





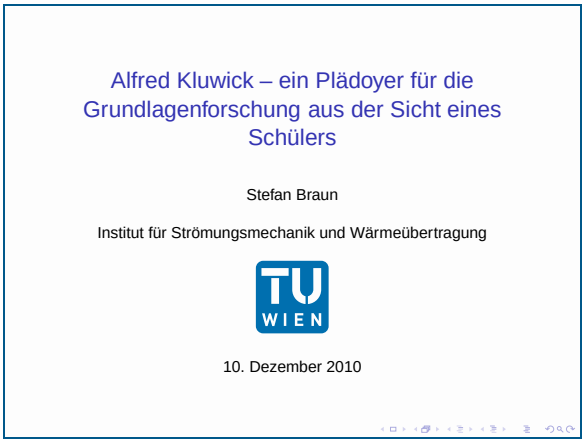
Let me put up a slide that I had before - the slide is unfinished, there is more work to do. Could I tempt you with one new numerical result obtained by us in UCD. Mach reflection off a wedge generating a Mach Stem and a triple point for nonclassical gases with a supersonic pocket behind the triple point - but we need help with the asymptotics.

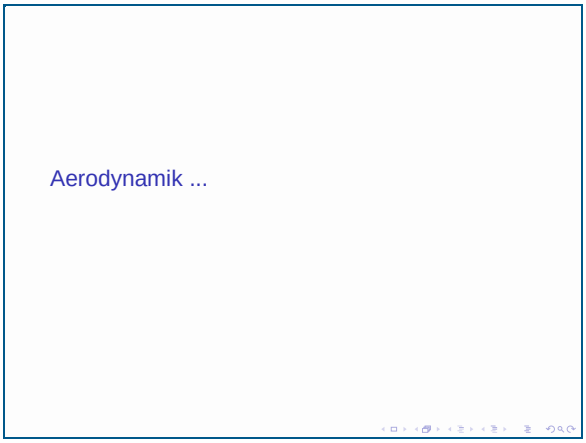
Alfred never leaves Dublin without a visit to one of its bookshops. I made that visit for you Alfred and would like to present you with a copy of the lectures that Newman gave in Dublin in the 1850's under the title 'The Idea of a University'. Wishing you all the best in your 'retirement' and looking forward to a continuing collaboration.

Alfred Kluwick – ein Plädoyer für die Grundlagenforschung aus der Sicht eines Schülers

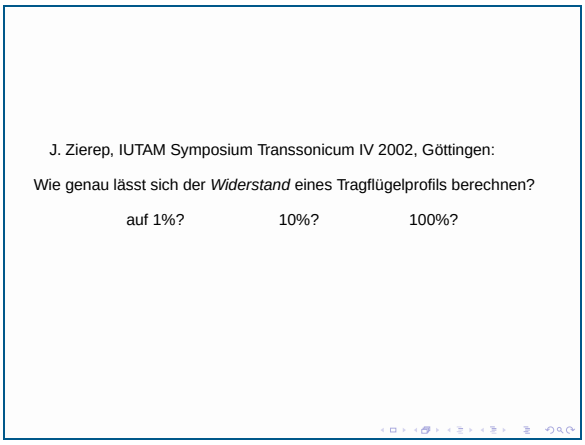
Festvortrag von Stefan Braun,
Institut für Strömungsmechanik und Wärmeübertragung, TU Wien

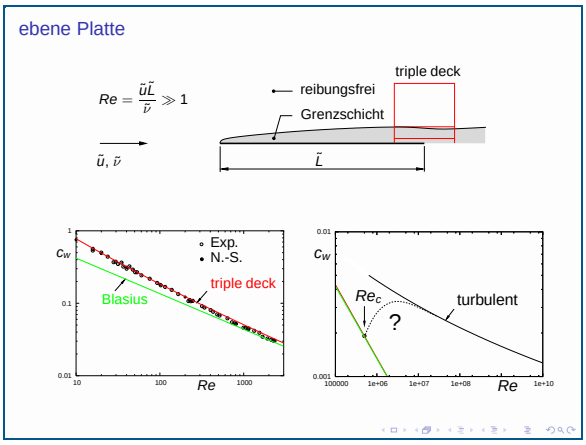
Alfred Kluwick war viele Jahre lang Leiter der Arbeitsgruppe “Aerodynamik und Wellenausbreitung” an unserem Institut – was liegt näher, als diese Forschungsgebiete exemplarisch an zwei Beispielen zu betrachten?



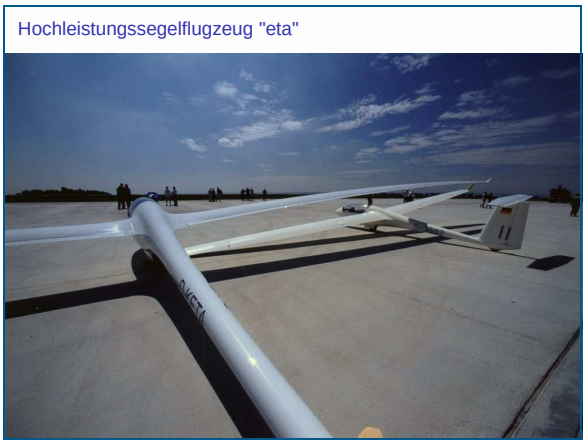


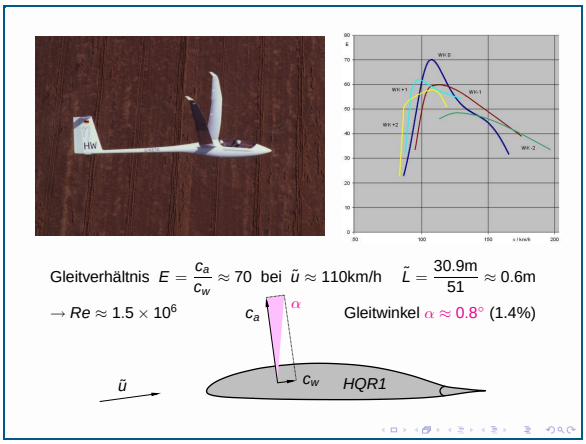
Beginnen möchte ich meine Ausführungen zur Aerodynamik mit einer vielleicht ungewöhnlich anmutenden Frage, die Prof. Jürgen Zierep aus Karlsruhe im Rahmen des IUTAM Symosium Transsonicum IV in Göttingen 2002 bei der abschließenden Versammlung aller Tagungsteilnehmer in den Raum stellte: “Wie genau lässt sich der *Widerstand* eines Tragflügelprofils berechnen: auf 1, 10, oder 100%?” Nach kurzer Stille gab er damals selbst die Antwort: “Im günstigsten Fall schafft man vielleicht 10%, eher wird das Ergebnis aber 100% von der Realität abweichen...” Im Folgenden soll dem Grund der Unsicherheit in der Vorhersage nachgegangen werden.
Eine aerodynamische Problemstellung ist grundsätzlich durch hohe Reynolds-Zahl $Re = \tilde{u}\tilde{L}/\tilde{\nu} \gg 1$ charakterisiert, diese wird mit der Anströmgeschwindigkeit $\tilde{u}$, einer charakteristischen Länge (Profiltiefe) $\tilde{L}$ und der kinematischen Zähigkeit $\tilde{\nu}$ des Strömungsmediums gebildet (mit Tilde bezeichnete Größen sind dimensionsbehaftet). Betrachtet man den einfachsten Fall einer Profilströmung – die nichtangestellte, parallel angeströmte (verschwindend) dünne Platte endlicher Länge – so ist seit 1904 durch Ludwig Prandtl bekannt, dass das Strömungsfeld in der asymptotischen Näherung $Re \to \infty$ in zwei Gebiete unterteilt werden kann: in eine reibungsfreie Außenströmung und eine dünne wandnahe, reibungsbehaftete Grenzschichtströmung. Seit Ende der 1960er Jahre ist weiters bekannt, dass die klassische, sukzessive





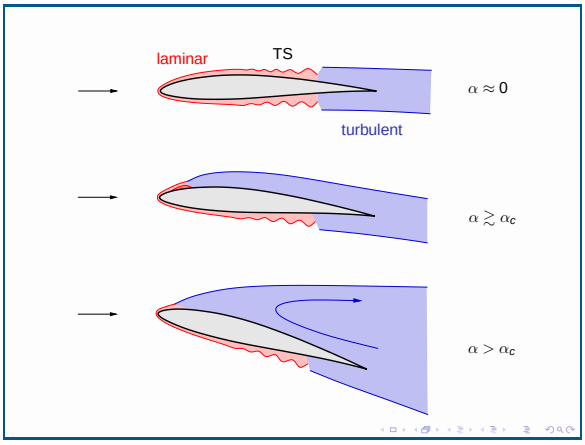
Berechnung von Außen- und Grenzschichtströmung an der Plattenhinterkante lokal versagt und durch eine simultane Berechnung beider – ausgedrückt durch die sog. “triple deck”-Wechselwirkung, einer konsequenten Weiterentwicklung der Prandtlschen Grenzschichttheorie – ersetzt werden muß. Hervorragende Übereinstimmung der theoretischen Vorhersage des Widerstandsbeiwertes c_w mit Ergebnissen von Experimenten (Exp.) und Navier–Stokes-Rechnungen (N.-S.) findet man selbst bis zu $Re \approx 10$ herab, was auf einen überraschend großen Gültigkeitsbereich der Theorie schließen lässt. Die obere Grenze des Gültigkeitsbereiches der Theorie ist durch die kritische Reynolds-Zahl $Re_c \approx 5 \times 10^5$ gekennzeichnet, für höhere Werte der Reynolds-Zahl wird die zugrunde gelegte Voraussetzung laminarer, stationärer Strömung verletzt: die Grenzschichtströmung wird instabil und schlägt in die turbulente Strömungsform um. Bei sehr hohen *Re*-Zahlen ist der Einfluss der laminaren Anlaufströmung auf den Widerstandsbeiwert unbedeutend, c_w kann mit der asymptotischen Theorie turbulenter Grenzschichtströmungen berechnet werden. Unsicherheiten in der Vorhersage von c_w ergeben sich gerade im technisch relevanten Übergangsbereich $Re_c \leq Re \lesssim 10^7$ aus Ermangelung eines vollständigen theoretischen Verständnisses des laminar-turbulenten Transitionsvorganges und dessen Abhängigkeit von (externen) Störeinflüssen wie Turbulenzen in der Anströmung, Oberflächenrauhigkeiten bzw. -Verschmutzungen, Schallwellen und Strukturvibrationen.





Praktisch eingesetzte Flügelprofile verursachen nicht nur Widerstand (Kosten), sondern liefern vor allem Auftrieb (Nutzen), wie man beispielsweise am Tragflügelprofil *HQR1* des Hochleistungssegelflugzeuges *eta* – der gleichlautende griechische Buchstabe η steht in technischen Belangen oft für den Wirkungsgrad einer Maschine – eindrucksvoll sieht: bei nichtausgeschlagener Wölbklappe (WK0, blaue Kurve) zeigt die Gleitverhältnispolare ein maximales Gleitverhältnis von $E = c_a/c_w \approx 70$ und damit einen Gleitwinkel von $\alpha \approx 0.8°$ bei einer Fluggeschwindigkeit von $\tilde{u} \approx 110$km/h. Fliegt dieses Segelflugzeug bei Windstille vom Gipfel des Schneeberges (Seehöhe 2076m) über die Distanz von etwa 65km nach Wien

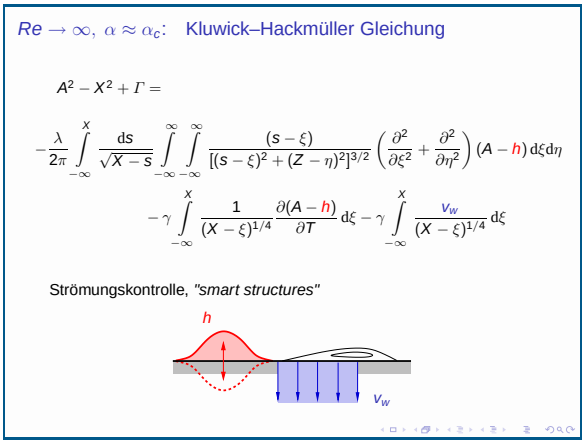
(171m), erreicht es die Stadtmitte in einer Flughöhe von rund 1km und könnte damit noch über Bratislava hinweggleiten. Bei einer Spannweite von fast 31 Metern und der hohen Flügelstreckung von 51 (zur Minimierung des induzierten Widerstandes) ergibt sich eine mittlere Flügeltiefe von nur $\tilde{L} = 0.6$m, was hohe Anforderungen an den Aufbau der Flügelstruktur stellt. Die mit diesen Daten gebildete Reynolds-Zahl von $Re \approx 1.5 \times 10^6$ deutet darauf hin, dass das eingesetzte "Laminarprofil" im Übergangsbereich arbeitet, d.h. die theoretische Vorhersage des c_w-Wertes aus den bereits genannten Gründen erschwert wird. Wäre die Zeichnung der am Profil angreifenden Kräften maßstäblich korrekt, betrüge die Länge des c_w-"Pfeiles" nur etwa die Strichstärke des Pfeiles für den Auftriebsbeiwert c_a. Damit ist leicht einzusehen, dass selbst die genaue experimentelle Bestimmung des c_w-Wertes in einem Windkanal schwierig ist, weil Winkelmessungenauigkeiten (z.B. der Anströmrichtung) in der Größenordnung von nur einem Grad das Ergebnis bereits um 100% verfälschen.

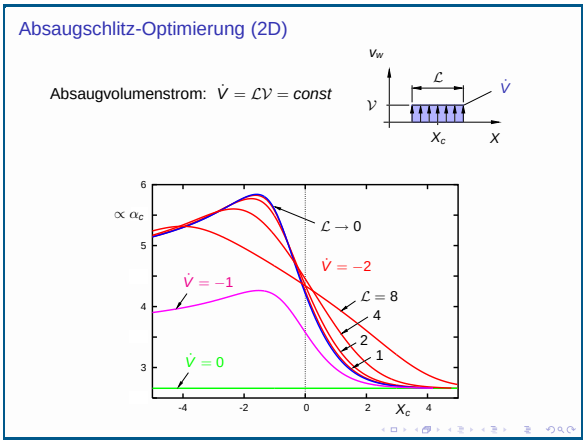


Betrachtet man die Abhängigkeit der aerodynamischen Kraftbeiwerte c_a und c_w vom Anstellwinkel α, ergibt sich für moderne, schlanke Profile im Übergangsbereich folgendes Bild: bei kleinen Anstellwinkeln $\alpha \approx 0$ vollzieht sich der laminar-turbulente Grenzschichtumschlag relativ "langsam" über extern angeregte Tollmien–Schlichting (TS) Wellen im hinteren Profilbereich, der Auftriebsbeiwert steigt linear mit dem Anstellwinkel $c_a \sim O(\alpha - \alpha_0)$ (α_0 bezeichnet den Nullauftriebswinkel) und der Widerstandsbeiwert ist klein $O(Re^{-1/2}) \lesssim c_w \lesssim O(\ln^{-2} Re) \ll 1$. Bei Erhöhung des Anstellwinkels bildet sich ab einem gewissen Wert $\alpha \approx \alpha_c$ typischerweise im vorderen Bereich der Saugseite des Profils eine lokale Grenzschichtablösung – die sog. laminare Ablöseblase – aus, welche empfindlich auf externe Störungen und/oder weitere Anstellwinkelerhöhung reagiert, indem sie zunächst die schlagartige Transition (ohne TS-Wellen) auf die turbulente Grenzschichtströmung triggert. Während in diesem Anstellwinkelbereich c_a weiter linear mit α ansteigt, erhöht sich c_w schlagartig durch das "Vorspringen" der Transition an die Stelle der laminaren Ablöseblase. Eine weitere Erhöhung des Anstellwinkels $\alpha > \alpha_c$ führt schließlich zum vollständigen "Aufplatzen" der Ablöseblase (Strömungsabriß), damit zum Zusammenbruch des Auftriebs und zu einem deutlichen Anstieg des Profilwiderstandes. Die Profilströmung gleicht dann jener um einen stumpfen Körper. Es ist daher wenig verwunderlich, dass das Phänomen der laminaren Ablöseblase schon bald nach seiner Entdeckung die Aufmerksamkeit der theoretischen Strömungsmechaniker geweckt hat: zum einen, weil Strömungsablösung mit der klassischen Prandtlschen Grenzschichttheorie nicht erklärt werden kann und zum anderen, weil die Hoffnung besteht, die Turbulenz selbst besser, nämlich in ihrer Entstehung, zu verstehen. Der Veranschaulichung des Transitionsprozesses soll ein Bild aus einer Videosequenz einer mit Farbe sichtbar gemachten transitionellen Ablöseblase im Wasserkanal des Institutes für Aerodynamik und Gasdynamik (IAG) der Universität Stuttgart dienen, die mir Ulrich Rist freundlicherweise zur Verfügung gestellt hat.

Die Beschreibung von ebenen laminaren Ablöseblasen in der asymptotischen Näherung $Re \to \infty$, $\alpha \approx \alpha_c$ basierend auf dem triple deck Wechselwirkungskonzept gelang Anfang der 1980er Jahre und ist unter der Bezeichnung "Theorie marginaler Ablösung" bekannt, [3]. Das Ausschöpfen des vielverspre-

chenden Potentials dieser Theorie, gerade in Hinblick auf eine mögliche systematische Untersuchung und Erklärung des durch lokale Ablösung hervorgerufen Transitionsvorganges, hat durch die Initiative von Alfred Kluwick an unserem Institut eine lange Tradition. Wesentliche, von ihm geleistete Beiträge dazu sind die Berücksichtigung von lokal dreidimensionalen, transienten Störeinflüssen in Form von lokaler Oberflächendeformation h und/oder lokalem Absaugen bzw. Ausblasen v_w im relevanten (Wechselwirkungs-) Gebiet des Strömungsfeldes. Ohne auf die entsprechend modifizierte Fundamentalgleichung der Theorie, die "Kluwick–Hackmüller-Gleichung", [P74], [T1], [J17], sowie die darin verwendeten Symbole selbst näher einzugehen, möchte ich ihre Aussagekraft an zwei Beispielen von passiver Strömungskontrolle demonstrieren. Betrachten wir dazu einen ebenen Ausblasschlitz der Breite $\mathcal{L}$

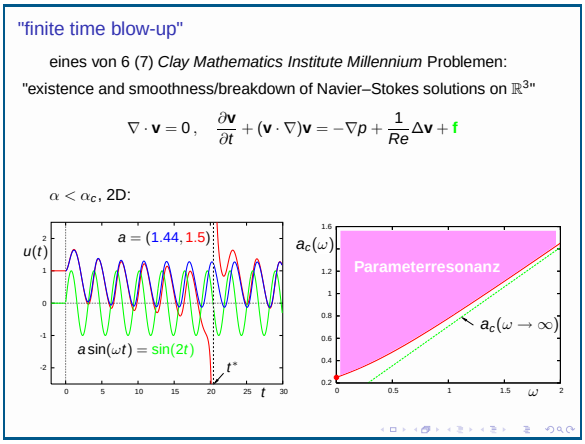


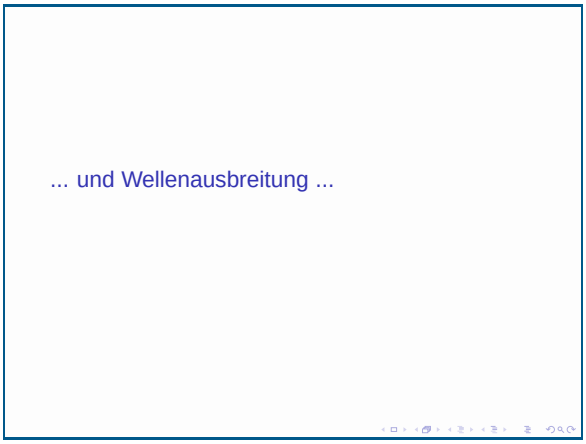


mit darüber konstant angenommener Ausblasgeschwindigkeit $\mathcal{V}$ an der Stelle X_c in Hauptströmungsrichtung X. Gesucht sei dessen optimale Lage X_c und Breite $\mathcal{L}$ bei fest eingestelltem Volumenstrom pro Einheitstiefe $\dot{V} = \mathcal{L}\mathcal{V} = const$ für das Erreichen jenes maximalen Anstellwinkels, bei dem die lokal abgelöste Strömung ohne weitere Störeinflüsse gerade noch stationär ist (d.h. die Transition nicht getriggert wird), [J16]. Die numerische Behandlung dieses Optimierungsproblems ergibt im Vergleich zum nicht kontrollierten Fall $\dot{V} = 0$ eine mögliche Erhöhung des Grenzanstellwinkels ausschließlich im Falle von Absaugung $\dot{V} < 0$, wobei das Maximum dann erreicht wird, wenn der Absaugschlitz vor die Stelle der Grenzschichtablösung $X_c < 0$ platziert wird. Dieses Maximum ist umso ausgeprägter, je schmäler der Schlitz ausgeführt wird, $\mathcal{L} \to 0$ (gleichbedeutend mit $\mathcal{V} \to -\infty$; zugehörige Grenzkurven magenta: $\dot{V} = -1$, blau: $\dot{V} = -2$). Das Optimum stellt daher ein schmaler Schlitz mit (relativ) hoher Absauggeschwindigkeit unmittelbar vor der Stelle der lokalen Ablösung dar. Technisch scheint so ein Strömungskontrollelement recht einfach realisierbar zu sein.

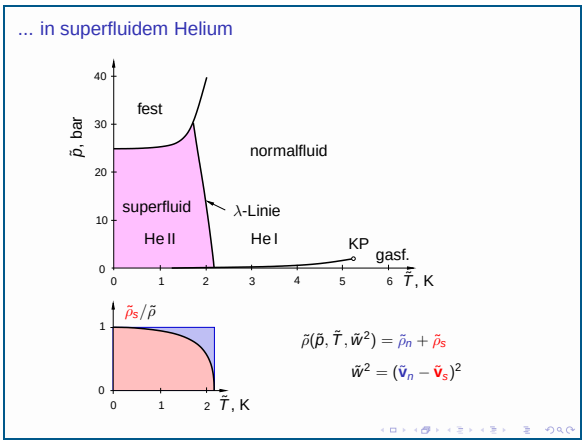
Für das zweite Beispiel ist das Phänomen des sog. "finite time blow-up" von entscheidender Bedeutung, welches vornehmlich bei nichtlinearen Anfangswertproblemen auftreten kann. Gemeint ist damit das Singulärwerden einer zunächst beschränkten Lösung nach endlicher Zeit. Es ist bemerkenswert, dass bis heute kein mathematischer Beweis darüber vorliegt, ob die Navier–Stokes-Gleichungen für inkompressible Fluide und glatte, beschränkte Anfangsdaten sowie Volumskräfte f in einem unberandeten dreidimensionalen Gebiet für alle Zeiten beschränkte Lösungen aufweisen. Diese Problemstellung scheint in der Liste der sechs verbliebenen "Millennium Prize Problems" des Clay Mathematics Institute auf, [1]. Bei der uns hier interessierenden asymptotischen Beschreibung von Strömungsvorgängen auf der Basis der Navier–Stokes-Gleichungen ist das Auftreten von Singularitäten nichts Ungewöhnliches, ganz im Gegenteil: ein (mehrfacher) Skalenwechsel in Raum und Zeit – wie er für den Transitionsvorgang charakteristisch ist – ist nur durch singuläres Lösungsverhalten des asymptotischen Modells möglich. Betrachtet man eine sinusförmig oszillierende Oberflächendeformation h wie in der Skizze oben gezeigt, dann verhält sich eine unterkritische ($\alpha \lesssim \alpha_c$) laminare Ablöseblase in Abhängigkeit der Störamplitude a und der Kreisfrequenz ω folgendermaßen, [J8]: die der lokalen Wandschubspannungsverteilung im Wesentlichen proportionale zeitabhängige Größe $u(t)$ (blaue Kurve) folgt der Erregung (grün) phasen-

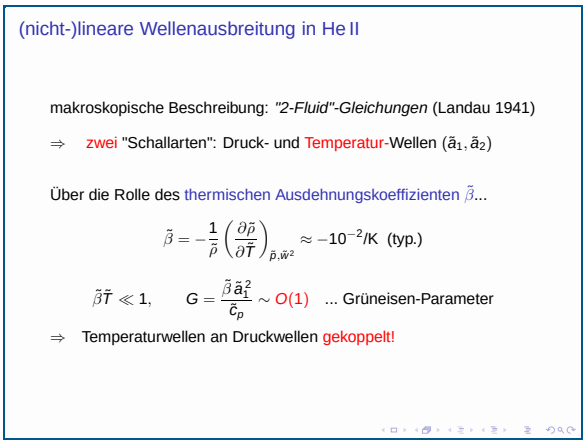
verschoben, solange die Amplitude einen kritischen Wert $a_c(\omega)$ nicht überschreitet. Für $a > a_c(\omega)$ (rot) liefert die Auswertung der Kluwick–Hackmüller-Gleichung einen “finite time blow-up” zum Zeitpunkt $t = t^*$, welcher die zugrundeliegenden asymptotischen Entwicklungen zeitlich und räumlich punktuell zusammenbrechen lässt und physikalisch als das Ausschleudern einer “kohärenten” Wirbelstruktur aus der Ablöseblase interpretiert werden kann. Eine detaillierte Untersuchung ergibt das bemerkenswerte Ergebnis, dass die kritische Störamplitude für hohe Frequenzen linear mit der Frequenz ansteigt, $a_c(\omega \to \infty) \propto \omega$. Die transitionstriggernde Wirkung von Ablöseblasen kann demnach mit hochfrequenten Störungen gehemmt werden. Damit will ich das Gebiet der Aerodynamik verlassen und mich der nichtlinearen Akustik bzw. der “Realgasdynamik”, einem zweiten wichtigen Forschungsfeld von Alfred Kluwick, zuwenden.



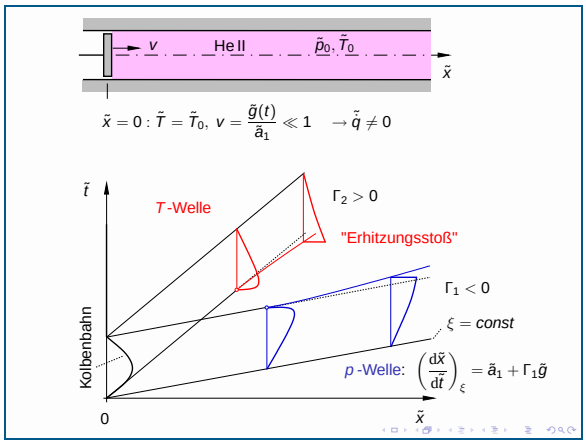


Effekte (nicht)linearer Wellenausbreitung möchte ich an dem exotischen Ausbreitungsmedium superfluides Helium demonstrieren. Wie im Phasendiagramm dargestellt, wird normalfluides Helium (He I) bei Temperaturen unterhalb der sog. λ-Phasenumwandlungslinie (etwa 2.2K) superfluid (He II). Die superfluide Eigenschaft von Helium ist eine makroskopische Manifestation von Quanteneffekten und drückt sich z.B. in der Beobachtung völlig reibungslosen Durchströmens enger Kapillaren aus. Sie kann qualitativ durch partielle Bose–Einstein-Kondensation der flüssigen Phase erklärt werden, welche in jüngerer Zeit im Zusammenhang mit der Untersuchung von Dämpfen bei sehr geringen Temperaturen ($\approx 10^{-7}$K) wieder hohe Aufmerksamkeit auf sich gezogen hat (Nobelpreis für Physik 2001, 2003). Die mikroskopische Untersuchung von He II legt für die makroskopische Beschreibung die gedankliche Aufspaltung in eine super- sowie eine normalfluide “Komponente” mit den entsprechend zugeordneten Massendichten $\tilde{\rho}_s, \tilde{\rho}_n$ und Geschwindigkeiten $\tilde{\mathbf{v}}_s, \tilde{\mathbf{v}}_n$ nahe, diese Komponenten können aber nicht wie bei einer gewöhnlichen Mischung tatsächlich isoliert werden. Da sich die beiden Anteile unabhängig voneinander bewegen, solange eine kritische Größe der Geschwindigkeiten nicht überschritten wird, gibt es kein ausgezeichnetes Ruhesystem. Dies hat zur Folge, dass thermodynamische Variablen wie beispielsweise die messbare Gesamtdichte $\tilde{\rho}(\tilde{p}, \tilde{T}, \tilde{w}^2) = \tilde{\rho}_n + \tilde{\rho}_s$ nicht nur wie bei gewöhnlichen Fluiden im Allgemeinen vom Druck $\tilde{p}$ und der Temperatur $\tilde{T}$ abhängen, sondern auch vom Quadrat der Relativgeschwindigkeit $\tilde{w}^2 = (\tilde{\mathbf{v}}_n - \tilde{\mathbf{v}}_s)^2$ beider Komponenten zueinander. Der Anteil der superfluiden Komponente an der Gesamtdichte $\tilde{\rho}_s/\tilde{\rho}$ verschwindet an der λ-Linie und nimmt am absoluten Nullpunkt den Wert 1 an.
Die konsistente Formulierung der hydrodynamischen Grundgleichungen für superfluides Helium basierend auf dem 2-Fluid-Modell gelang Lev Landau 1941, wofür er 1962 den Nobelpreis für Physik erhielt. Eine wesentliche Errungenschaft dieser Theorie ist die mögliche Erklärung der Existenz von zwei grundsätzlich verschiedenen Schallarten in He II, wovon die eine der gewöhnlichen Druckwellenausbreitung entspricht und als erster Schall bezeichnet wird, bei der das Fluid “als Ganzes” schwingt ($\tilde{\mathbf{v}}_n \approx \tilde{\mathbf{v}}_s$, Wellenausbreitungsgeschwindigkeit $\tilde{a}_1$). Unter zweitem Schall versteht man Temperatur- bzw. Entropiewellen, die sich nahezu ungedämpft ausbreiten und keine Entsprechung bei gewöhnlichen Fluiden aufweisen. Hier bewegen sich normal- und superfluider Teil “gegeneinander”, sodass der Gesamtmassen-

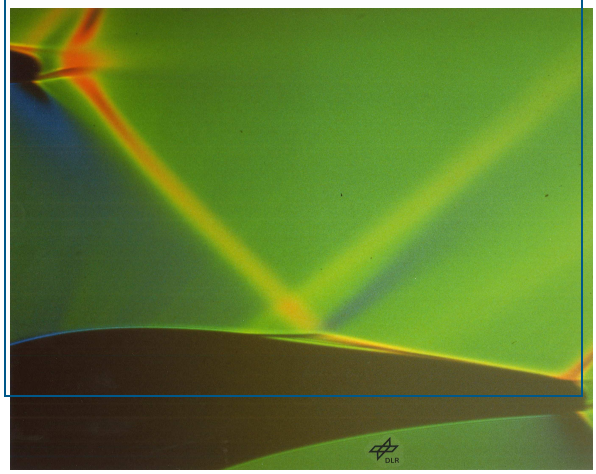




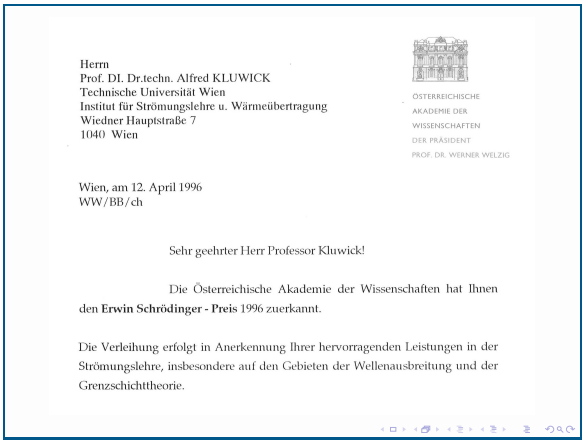
strom nahezu verschwindet ($\tilde{\rho}_s\tilde{\mathbf{v}}_s + \tilde{\rho}_n\tilde{\mathbf{v}}_n \approx \mathbf{0}$, Ruheschallgeschwindigkeit $\tilde{a}_2$). Wegen der verwickelten Form der Grundgleichungen ist man bestrebt, Vereinfachungen vorzunehmen. Eine in der Literatur häufig anzutreffende Näherung besteht darin, den thermischen Expansionskoeffizienten $\tilde{\beta}$ in den Rechnungen zu vernachlässigen. Begründet wird dies mit seinem kleinen numerischen Wert von typischerweise $\tilde{\beta} \approx -10^{-2}/\mathrm{K}$ (abgesehen von der unmittelbaren Umgebung der λ-Linie, an der $\tilde{\beta}$ divergiert). Dass die $\tilde{\beta} = 0$ Approximation auch richtige Resultate liefert, liegt daran, dass das dimensionslose Produkt $\tilde{\beta}\tilde{T}$ tatsächlich klein gegen 1 ist. Eine genauere dimensionsanalytische Betrachtung zeigt jedoch, dass der thermische Expansionskoeffizient auch in Form des sog. Grüneisen-Parameters $G = \tilde{\beta}\tilde{a}_1^2/\tilde{c}_p \sim O(1)$ in den Gleichungen auftreten kann, welcher im gesamten Temperaturbereich von He II von der Größenordnung 1 ist, [J36] ($\tilde{c}_p$ bezeichnet die spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck). Entscheidend wird dieser Sachverhalt u.a. bei der Berechnung der Feldgrößenstörungen bei Wellenausbreitungsvorgängen, [J31]: so kann beispielsweise erster Schall nur deshalb als isentrop angesehen werden, weil das Quadrat des Ruheschallgeschwindigkeitsverhältnisses klein ist, $(\tilde{a}_2/\tilde{a}_1)^2 \ll 1$, und nicht wegen der impliziten Annahme $G = 0$ der $\tilde{\beta} = 0$ Approximation. Eine weitere wichtige Konsequenz liegt darin, dass Temperaturschall linear über den Grüneisen-Parameter an Druckschall gekoppelt ist, wie am folgenden Randwertproblem der (nicht-) linearen Wellenausbreitung in einem mit He II gefüllten Rohr veranschaulicht werden soll. Durch schwache Auslenkungen eines auf konstanter Temperatur $\tilde{T} = \tilde{T}_0$ gehaltenen Kolbens von seiner Ruhelage $\tilde{x} = 0$ werden im Rohr nach rechts laufende Wellen angeregt. Die Erfüllung der Randbedingungen an der Kolbenoberfläche erfordert wegen der Kopplung der Druckstörungen an Temperaturstörungen einen nichtverschwindenden, der aufgeprägten Geschwindigkeitsstörung $v = \tilde{g}(\tilde{t})/\tilde{a}_1 \ll 1$ proportionalen, Wärmestrom $\tilde{\dot{q}} \neq 0$ durch die Kolbenoberfläche, welcher konvektiv über die angeregten Druck- und Temperaturwellen abgeführt wird. Da, wie bereits erwähnt, für die Schallgeschwindigkeiten $\tilde{a}_1 \gg \tilde{a}_2$ gilt, trennen sich die beiden im $\tilde{x}, \tilde{t}$-Diagramm gezeigten Halbwellen von Druck- und Temperaturschall geringer Amplitude noch im Bereich der linearen Wellenausbreitung. Mit zunehmender Lauflänge werden die Wellenprofile durch nichtlineare Effekte verzerrt, bis es schließlich zur Bildung von Stoßunstetigkeiten kommt. Dafür maßgeblich sind die sog. Nichtlinearitätsparameter Γ_1 und Γ_2 für ersten und zweiten Schall, deren Vorzeichen darüber entscheidet, ob das Wellenprofil vorne ($\Gamma > 0$) oder hinten ($\Gamma < 0$) aufsteilt. Die Neigung einer Charakteristik $\xi = const$ (die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle in Abhängigkeit ihrer Amplitude) ist demnach z.B. für ersten Schall durch $(\mathrm{d}\tilde{x}/\mathrm{d}\tilde{t})_\xi = \tilde{a}_1 + \Gamma_1\,\tilde{g}$ gegeben. Der Nichtlinearitätsparameter Γ_1 von Druckschall entspricht der gasdynamischen Fundamentalableitung bei gewöhnlichen Fluiden, welche im Falle idealer Gase immer positiv ist und infolgedessen dort nur Verdichtungsstöße möglich sind. Bei He II können Γ_1 und Γ_2 in Abhängigkeit des thermodynamischen Zustandes sowohl positiv als auch negativ sein, d.h. bei erstem Schall sind Verdichtungs- und Verdünnungsstöße, bei zweitem Schall Erhitzungs- sowie Abkühlungsstöße möglich. Wie sich zeigen lässt, spielt auch bei der Bestimmung von Γ_1 bzw. Γ_2 der thermische Expansionskoeffizient $\tilde{\beta}$ eine subtile Rolle, [J31], [D15].



Farbschlierenaufnahme Flügelgitterströmung (DLR)



Grenzschichtströmungen und Wellenausbreitungsvorgänge sind in vielen technisch wichtigen Anwendungen gemeinsam anzutreffen und treten dabei oft miteinander in Wechselwirkung. Diese Wechselwirkung begrenzt oft maßgeblich die beabsichtigte Wirkung der Strömung und ist damit gerade aus theoretischer Sicht interessant. Sehr treffend wird eine solche Wechselwirkung durch die Farbschlierenaufnahme einer transsonischen Flügelgitterströmung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) veranschaulicht (Bereiche hohen Druckes sind rot, solche niedrigen Druckes blau dargestellt): der von der Hinterkante des vorlaufenden Profils erzeugte schiefe Verdichtungsstoß wird an der Oberseite des nachlaufenden Profils reflektiert und führt dort zu leistungsmindernder lokaler Grenzschichtablösung. Die Tatsache, dass die Grenzschicht bereits *vor* dem Stoßauftreffpunkt ablöst, ist durch die klassische Grenzschichttheorie nicht erklärbar, sondern wird erst durch die Berücksichtigung der (starken) Wechselwirkung von Grenzschicht- und Außenströmung verständlich. Dieses Bild, welches viele Jahre an der Wand des Arbeitszimmers von Alfred Kluwick hing, umreißt erstaunlich viele seiner mit Dissertanten behandelten Forschungsthemen: die Stoß-Grenzschichtwechselwirkung bei laminaren und turbulenten Grenzschichten, Stross [D24], Reif [D23], Kronberger [D9], die schallnahe (instationäre) Flügelgitterströmung, Koller [D21], Lindner [D17], die schallnahe Vorderkantenablösung, Streibl [D6] und (dreidimensionale, instationäre) schallnahe Grenzschichtwechselwirkungsvorgänge in schlanken Kanälen (unter Berücksichtigung von Realgaseffekten), Meyer [D3], Kornfeld [D2].



Herrn
Prof. DI. Dr.techn. Alfred KLUWICK
Technische Universität Wien
Institut für Strömungslehre u. Wärmeübertragung
Wiedner Hauptstraße 7
1040 Wien

ÖSTERREICHISCHE
AKADEMIE DER
WISSENSCHAFTEN
DER PRÄSIDENT
PROF. DR. WERNER WELZIG

Wien, am 12. April 1996
WW/BB/ch

Sehr geehrter Herr Professor Kluwick!

Die Österreichische Akademie der Wissenschaften hat Ihnen den **Erwin Schrödinger - Preis** 1996 zuerkannt.

Die Verleihung erfolgt in Anerkennung Ihrer hervorragenden Leistungen in der Strömungslehre, insbesondere auf den Gebieten der Wellenausbreitung und der Grenzschichttheorie.

Kurzbiographie Alfred Kluwick

- 1960-65 Studium MB, TH Wien
- 1970 Dr., TH Wien
- 1974 Habilitation, 1975 a.o.Prof., TH Wien
- ab 1980 div. Gastprofessuren
  (Virginia Polytechnic Inst. & State Univ./Blacksburg, Univ. Michigan/Ann Arbor)
- 1986 o.Prof. "Strömungsmechanik", TU Wien
- 1996 E. Schrödinger Preis, ÖAW
- 1998 41. L. Prandtl Gedächtnisvorlesung, GAMM
- 2000-03 korrespondierendes Mitglied ÖAW
- 2003 wirkliches Mitglied ÖAW
- 2010 V. Kaplan Medaille
- div. akademische Funktionen
  (Dekan, Fakultäts- u. Fakultätsratvorsitzender, Senatsmitglied)
- div. Mitgliedschaften in wissenschaftlichen Gremien
  (IUTAM, EUROMECH, GAMM, CISM, FWF, ...)

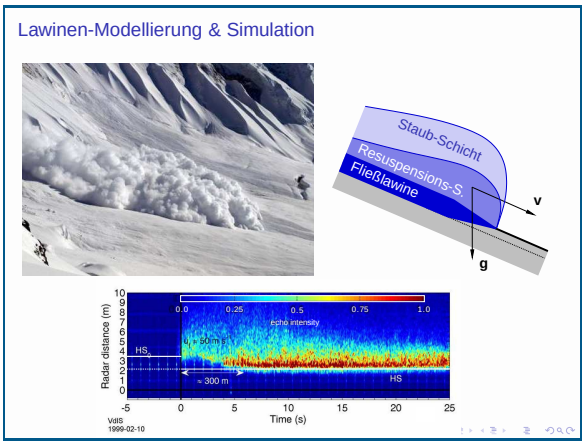
In Anerkennung seiner hervorragenden Arbeiten auf den Gebieten der Grenzschichttheorie und nichtlinearen Wellenausbreitung wurde Alfred Kluwick 1996 der Erwin Schrödinger-Preis verliehen, die höchste Auszeichnung, welche die Österreichische Akademie der Wissenschaften (ÖAW) vergibt. Im Folgenden möchte ich kurz auf den beruflichen Werdegang von Alfred Kluwick eingehen: er wurde 1942

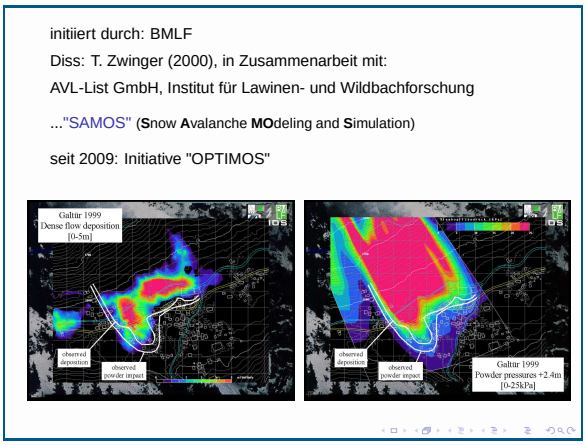
in Wien geboren; sein Maschinenbaustudium an der Technischen Hochschule (TH) Wien schloss er mit einer experimentellen Arbeit am Flachwasserkanal mit dem Titel “Umströmung eines Überschalltragflügelprofils mit Landeklappe” unter der Anleitung von Klaus Oswatitsch 1965 ab, der sein hochgeachteter akademischer Lehrer wurde. Für die Dissertation “Probleme der Störtheorie bei Wellenausbreitungsvorgängen” wurde ihm 1970 der Dokorgrad verliehen, 1974 habilitierte er sich im Fach “Strömungsmechanik” und wurde 1975 zum außerordentlichen Professor an der TH Wien ernannt. Sehr prägsam waren für Alfred Kluwick, wie er immer wieder betont hat, wissenschaftliche Gastaufenthalte von insgesamt über zwei Jahren Dauer an der Virginia Polytechnic Institute and State University in Blacksburg/USA und der University of Michigan in Ann Arbor/USA Anfang der 1980er Jahre, wo er regen fachlichen Austausch mit den theoretischen Aerodynamikern Thomas Adamson Jr. und Arthur Messiter unterhielt. 1986 nahm er den Ruf an die Technische Universität an, das Fach “Strömungsmechanik” als ordentlicher Professor zu vertreten. Neben dem bereits erwähnten Schrödinger-Preis erhielt er weitere wissenschaftliche Auszeichnungen, darunter 1998 die Einladung zur Präsentation der 41. Ludwig Prandtl-Gedächtnisvorlesung durch die Gesellschaft für Angewandte Mathematik und Mechanik (GAMM). Von 2000 bis 2003 war er korrespondierendes Mitglied der ÖAW, seit 2003 ist er wirkliches Mitglied der Mathematisch-naturwissenschaftlichen Klasse der ÖAW. Von der Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften der TU Wien wurde ihm 2010 die Viktor Kaplan-Medaille für seine Verdienste um die Fakultät verliehen. Alfred Kluwick hatte verschiedene akademische Funktionen an der TU Wien inne, er war Dekan an der Fakultät für Maschinenbau, Fakultäts- und Fakultätsratvorsitzender und Senatsmitglied. Sein hohes internationales Ansehen als Wissenschaftler auf dem Gebiet der Strömungsmechanik hat zu mehreren eingeladenen Mitgliedschaften in nationalen und internationalen Fachgremien geführt, unter Anderen die vierjährige Mitgliedschaft im Führungsgremium der International Union of Theoretical and Applied Mechanics (IUTAM), der weltweit bedeutendsten wissenschaftlichen Dachorganisation der Mechanik. Die Wertschätzung seines breiten Fachwissens kommt durch folgende Begebenheit sehr gut zum Ausdruck: er hat auf Einladung durch David Crighton, dem Gründungsvater der European Mechanics Society (EUROMECH, Fluids), einen Hauptvortrag bei der ersten European Fluid Mechanics Conference (EFMC) in Cambridge 1991 gehalten und dort auf die weitere Einladung durch George Batchelor am Ende der Konferenz über die Signifikanz der Tagungsbeiträge referiert – eine heikle Angelegenheit, wie man sich leicht vorstellen kann.

University of Cambridge, Sept. 1991: Alfred Kluwick, Philipp Gittler, [D22].

Als starker Verfechter der Grundlagenforschung war Alfred Kluwick der angewandten Forschung nicht abgeneigt, soferne es sich dabei nicht um das ausschließliche Anwenden von im Grunde bekannter Sachverhalte handelte; es sollte immer ein gewisser Neuigkeitsaspekt in der Problemstellung erkennbar sein. Als Beispiel sei hier die mehrjährige Forschungsarbeit auf dem Gebiet der Fließ- und Staublawinenmodellierung genannt. Dass es sich bei einem Lawinenabgang im Allgemeinen um eine äußerst komplexe, durch die Schwerkraft getriebene kompressible turbulente Mehrphasenströmung über unregelmäßiges

Gelände mit variablem Massentransport handelt, lässt sich leicht einsehen. Bei näherer Betrachtung einer Lawine findet man typischerweise eine dreilagige Struktur, bestehend aus *(i)* einer relativ dichten Fließschicht mit erosiver Wirkung, welche als einphasige granulare Strömung modelliert werden kann, *(ii)* einer zweiphasigen Staubschicht mit relativ geringer Eispartikelbeladung, welche die Lawine sichtbar zur Umgebung abgrenzt, sowie *(iii)* einer Übergangsschicht (Resuspensionsschicht), in der der Massenaustausch zwischen Fließ- und Staubschicht stattfindet. Die beobachtete Schlankheit dieser Schichten ermöglicht in der theoretischen Beschreibung eine Art Grenzschichtapproximation zur Vereinfachung der Grundgleichungen, [D12]. Die Schichtstruktur der Lawine kann z.B. mit Hilfe eines frequenzmodulierten Dauerstrichradars (FMCW-radar) sichtbar gemacht werden, welches die Aufnahme eines höhen- und zeitabhängigen Massendichteprofils ermöglicht. Das abgebildete Messergebnis eines "Jahrhundertereignisses" im Testgelände Vallée de la Sionne/Wallis des Schweizer Institutes für Schnee- und Lawinenforschung zeigt an der Stelle des Radars bei einer ursprünglichen Schneehöhe von $HS_0 \approx 3.5$m eine Erosion auf $HS \approx 2$m nach Passage der Lawine, deren Geschwindigkeit $v \approx 50$m/s beträgt, den Fließanteil (rot) von etwa 1m Dicke, die Übergangsschicht (türkis) von durchschnittlich 3m Dicke bei einer Lawinenlänge von etwa 1.5km. Die Staubschicht ist über das Radarecho wegen der geringen Massendichte kaum wahrnehmbar (marmoriertes blau), ihr Ausmaß wird fotografisch ermittelt.

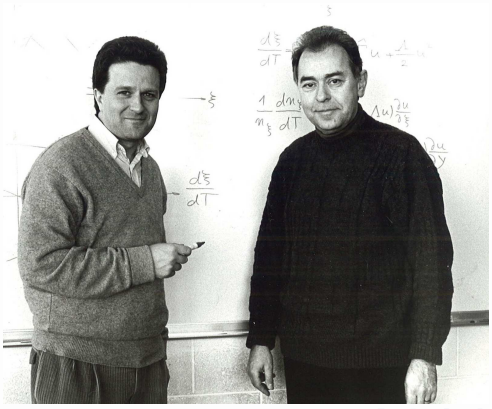




Das zur Verbesserung der Gefahrenzonenbeurteilung in alpinen Regionen vom Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) initiierte Lawinensimulationsprojekt wurde an unserem Institut von Thomas Zwinger in Kooperation mit dem Grazer Unternehmen AVL-List GmbH bearbeitet, [D12]. Die dabei gewonnenen Ergebnisse führten zur Entwicklung des auf dem Softwarepaket AVL FIRE aufbauenden Lawinensimulationsprogrammes SAMOS, das bis heute als das weltweit erfolgreichste seiner Art gilt. Die Leistungsfähigkeit von SAMOS konnte unter Anderem durch die Berechnung der Lawinensturzbahn bei der Galtür-Lawinenkatastrophe 1999 nachgewiesen werden: berechnete und beobachtete Fließschneeablagerungshöhen zeigen sehr gute Übereinstimmung. Die berechnete Maximaldruckbelastung der Staubschicht in 2.4m Höhe über Grund weist auf die zerstörerische Wirkung der Lawine auch noch im Bereich der verlängert gedachten Sturzbahn nach dem Schneeblagerungsbereich hin. Bemerkenswert ist vielleicht die 2009 vom BMLFUW gestartete Initiative "OPTIMOS" zur Validierung und Optimierung des Simulationsmodells SAMOS, bei dem ich zur Mitwirkung als wissenschaftlicher Evaluator im Lenkungsausschuss des Projekts eingeladen wurde.
Das Gipfelfoto vom Wiesbachhorn dient nicht der Dokumentation von Feldstudien zur Lawinendynamik, es ruft vielmehr die Erinnerung an einen Brauch wach, den sich Alfred Kluwick ausgedacht hat: jeder Dissertant mit ausgeprägtem Hobby konnte eine entsprechende Unternehmung vorschlagen, die nach dem Rigorosum realisiert wurde: ohne jede Furcht ließ sich "der Chef", wie er unter uns Schülern genannt wurde, ans Kletterseil nehmen, stieg vertrauensvoll in Segel- bzw. Sportmotorflugzeuge oder die Bindung von Tourenskiern ein. Die von mir vorgeschlagene Bergtour im II Kletterschwierigkeitsgrad ohne Seilsicherung auf den Ringkamp im nördlichen Hochschwab wurde nachträglich – augenzwinkernd –

Bergtour auf das Wiesbachhorn/Glocknergruppe (3564m), ∼1982: Alfred Kluwick, Peter Egger (Schwager), Norbert Stross, [D24]. Rundflug mit der Piper PA-28 Arrow III von Philipp Gittler, [D22], März 1992. Skitour auf die Reisalpe (1399m) bei Kleinzell, Dez. 1996: Alfred Kluwick, Michael Reiterer, [D13] , Veronika Kluwick, Stefan Braun, [D15], Foto: Alfred Exner, [D11].

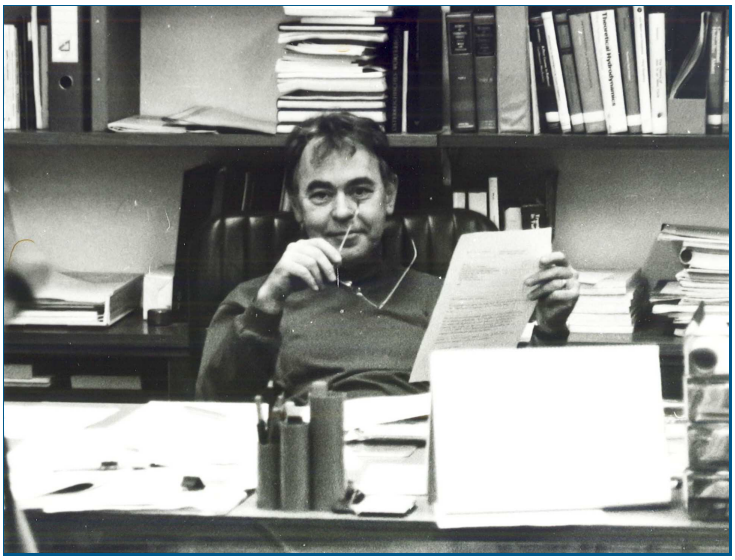
als missglückter Attentatsversuch interpretiert...



Besuch bei Ted Cox am University College Dublin, Feb. 1993.

Am Hochstaff/Türnitzer Alpen (1305m).

Dass sich Alfred Kluwick oft zum wissenschaftlichen Austausch im Ausland aufhält, wurde schon erwähnt. Mit Ted Cox, den er jährlich in Dublin besucht, verbindet ihn eine lange Zusammenarbeit auf dem Gebiet der nichtlinearen Wellenausbreitung. Mit dem Bild, dass bei einer solchen Begegnung entstanden ist, möchte ich aber auf einen ganz anderen Aspekt aufmerksam machen: die Schrift auf der Tafel im Hintergrund ist ohne Zweifel die von Alfred Kluwick. Jeder Student, der eine seiner zahlreichen Vorlesungen gehört hat, wird bestätigen können, dass Alfred Kluwicks Tafelbild zu den besten gehört, die man gesehen hat: gestochene Schrift, phänomenale Skizzen, verblüffend runde Kreise. Das ist umso erstaunlicher, als sein Zeichenlehrer in der Schule einmal meinte, dass er für das Zeichnen keine rechte Hand hätte... Dass der Zeichenlehrer offenkundig einer Fehleinschätzung unterlag, erkennt man an den unzähligen von Alfred Kluwick angefertigten Aquarellen, die seiner intensiven Auseinandersetzung mit Natur und Architektur bei Wanderungen und Reisen Ausdruck verleihen. Für mich ist in manchen seiner Bilder – wie z.B. dem von der Hochstaffgipfelwiese – der “Blick des Asymptotikers” wiederzuerkennen: im Vordergrund (dem Nahfeld) die Konzentration auf das wesentliche Motiv, der schemenhafte Horizont im Hintergrund (dem Fernfeld) verortet mit der unverkennbaren Gippel-Silhouette das Bild eindeutig.
Die wenige Zeit, die Alfred Kluwick neben seiner beruflichen Beschäftigung bleibt, verwendet er mit seiner Familie gerne für ausgedehnte Wanderungen auf unausgetretenen Wegen, seine besondere Vorliebe gilt dabei dem Aufsuchen von einsamen Wildblumen- oder Pilzstandorten. Ob es die Kenntnis der



Alfred Kluwick am Schreibtisch in der ehemaligen “Baracke” im Innenhof Resselgasse 3 der TU Wien, Nov. 1992 (Foto: Uwe Schaflinger).

Blumen (gemeint ist auch die lateinische Bezeichnung!), die hohe Kunst der Improvisation auf der Orgel oder auch “nur” die Kochkunst ist, es ist die Akribie, die Alfred Kluwicks Tätigkeit auszeichnet. Die spürbare Begeisterung, die ihn antreibt, zeichnet ihn vor allem auch als Lehrer aus. Seinen Führungsstil kann man vielleicht mit einem Zitat aus *Die Stadt in der Wüste* von Antoine de Saint-Exupéry charakterisieren: “Wenn du ein Schiff bauen willst, so trommle nicht deine Leute zusammen, um Holz zu beschaffen, Werkzeuge vorzubereiten, Aufgaben zu vergeben und die Arbeit einzuteilen, sondern lehre sie die Sehnsucht nach dem weiten, endlosen Meer...” Die Mühe, die für den Erwerb des Rüstzeuges eines Asymptotikers erforderlich ist, hat sich dem “Geschmack” – um bei der bildlichen Sprache zu bleiben – aufgeprägt: wer einmal gekostet hat, will mehr... Für die Vermittlung dieses Geschmackes danke ich Dir herzlich. Möge Dir die Begeisterung für das Ausüben Deiner vielfältigen Interessen noch viele Jahre uneingeschränkt erhalten bleiben!

Literatur

1 Millennium Prize Problems des Clay Mathematics Institute: http://www.claymath.org/millennium/ (12. Juli 2011).

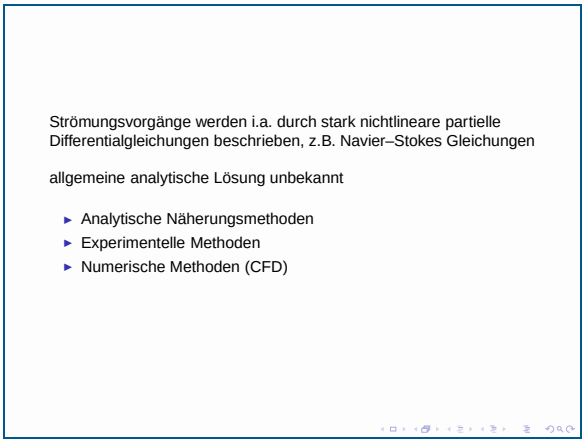
2 Putterman, S.J.: Superfluid Hydrodynamics. Elsevier, 1974.

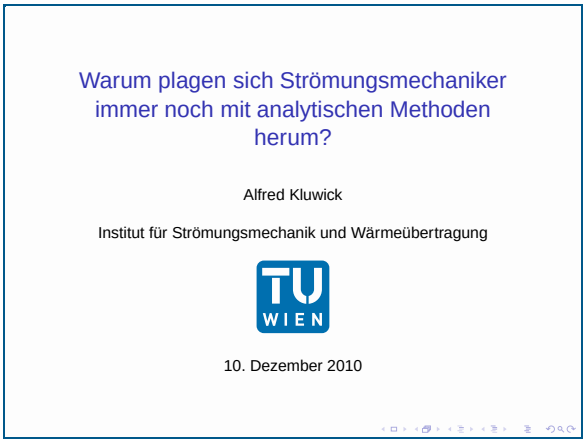
3 Sychev, V.V., Ruban, A.I., Sychev, Vik.V. & Korolev, G.L.: Asymptotic Theory of Separated Flows. Cambridge University Press, 1998.

Warum plagen sich Strömungsmechaniker immer noch mit analytischen Methoden herum?

Festvortrag von Alfred Kluwick,
Institut für Strömungsmechanik und Wärmeübertragung, TU Wien

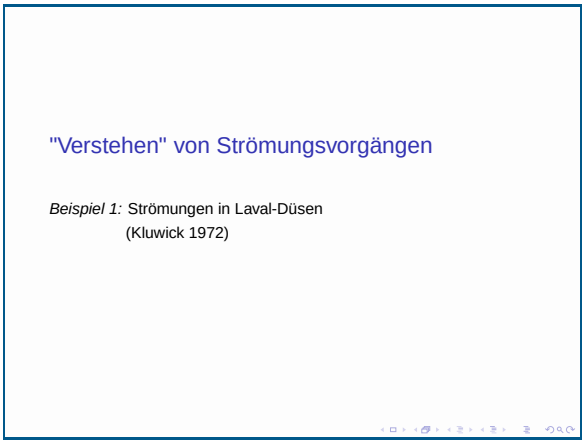
Strömungsvorgänge werden i.a. durch stark nichtlineare Gleichungen beschrieben. Das bekannteste Beispiel sind wohl die Navier–Stokes Gleichungen. Zu ihnen gibt es zwar spezielle analytische Lösungen, die allgemeine analytische Lösung aber ist unbekannt. Strömungsmechaniker waren daher schon immer gezwungen, analytische Näherungslösungen nichtlinearer Gleichungen zu konstruieren und die experimentelle Untersuchung von Strömungen zu perfektionieren.

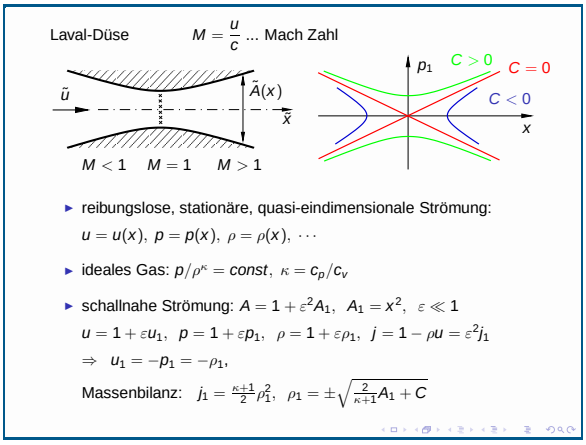




Mit der Entwicklung von immer leistungsstärkeren elektronischen Rechnern kommt der numerischen Strömungsmechanik kontinuierlich wachsende Bedeutung zu, wobei Näherungslösungen durch Diskretisierung der Ausgangsgleichungen gewonnen werden. Viele neuere Entwicklungen auf z.B. dem Gebiet der Aerodynamik wären ohne den Einsatz numerischer Verfahren nicht möglich gewesen. Ich erinnere mich noch gut an meinen ersten längeren Amerikaaufenthalt 1976 als im Gastinstitut intensiv ein vor kurzem erschienener Artikel diskutiert wurde, wonach durch die zu erwartenden rasanten Fortschritte der numerischen Strömungsmechanik in Kürze viele experimentellen Einrichtungen, wie z.B. Windkanäle, obsolet würden. Nun, diese Vorhersage hat sich nicht erfüllt. Die Lösung zahlreicher technische wichtiger Strömungsprobleme entzieht sich weiterhin einer erfolgreichen numerischen Behandlung, noch immer werden Windkanäle gebaut und auch heute plagen sich Strömungsmechaniker mit analytischen Methoden herum. Warum tun sie das? Mein heutiger Vortrag ist ein naturgemäß unvollständiger und zugegebenermaßen sehr subjektiver Versuch, Antworten auf diese Frage zu geben.

Ein offensichtlicher Grund für die Anwendung analytischer Methoden ist das Bestreben, Strömungsvorgänge durch das Herausschälen der für ihr Auftreten maßgeblichen physikalischen Mechanismen “zu verstehen”.
Als Assistent bei Klaus Oswatitsch hatte ich mit den Maschinenbaustudenten die Berechnung der Strömungsvorgänge in Lavaldüsen zu üben. Dabei handelt es sich, wie im Bild skizziert, um konvergente-divergente Düsen, mit denen Gase von Unterschall- auf Überschallgeschwindigkeit beschleunigt werden, um z.B. als Teil eines Flugzeug- oder Raketentriebwerkes möglichst großen Schub zu erzeugen. Für die Charakterisierung des Strömungszustandes in der Düse ist es zweckmäßig, die nach dem österr. Physiker Ernst Mach benannte Mach-Zahl M, d.i. das Verhältnis der lokalen Strömungsgeschwindigkeit u und der lokalen Schallgeschwindigkeit c, einzuführen. Im Falle einer idealen Lavaldüse gilt dann $M < 1$ im konvergenten, $M > 1$ im divergenten Düsenteil und $M = 1$ im Querschnittsminimum.





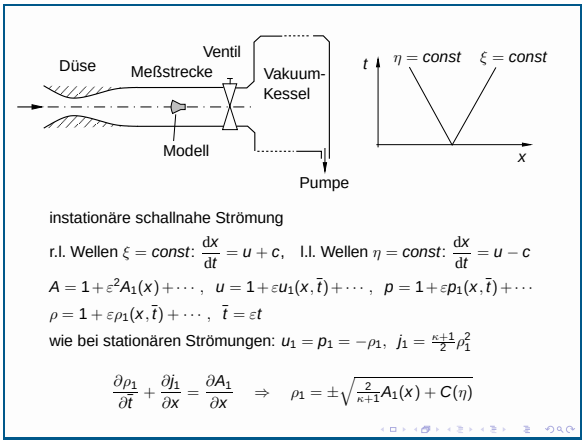
Zur Vereinfachung der Rechnungen werden häufig die hier aufgelisteten Annahmen getroffen:

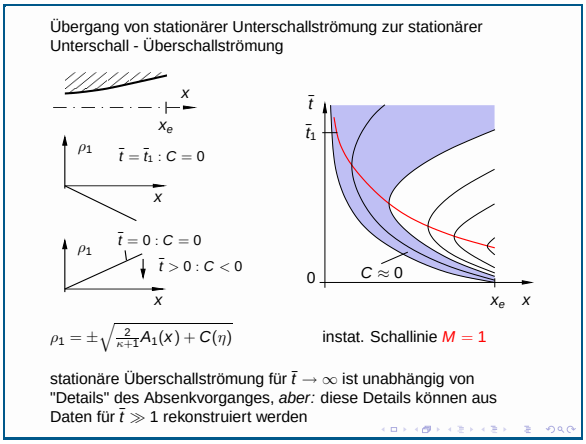
- reibungslose, stationäre, quasi-eindimensionale Strömung. Alle die Strömung charakterisierende Feldgrößen wie Geschwindigkeit u, Dichte ρ, Druck p, Schallgeschwindigkeit c sind dann nur Funktionen der längs der Düsenachse gemessenen Koordinate x,

- beim strömenden Medium handelt es sich um das einfachste kompressible Fluid, ein ideales Gas.

Dennoch sind die sich ergebenden Beziehungen ziemlich komplex, sodass es zweckmäßig ist, das für das Strömungsverhalten entscheidende Gebiet in der Nähe des engsten Querschnittes gesondert zu untersuchen. Dazu führen wir, wie in der Strömungsmechanik üblich, dimensionslose Größen ein, d.h. wir beziehen die Werte aller Feldgrößen auf die Werte bei der Mach-Zahl $M = 1$, die sie in einer idealen Lavaldüse im engsten Querschnitt annehmen. Die in einer kleinen Umgebung dieses Querschnittes auftretenden geringen Änderungen der Feldgrößen schreiben wir dann in dieser Form, wobei ε einen kleinen Störparameter bedeutet. Da der Querschnitt der Düse bei $M = 1$ ein Minimum aufweist, ist klar, dass die Querschnittsänderungen proportional zu ε^2 sein müssen. Eintragen dieser Ansätze in den Energiesatz liefert Beziehungen zwischen den Änderungen der Geschwindigkeit und jenen der Dichte bzw. des Druckes und damit den wichtigen Schluß, dass die Abweichung des Massenstromes pro Flächeneinheit j_1 vom kritischen Wert bei $M = 1$ alleine durch ρ_1 oder p_1 ausgedrückt werden kann und somit eine thermodynamische Zustandsgröße darstellt. Der letztlich gesuchte Zusammenhang zwischen Dichte bzw. Druck und Querschnitt A folgt daher sofort aus der Kontinuitätsgleichung, d.h. aus der Bedingung, dass bei stationärer Strömung durch jeden Querschnitt dieselbe Masse pro Zeiteinheit strömt, dabei bedeutet C eine beliebige Konstante. Für den bei praktischen Anwendungen wichtigsten Fall einer parabolischen Düsenform ist A_1 proportional zu x^2 und alle möglichen Lösungen sind in diesem Diagramm zusammengestellt. Dabei entsprechen positive bzw. negative Werte von p_1 Strömungen mit Unterschall- bzw. Überschallgeschwindigkeit. Wählen wir das positive Vorzeichen, so beschreibt $C = 0$ Strömungen, bei

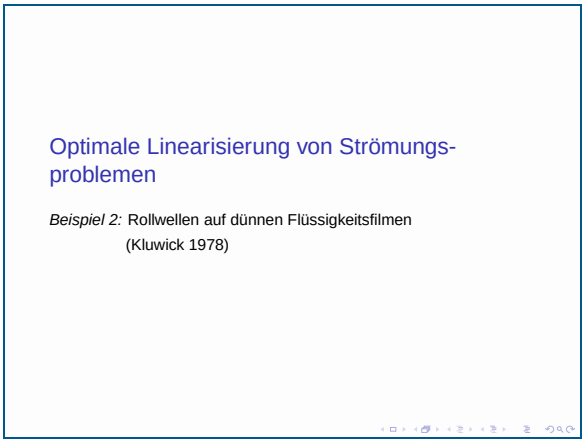
denen das Gas im konvergenten Teil der Düse auf $M = 1$ beschleunigt und im darauffolgenden divergenten Teil wieder auf Unterschallgeschwindigkeit verzögert wird. Ändern wir an der Stelle des engsten Querschnittes $x = 0$, wo der Wurzelausdruck verschwindet, das Vorzeichen, so erhalten wir den Fall der idealen Lavaldüse, in der das Gas kontinuierlich von $M < 1$ auf $M > 1$ beschleunigt wird. Positive Werte von C entsprechen reinen Unterschall- bzw. Überschallströmungen. Für negative Werte von C wird der kritische Zustand $M = 1$ bereits vor oder erst nach dem engsten Querschnitt erreicht – dazwischen ist dieser Wurzelausdruck imaginär. Stationäre Lösungen für negative Werte von C sind daher physikalisch nicht möglich.

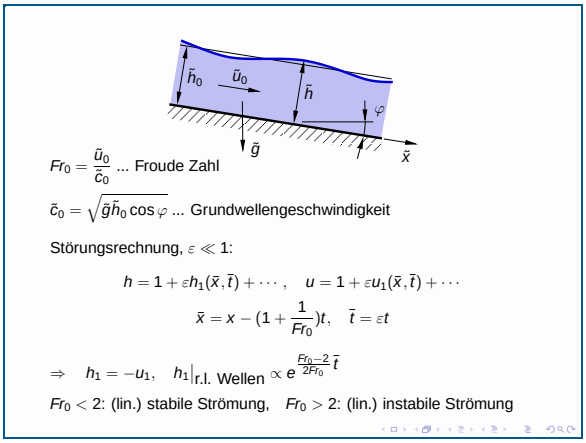




Neben dem bereits erwähnten Einsatz in Flugzeug- bzw. Raketentriebwerken werden Lavaldüsen auch in Windkanälen zur experimentellen Untersuchung von Überschallströmungen verwendet. Der einfachst mögliche Aufbau eines solchen Windkanales, wie er in unserem Labor realisiert wurde, ist auf der nächsten Folie skizziert. Er besteht aus aus einer Lavaldüse, der Meßstrecke, in der die Experimente z.B. an einem Wiedereintrittskörper durchgeführt werden, einem Absperrventil, einem Kessel und einer Vakuumpumpe. Zu Versuchsbeginn ist das Ventil geschlossen und der Kessel wird mithilfe der Pumpe evakuiert. Öffnet man nun das Ventil, so strömt Luft aus der Umgebung in den Kessel und nach kurzer Zeit stellt sich in der Meßstrecke stationäre Überschallströmung ein. Diese bricht zusammen, wenn der Druck im Kessel zu stark angestiegen ist und ein neuer Zyklus muß gestartet werden. Eine in diesem Zusammenhang wichtige Frage ist die folgende: wie führen die nach dem Öffnen des Ventils einsetzende zeitabhängige, d.h. instationäre Strömungsvorgänge schließlich zur gewünschten stationären Überschallströmung in der Meßstrecke? Als Vorbereitung zur Beantwortung dieser Frage müssen wir uns überlegen, wie es zum Informationsaustausch zwischen zwei Punkten in der Strömung kommt. Dieser wird bewerkstelligt durch akustische Wellen, die sich relativ zum strömenden Medium mit der Schallgeschwindigkeit c ausbreiten. Offensichtlich gibt es dafür zwei Möglichkeiten: *(i)* Wellen, die sich relativ zum strömenden Medium nach rechts bewegen. Sie laufen nach Öffnen des Ventils in den Kessel hinein und sind daher für den Anlaufvorgang in der Düse ohne Bedeutung. *(ii)* Wellen, die sich relativ zum strömenden Medium nach links bewegen und die sich somit auch stromaufwärts ausbreiten können und so das Gas in der Düse darüber informieren, dass das Ventil geöffnet wurde. Die Berechnung des gesamten Anlaufvorganges ist sehr aufwendig. Das für uns Wesentliche ist aber bereits zu erkennen, wenn wir die Untersuchung auf eine kleine Umgebung des Düsenhalses beschränken und weiters annehmen, dass der Anlaufvorgang soweit fortgeschritten ist, sodass hier bereits schallnahe Strömung herrscht, [J70]. Wir können dann wie früher vorgehen, müssen aber berücksichtigen, dass alle Feldgrößen nun von Ort und Zeit abhängen. Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit linkslaufender Wellen unter der getroffenen Annahme, dass u und c sich nur wenig unterscheiden, sehr klein ist, ist auch die zeitliche Änderung der Feldgrößen gering. In der mathematischen Analyse erfordert dies die Einführung einer gestreckten Zeit $\bar{t}$; die daraus folgenden physikalischen Konsequenzen sind aber unmittelbar einleuchtend: die Störungen der Feldgrößen genügen denselben Beziehungen wie bei stationären Strömungen, insbesondere gilt

unverändert das früher hergeleitete Resultat für die Störung j_1 des Massenstromes. Die gesuchte Dichteverteilung in der Düse ergibt sich daher wieder aus der Massenbilanz, die allerdings nun um diesen instationären Term zu erweitern ist. Dennoch läßt sich ihre Lösung wieder in geschlossener Form angeben: ihr Aufbau stimmt formal mit jenem für stationäre Strömungen überein, allerdings ist C nun keine Konstante, sondern kann auf linkslaufenden Wellen verschiedene Werte annehmen. Und, wie auf der nächsten Folie gezeigt, erlaubt gerade diese Eigenschaft die Beschreibung des Anlaufvorganges. Speziell nehmen wir an, dass zum Ausgangszeitpunkt $t = 0$ in der Düse reine Unterschallströmung mit $M = 1$ im Düsenhals herrscht. Der Düsenhals stellt dann für linkslaufende Wellen eine unüberwindbare Barriere dar und es genügt daher, die Strömungsvorgänge im divergenten Teil der Düse $x > 0$ zu untersuchen. Um hier Überschallgeschwindigkeit zu erzeugen, senken wir nun am Düsenende die Dichte ab, indem wir hier, ausgehend von $C = 0$, zunehmend negative Werte von C vorschreiben. Wie bei den früher diskutierten stationären Strömungen bewirkt dies, dass der kritische Strömungszustand $M = 1$ stromabwärts vom Düsenhals erreicht wird. Und während wir dies bei stationären Strömungen ausschließen mußten, liefert dies nun genau das, was wir zur Berechnung des Anfahrvorganges benötigen: die Bildung einer instationären Schallinie, die vom Düsenende zum Düsenhals läuft und die x, t-Ebene in zwei Gebiete teilt. Unterhalb der Schallinie herrscht Unterschallgeschwindigkeit. Linkslaufende Wellen breiten sich daher stromaufwärts aus, bis sie auf der Schallinie – wo die Strömungsgeschwindigkeit gleich der Schallgeschwindigkeit ist – zum Stehen kommen. Hier verschwindet dieser Wurzelausdruck und wir können die Berechnung fortsetzen, indem wir die Lösung mit positivem Vorzeichen anschließen. Damit gelangen wir in den Überschallbereich oberhalb der Schallinie, in dem wegen $u > c$ linkslaufende Wellen stromabwärts getragen werden. Zu großen Zeiten befinden sich daher nur mehr Wellen in der Düse, die ganz am Anfang des Anfahrvorganges entstanden sind, wo der Wert der Konstanten C noch nahezu null ist: die stationäre Unterschalllösung ist daher durch den Vorzeichenwechsel auf der instationären Schallinie in die stationäre Überschallströmung übergegangen. Der Mechanismus des Anfahrvorganges ist daher klar herausgeschält und, was unser Ziel war, verstanden. Gleichzeitig erkennt man, warum – wie es sein muß – das Endergebnis von den Details der hier vorgeschriebenen Druckabsenkung völlig unabhängig ist. Die damit verbundene Information ist allerdings nicht verloren. Wir können zu jedem Zeitpunkt, ausgehend von der Dichteverteilung auf der gesamten x-Achse, die früher herrschenden Strömungsverhältnisse rekonstruieren.

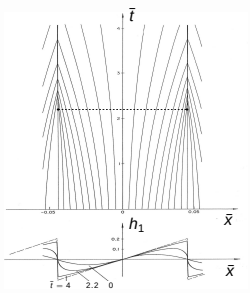




Das dies nicht immer so ist, zeigt die nächste Anwendung analytischer Methoden zur Untersuchung der Stabilität von Strömungen. Den Ausgangspunkt unserer Überlegungen bildet ein dünner Flüssigkeitsfilm, der sich an einer geneigten Wand unter der Wirkung der Erdbeschleunigung ausbildet. Um unsere Aufgabe zu vereinfachen, nehmen wir an, dass die Strömungsgeschwindigkeit u über die gesamte Filmdicke konstant ist, was für turbulente Filme eine sehr gute Näherung darstellt, [P93], [J58]. Die einfachste mögliche Strömungsform ist dann ein Film mit konstanter Dicke h_0 und konstanter Geschwindigkeit u_0 und wir fragen uns was passiert, wenn wir diesen stationären Zustand schwach stören. Um dies herauszu-

finden, gehen wir genau so vor wie im 1. Beispiel: d.h. wir entwickeln die Feldgrößen nach einem kleinen Parameter ε und finden, dass nun ihr Verhalten auf stromabwärtslaufenden Wellen von entscheidender Bedeutung ist. Auf ihnen ist die zeitliche Entwicklung z.B. der Filmdicke durch diese Beziehung gegeben. Die mit *Fr* bezeichnete Froude-Zahl charakterisiert – ähnlich wie die Mach-Zahl – das Verhältnis von Strömungsgeschwindigkeit zur Geschwindigkeit c_0 mit der sich infinitesimal kleine Störungen im ungestörten Film ausbreiten. Ist die Froude-Zahl kleiner 2, so ist der Exponent negativ und die anfänglich vorgeschriebenen Störungen werden mit zunehmender Zeit t kleiner, sodass sich für $t \to \infty$ wieder der ursprüngliche, daher stabile Strömungszustand einstellt. Für Werte der Froude-Zahl größer als 2 ist der Exponent positiv und die Störungen der Filmdicke wachsen mit größer werdender Zeit unbegrenzt an. Die Strömung kehrt daher nun nicht mehr zum ungestörten stationären Grundzustand zurück; sie ist instabil. Gleichzeitig legt dieses Ergebnis den Schluß nahe, dass unsere Analyse für große Zeiten ihre Gültigkeit verliert, da die Störungen nun nicht mehr – so wie ursprünglich angenommen – klein sind und damit die, in diesem Ansatz zum Ausdruck kommende, Linearisierung der strömungsmechanischen Grundgleichungen versagt (genauer formuliert stellt der Wert $Fr = 2$ daher eine lineare Stabilitätsgrenze dar). Allerdings ist dieser Schluß voreilig. Denn – und Oswatitsch wurde nicht müde, seine Dissertanten darauf hinzuweisen – ist Linearisierung nicht gleich Linearisierung. Hätten wir in diesem Ansatz die ursprüngliche Zeit t anstelle von $\bar{t} = \varepsilon t$ gewählt, so bliebe dieses Resultat formal ungeändert. Allerdings beschreibt es dann die zeitliche Entwicklung von h_1 an einem festen Ort x und die Filmdicke wird für wachsende Zeit schließlich tatsächlich so groß, dass die Gültigkeit der Lösung nicht mehr gegeben ist. Bei Verwendung der gestreckten Zeit $\bar{t}$ ist der Ort der Störung hingegen zunächst noch unbekannt und muß in einem zweiten Schritt durch Bestimmung der Lage der Wellenfronten $\xi = const$ festgelegt werden. Das Ergebnis ist auf der nächsten Folie für eine sinusförmige Anfangsverteilung gezeigt. Im Gegensatz zu dem früher behandelten Beispiel von Wellenausbreitungsvorgängen in Lavaldüsen gibt es in der x, t-Ebene Bereiche, in denen die Wellenfronten zusammenlaufen und einander schließlich schneiden. Dadurch geht das zunächst stetige Wellenprofil in ein Profil mit unstetigen Änderungen der Filmdicke, sogenannten Wassersprüngen oder Stößen, über. Die in die durch dicke Linien gekennzeichneten Stoßfronten einlaufenden Wellen tragen für spätere Zeiten nichts mehr zum Wellenprofil bei. Damit ist das exponentielle Wachstum der Störungen in der instabilen Grundströmung gestoppt und für große Zeiten t erhält man eine Welle endlicher Amplitude mit sägezahnähnlicher Form, die als Rollwelle bezeichnet wird.

Als Folge der Elimination von Wellen durch Stöße geht nun allerdings Information verloren; aus der stets gleichen Form der Rollwellen kann das Anfangsprofil nicht mehr rekonstruiert werden. Ausgedrückt in der Sprache der Thermodynamik bedeutet dies, dass es sich bei der Bildung von Rollwellen um einen irreversiblen, mit Strömungsverlusten verbundenen Vorgang handelt. Rollwellen beobachtet man daher in Ingenieurbauten, wo solche Verluste zur Begrenzung der kinetischen Energie des strömenden Mediums erwünscht sind, wie z.B. in Wildbachverbauungen. Ein verwandtes Phänomen können Sie aber auch nach jedem Regen auf geneigten Straßen beobachten, wenn der Wasserfilm abläuft.



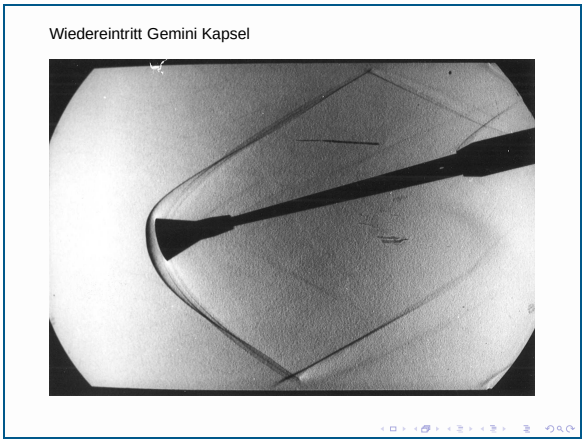
Informationsverlust $\Rightarrow$ Entropieanstieg

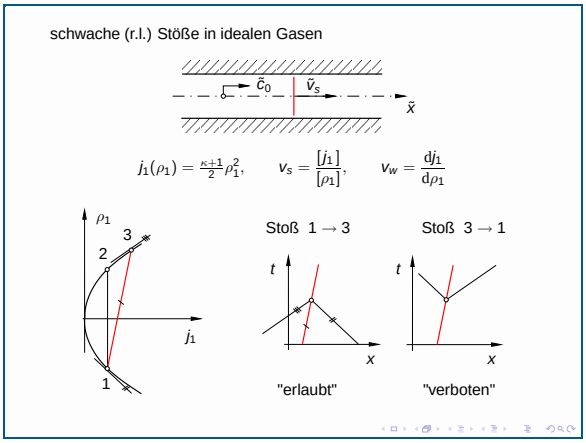
$\Rightarrow$ Verminderung der Arbeitsfähigkeit des Systems

Vorhersage neuer physikalischer Phänomene

Beispiel 3: Stöße in allgemeinen Fluiden
(Kluwick 1998)

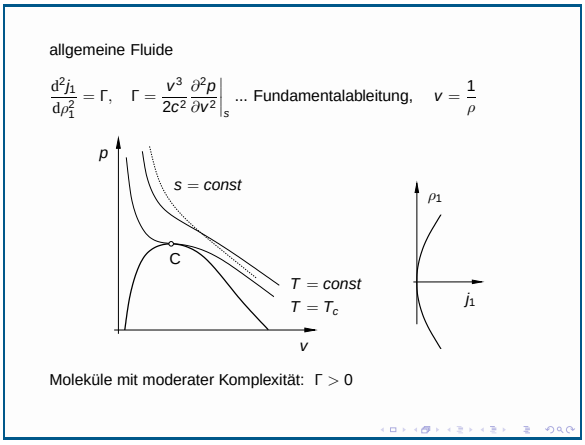
Unstetige Änderungen der Feldgrößen in Form von Stößen treten nicht nur wie hier an freien Oberflächen auf, sondern sind ein sehr häufiges Element von Strömungen kompressibler Medien wie z.B. stationären Überschallströmungen oder Ausbreitungsvorgängen. Wir wollen uns mit ihnen im Rahmen eines weiteren Beispiels, das die Vorteile analytischer Methoden bei der gezielten Suche nach neuen physikalischen Phänomenen zum Inhalt hat, etwas näher beschäftigen.

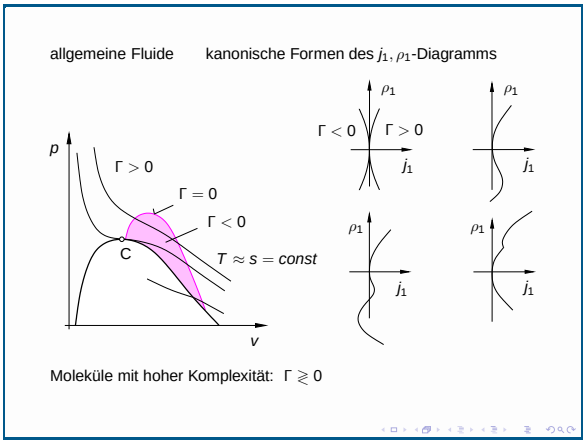




Die nächste Folie zeigt ein in unserem kleinen Überschallwindkanal gewonnenes Bild der Strömung um eine Gemini Raumkapsel – dem Vorgänger des Apollo Raumschiffes – im Landeanflug bei etwa zweieinhalbfacher Schallgeschwindigkeit. Sie sehen die Modellhalterung, den Fallschirmbehälter, die Kapsel für die beiden Astronauten sowie den Hitzeschild mit dem davorliegenden Stoß, der mithilfe einer optischen Methode sichtbar gemacht wurde. Über diesen Stoß steigt die absolute Temperatur um etwa 30%, was im Windkanal kein Problem darstellt. Am Beginn der Wiedereintrittsphase sind die Temperaturen hinter dem Stoß aber wesentlich höher und mit der Temperatur auf der Sonnenoberfläche vergleichbar, was spezielle Vorkehrungen erfordert, um ein Verglühen der Raumkapsel zu verhindern. Im Vergleich zu diesem starken Stoß sind die in konventionellen technischen Anwendungen auftretenden Stöße wesentlich schwächer. Aus gutem Grund, denn man versucht die mit ihrem Auftreten verbundenen Verluste, die z.B. bei der Umströmung des Tragflügels eines Flugzeuges zu einer Erhöhung des Widerstandes und damit des Treibstoffverbrauches führen würde, klein zu halten. Schwache Stöße sind daher ein wichtiges Forschungsgebiet der Strömungsmechanik. In diesem Zusammenhang stellen wir uns zunächst die Frage, was wir auf der Grundlage der bisher gewonnenen Ergebnisse über schwache Stöße aussagen können. Wie die auf der nächsten Folie skizzierte Untersuchung von rechtslaufenden Wellen in Kanälen oder Rohren konstanten Querschnittes zeigt, bereits sehr viel. Denn führen wir ein Koordinatensystem ein, das sich mit der Schallgeschwindigkeit c_0 im ungestörten, ruhenden Zustand nach rechts bewegt, so weichen die in ihm auftretenden Strömungsgeschwindigkeiten nur wenig von den lokalen Werten der Schallgeschwindigkeit ab: d.h. wir beobachten eine schallnahe Strömung ähnlich der früher behandelten in schlanken Lavaldüsen. Für ideale Gase nimmt daher der Zusammenhang zwischen den Störungen des Massenstromes j_1 und der Dichte ρ_1 diese uns bereits bekannte Form an, [P59]. Für einen im bewegten Koordinatensystem stationären Stoß verlangt das Gesetz der Massenerhaltung, dass j_1 über den Stoß hinweg konstant ist: d.h. zusammengehörige Werte von ρ_1 sind durch die Schnittpunkte mit der zur ρ_1-Achse parallelen Geraden festgelegt. Ganz allgemein hängt die Stoßgeschwindigkeit v_s in dieser Weise mit den sprunghaften Änderungen von j_1 und ρ_1 – hier durch die eckigen Klammern definiert – zusammen. Der Grenzübergang zu verschwindender Stoßstärke $[j_1] \to 0$ liefert dann das hier angegebene Resultat für die Geschwindigkeit v_w rechtslaufender Wellen.
Interessant und wichtig ist die geometrische Interpretation der hier zusammengefaßten analytischen Ergebnisse: die Neigung eines Stoßes in der Orts, Zeit-Ebene ist gegeben durch die Neigung der sogenannten Rayleigh-Geraden, die im j_1, ρ_1-Diagramm, das ich im Folgenden als Stoßpolare bezeichnen werde, die Zustände vor und nach dem Stoß verbindet. Die Neigung einer rechtslaufenden Welle in der x, t-

Ebene stimmt mit der Neigung der Tangente an die Stoßpolare überein. Für einen Stoß, über den hinweg die Dichtestörung ρ_1 zunimmt, erhalten wir somit diese geometrische Darstellung: rechtslaufende Wellen laufen von beiden Seiten auf die Stoßfront zu. In völliger Übereinstimmung zur vorher besprochenen Bildung von Rollwellen auf Flüssigkeitsfilmen schließen wir daher, dass Stoßunstetigkeiten durch das Zusammenlaufen von von Wellen entstehen. Bei einem Stoß, der eine Dichteabnahme bewirkt, ist dieser Entstehungsmechanismus hingegen nicht erfüllt, wie aus der rechten Skizze zu entnehmen ist. Da die Werte der Dichtestörung ρ_1 vor und nach dem Stoß nun vertauscht sind, laufen Wellen jetzt vielmehr aus der Stoßfront heraus. In einem idealen Gas können daher nur Verdichtungsstöße, aber keine Verdünnungsstöße auftreten. Dieses Ergebnis ist seit langem bekannt und Gegenstand jeder Grundlagenvorlesung über Strömungsmechanik. Aber, gilt es auch in allgemeinen Fluiden? Um diese Frage zu klären, müssen wir zunächst die Form der Stoßpolaren für solche Medien bestimmen.

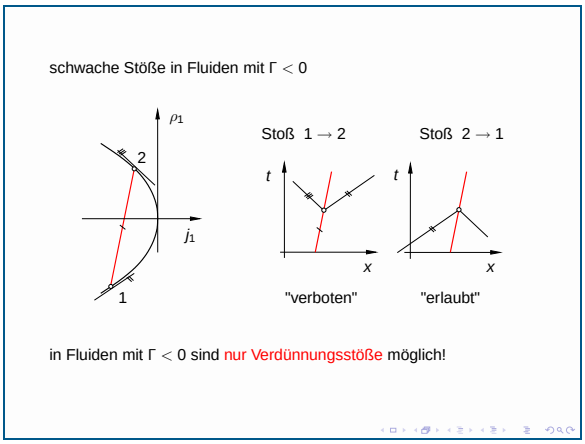


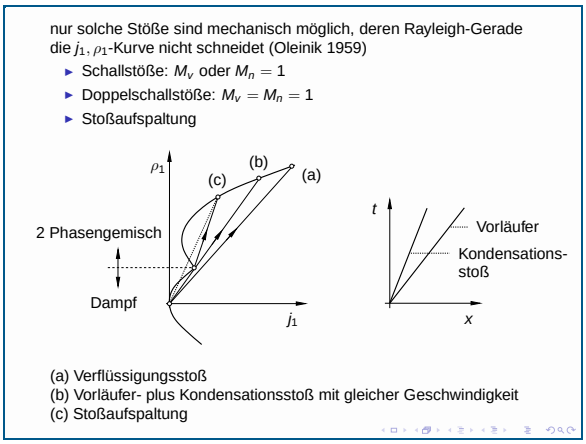


Dies erlaubt uns die auf der nächsten Folie angeführte Beziehung, wonach die zweite Ableitung von j_1 nach ρ_1, das ist im Wesentlichen die lokale Krümmung der Stoßpolaren, durch die üblicherweise mit Γ bezeichnete Fundamentalableitung der Gasdynamik gegeben ist, die ihrerseits wieder ein Maß für die Krümmung von Isentropen im p, v-Diagramm, das jedem Ingenieur vertraut ist, darstellt. Hier bedeutet v das spezifische Volumen, d.h. den Kehrwert der Dichte ρ. In dem hier skizzierten typischen p, v-Diagramm ist die dick durchgezogene Kurve die Sättigungskurve, die die Einphasengebiete Flüssigkeit bzw. Dampf vom Zweiphasengebiet Flüssigkeit plus Dampf, trennt. Das Zweiphasengebiet wird nach oben durch den kritischen Punkt C abgeschlossen. Für höhere Werte des Druckes p entfällt die Unterscheidung zwischen Flüssigkeit und Dampf. Dargestellt ist weiters der Verlauf von Isothermen $T = const$, die in der Nähe von C Wendepunkte aufweisen. Dies wird im Folgenden wichtig sein. Die strichlierte Kurve beschreibt isentrope Zustandsänderungen, d.h. stetige Zustandsänderungen ohne Wärmezu- oder Abfuhr. Bei Fluiden, deren Moleküle so wie etwa bei Wasser nur aus wenigen Atomen gebildet werden, sind sie wie bei idealen Gasen nach oben hohl; das Stoßpolarendiagramm hat die uns schon vertraute Form und es sind daher wieder nur Verdichtungsstöße aber keine Verdünnungsstöße möglich.

Um die mit zunehmender molekularer Komplexität des Fluids verbundenen Änderungen des physikalischen Verhaltens zu verstehen, ist auf der nächsten Folie wieder der Verlauf von Isothermen, die Zustandsänderungen bei konstanter Temperatur charakterisieren, dargestellt. Und zwar aus folgendem Grund: Moleküle, die aus vielen Atomen bestehen, weisen eine große Zahl von Freiheitsgraden auf, da die Atome, zusätzlich zu ihrer gemeinsamen translatorischen Bewegung, umeinander rotieren und relativ zueinander schwingen können. Nach dem Gleichverteilungssatz der Thermodynamik wird die dem Fluid bei isentropen Zustandsänderungen zugeführte mechanische Energie in gleichen Portionen auf alle (aktiven, d.h. angeregten) Freiheitsgrade aufgeteilt, siehe z.B. [10]. Mit zunehmender Zahl der Freiheitsgrade entfällt daher auf jeden ein immer geringerer Anteil – auch auf den translatorischen, der die Temperatur festlegt. In Fluiden mit komplexer Molekülstruktur ändert sich daher bei isentropen Zustandsänderun-

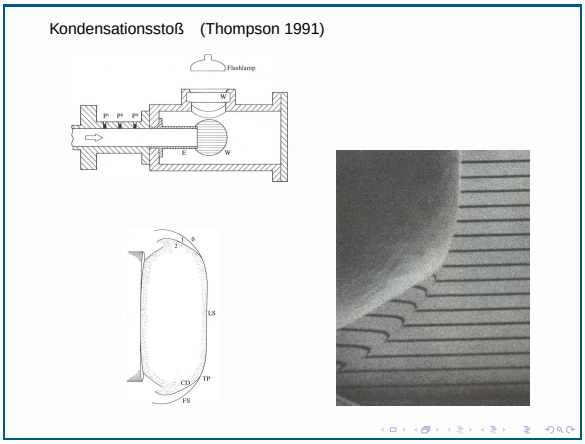
gen die Temperatur nur geringfügig oder, anders ausgedrückt, fallen Isentropen und Isothermen im p, v-Diagramm nahezu zusammen. Dies bedeutet aber, dass Isentropen nun – im krassen Gegensatz zu idealen Gasen – so wie Isothermen Wendepunkte aufweisen. Diese liegen auf der hier strichliert eingezeichneten Übergangskurve $\Gamma = 0$. Ist nun der ungestörte Zustand des Fluids durch einen Punkt charakterisiert, der hinreichend weit von dieser Kurve entfernt ist, so sind die Isentropen in einer kleinen Umgebung davon entweder nach oben oder nach unten hohl. Dies bedeutet, dass die Stoßpolare, wie im Falle eines idealen Gases, durch eine Parabel gegeben ist, wobei allerdings die Krümmung nun auch negativ sein kann. In der Umgebung von Zuständen, die nahe der Übergangskurve liegen, wechselt die Krümmung von Isentropen einmal oder sogar zweimal das Vorzeichen mit der Konsequenz, dass sie zugehörigen Stoßpolaren einen oder zwei Wendepunkte aufweisen. Schließlich zeigt eine genauere Untersuchung, dass sich die Neigung von Isentropen an der Sättigungskurve unstetig ändert, was zu einer Polare mit Knick für Stöße, die einen Phasenwechsel bewirken können, führt.
Damit haben wir die Gesamtheit aller theoretisch möglichen Stoßpolaren erfaßt und können nun die daraus folgenden Konsequenzen besprechen. Eine erste, sehr wichtige, ist unmittelbar klar. Für Ausgangszustände mit negativen Werten von Γ unterscheidet sich die Stoßpolare von jener für ideale Gase durch das Vorzeichen ihrer Krümmung. Daraus folgt aber sofort, wie auf der nächsten Folie dargestellt, dass nun nur Verdünnungsstöße, aber nicht mehr Verdichtungsstöße das früher formulierte Entstehungskriterium durch das Zusammenlaufen von Wellen erfüllen. Die Bildung von Verdichtungsstößen widerspricht daher nicht, wie in der Vergangenheit öfters vermutet, fundamentalen Gesetzen der Physik, sondern erfordert lediglich eine hinreichend komplexe Molekülstruktur.

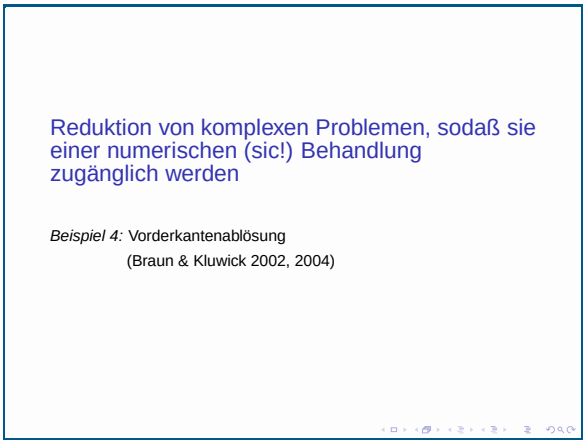




Um weitere Schlüsse ziehen zu können, benötigen wir den von Oleinik 1959 bewiesenen Satz, dass Stöße unter gewissen, hier erfüllten, Bedingungen nur dann zulässig sind, wenn ihre Rayleigh-Gerade die Stoßpolare nicht schneidet. Angewendet auf die eben gezeigten Stoßpolaren bedeutet dies, dass es in allgemeinen Medien zur Bildung von Schallstößen, bei denen die Machzahl vor oder nach der Front gleich eins ist, kommen kann, aber auch zur Bildung von Doppelschallstößen, die dadurch ausgezeichnet sind, dass die Strömungsgeschwindigkeit vor und nach der Front mit der Schallgeschwindigkeit übereinstimmt. Beide Resultate stehen im krassen Gegensatz zu den Vorhersagen der klassischen Gasdynamik idealer Gase, wonach Stöße stets von Überschall- zu Unterschallgeschwindigkeiten führen. Das wohl interessanteste neue Phänomen ist sicherlich das der Stoßaufspaltung. Um zu sehen, was damit gemeint ist, betrachten wir Stöße, die zu einer teilweisen Kondensation eines überhitzten Dampfes führen. Ist die Dichtezunahme genügend groß, wird dies durch einen einzelnen Stoß bewirkt, der daher als Verflüssigungsstoß bezeichnet wird. Mit abnehmender Stoßstärke gelangen wir schließlich zu dem Grenzfall, bei der die Rayleigh-Gerade die Stoßpolare im auf der Sättigungskurve liegenden Knick berührt. Somit ist auch folgende Interpretation möglich: der gesamte Dichteanstieg erfolgt in zwei Stufen: *(i)* einem “trockenen” Stoß der zum Sättigungszustand führt und *(ii)* einem Kondensationsstoß, in dem der Endzustand erreicht wird. Eine weitere Abnahme der Stoßstärke führt dann zu diesem Bild. Da die

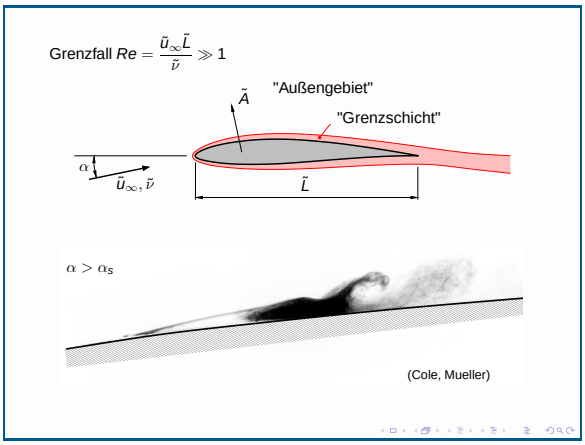
Rayleigh-Gerade die Stoßpolare nicht schneiden darf, kann die gesamte Dichteänderung nicht mehr von einem einzigen Stoß bewirkt werden, sondern nur durch das Zusammenspiel eines trockenen und eines Kondensationsstoßes. Beide breiten sich aber mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten aus. Verflüssigungsstöße sind in den 1990 Jahren intensiv experimentell untersucht worden. Die nächste Folie zeigt die von Thompson und Mitarbeitern am Rensselaer Polytechnic Institute in Troy, New York verwendete Versuchsanordnung bestehend aus einem Stoßwellenrohr und der Beobachtungskammer, [9]. Als Versuchsmedium wurde die Fluorkohlenstoffverbindung FC-75 verwendet und die Stoßgeschwindigkeit betrug etwa das doppelte der Schallgeschwindigkeit im ungestörten Zustand vor dem Stoß. Verläßt der Verflüssigungsstoß das Stoßwellenrohr, so beginnt sich seine ursprünglich ebene Front, wie hier skizziert, zu krümmen. Dies hat zur Folge, dass die Stoßstärke mit wachsendem Abstand von der Rohrachse abnimmt. Im hier betrachteten Fall wird die kritische Stoßstärke an der Grenze zur Stoßaufspaltung im Punkt TP erreicht. Zwischen der Rohrachse und TP wird die Kondensation des Dampfes durch einen einzigen Verflüssigungsstoß bewirkt. Dies ist auf diesem Foto gut zu erkennen. Das Gebiet des Dampfes vor dem Stoß und jenes des Zweiphasengemisches, das die Lichtstrahlen blockiert, ist durch eine scharfe Linie, den Verflüssigungsstoß, getrennt. Für größere Achsabstände hingegen ist der Dichteanstieg zu gering, um durch einen Einzelstoß bewirkt werden zu können. Es kommt daher zur Aufspaltung in einen trockenen Vorläuferstoß und einen Kondensationsstoß. Auch dieses ist auf dem Foto deutlich zu erkennen.

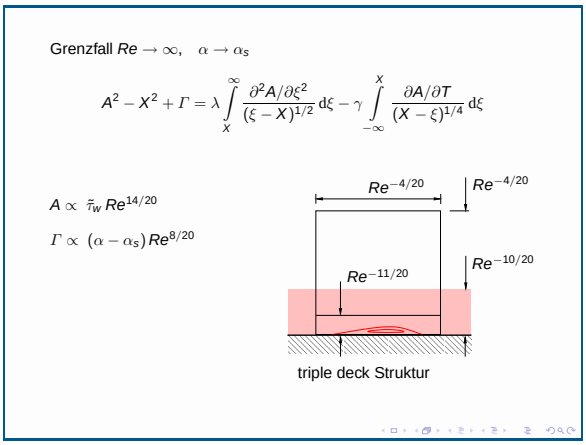




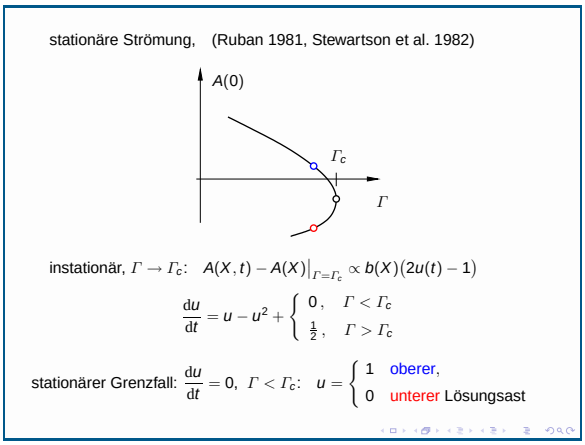
Eine wichtige Rolle kommt analytischen Methoden bei der Reduktion von komplexen strömungsmechanischen Problemen zu, sodass sie einer numerischen Behandlung erst zugänglich werden. Ich möchte das am Beispiel der Umströmung schlanker Tragflügelprofile ausführen, wobei bei praktischen Anwendungen vor allem der Fall interessiert, dass die mit der Anströmgeschwindigkeit $\tilde{u}_\infty$, der Profillänge $\tilde{L}$ und der die innere Reibung der Luft charakterisierende Zähigkeit $\tilde{\nu}$ gebildete Reynolds-Zahl *Re* groß gegen eins ist. Wie bereits vor über 100 Jahren von L. Prandtl gezeigt wurde, [2], bleiben Reibungseinflüsse dann im Wesentlichen auf eine dünne körpernahe Schicht, die Grenzschicht, beschränkt und können daher im restlichen Teil der Strömung, dem Außengebiet, vernachlässigt werden. Die Grenzschicht ist passiv in dem Sinne, dass ihre Eigenschaften durch die Außenströmung aufgeprägt werden und ihre Rückwirkung auf die Außenströmung schwach ist; man spricht daher von schwacher Wechselwirkung. Um den gewünschten Auftrieb zu erzeugen, muß das Tragflügelprofil gegenüber der Anströmung um einen Winkel α angestellt sein. Ist α genügend klein, so beobachtet man eine glatte Profilumströmung und die Auftriebskraft $\tilde{A}$ nimmt mit größerwerdendem Anstellwinkel zu. Überschreitet α jedoch einen kritischen Wert α_c, so kommt es im Bereich der Profilnase zu Strömungsablösung und zur Bildung einer kurzen Ablöseblase – zunächst noch ohne merkliche Änderungen des Strömungsverhaltens. Eine geringfügige weitere Steigerung von α führt aber zur Katastrophe: die Ablöseblase platzt auf und es kommt zum sich periodisch wiederholenden Ausschleudern von Wirbeln in den Bereich der Außenströmung, wie es hier durch Einblasen von Rauch sichtbar gemacht wurde. Dieses gefürchtete Phänomen führt zu einem

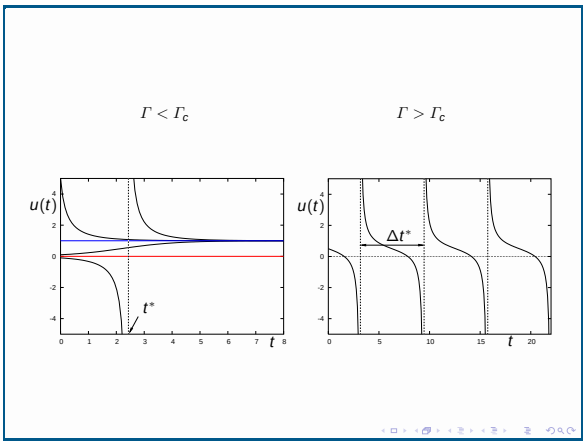
weitgehenden Verlust des Auftriebs und ist für zahlreiche Flugunfälle verantwortlich. Leider ist eine detaillierte Berechnung der damit verbundenen komplexen Strömungsvorgänge durch direkte numerische Simulation (DNS) auch heute nicht möglich.



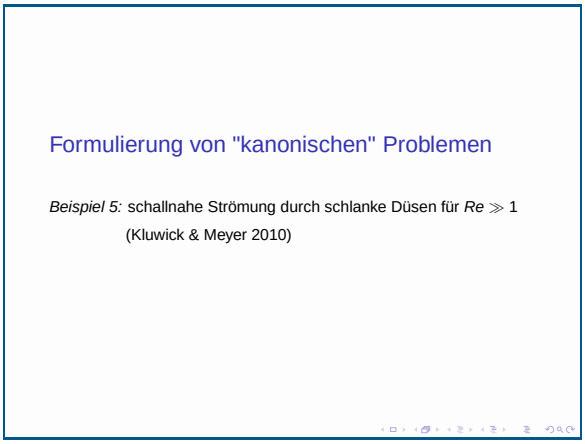


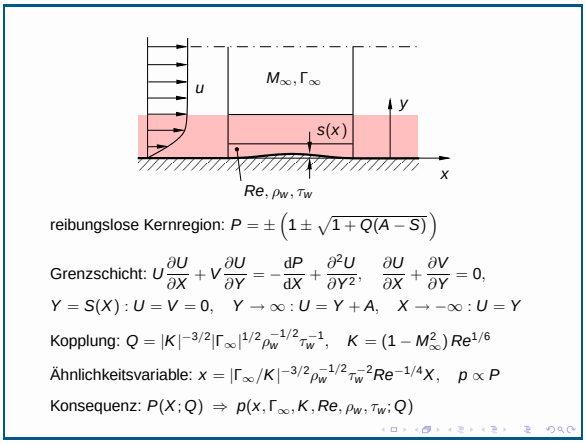
Um das Problem zu vereinfachen, liegt es nahe, analytische Methoden einzusetzen, die die Tatsache ausnutzen, dass bei den uns hier interessierenden Strömungen die Reynolds-Zahlen sehr groß sind. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass im Bereich der Ablöseblase die Strömungsvorgänge im Außengebiet von jenen in der Grenzschicht wesentlich stärker beeinflußt werden als im Rahmen der schwachen Wechselwirkung. Die konsequente Verfolgung dieser auf A. Ruban, [4], [5] und K. Stewartson et al., [7] zurückgehende Idee zeigt, dass die von L. Prandtl vorgeschlagene Zweischichtenstruktur der Strömung – Grenzschicht und Außenströmung – in dem die Ablöseblase einschließenden Gebiet starker Wechselwirkung durch eine als triple deck structure bezeichnete Dreischichtenstruktur, deren Abmessungen eindeutig durch die Reynolds-Zahl festgelegt sind, ersetzt werden muß. Man erhält dann diese Näherungsgleichung für die die Wandschubspannung τ_w charakterisierende Größe A als Funktion der Ortskoordinate X und der Zeit T. λ und γ sind positive Konstanten und Γ stellt ein Maß für die Differenz zwischen dem tatsächlichen und dem kritischen Wert des Anstellwinkels α dar. Im Falle stationärer Strömung kann diese Gleichung relativ einfach numerisch gelöst werden. Das Ergebnis ist auf der nächsten Folie skizziert, wobei $A(0)$ die Wandschubspannung im Ursprung des Koordinatensystems bedeutet. Mit steigendem Anstellwinkel Γ nimmt die Wandschubspannung ab, sie wird schließlich negativ, d.h. es kommt – wie im Experiment beobachtet – zu Strömungsablösung. Weiters erkennt man, dass für Werte von Γ, die kleiner sind als ein kritischer Wert Γ_c zwei verschiedene stationäre Strömungen existieren, charakterisiert durch den eben beschriebenen oberen Lösungsast und einen weiteren unteren Lösungsast, aber keine stationäre Strömung für $\Gamma > \Gamma_c$; das ist die früher erwähnte “Katastrophe”.
Zur Beschreibung der beim Überschreiten von Γ_c einsetzenden instationären Vorgänge ist auch die auf





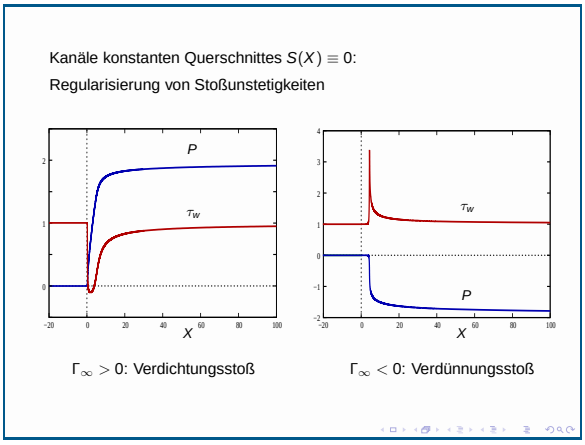
der vorigen Folie angegebene Gleichung noch zu kompliziert. Wir machen daher die weitere Vereinfachung, dass Γ nur wenig von Γ_c abweicht, [J20], [J17]. Die Differenz zwischen dem tatsächlichen Wert A der Wandschubspannung und jenem für $\Gamma = \Gamma_c$ kann dann in dieser Weise geschrieben werden, wobei $b(X)$ eine Eigenfunktion des Problems darstellt und $u(t)$ dieser gewöhnlichen Differentialgleichung genügt. Für $\Gamma < \Gamma_c$ hat sie im stationären Grenzfall zwei Lösungen, die den vorher identifizierten oberen und unteren Lösungsästen entsprechen; aber auch die geschlossene Lösung läßt sich ohne Schwierigkeiten angeben. Das daraus folgende Stabilitätsverhalten der Strömung ist auf der nächsten Folie zusammengefasst, wobei wir zunächst unterkritische Anstellwinkel betrachten: ist der anfänglich vorgeschriebene Wert u_0 größer als jener des unteren Astes $u = 0$, so strebt die Lösung mit zunehmender Zeit stetig dem oberen Ast $u = 1$ zu. Der obere bzw. untere Ast beschreiben daher stabile bzw. instabile Strömungszustände. Ist u_0 aber kleiner als 0, so ist die zeitliche Entwicklung der Strömung dramatischer, denn nun bildet sich nach endlicher Zeit ein singuläres Verhalten aus, das als die Bildung einer Wirbelstruktur interpretiert werden kann. Dennoch stellt sich für große Zeiten wieder der stabile stationäre Strömungszustand ein. Für überkritische Anstellwinkel $\Gamma > \Gamma_c$ existiert keine stationäre Grundströmung; es kommt zur periodischen Bildung von Wirbelstrukturen – in völliger Übereinstimmung mit dem zu Beginn erwähnten experimentellen Befund.

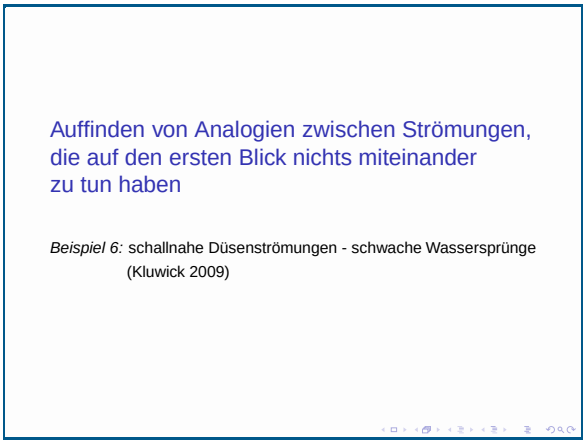




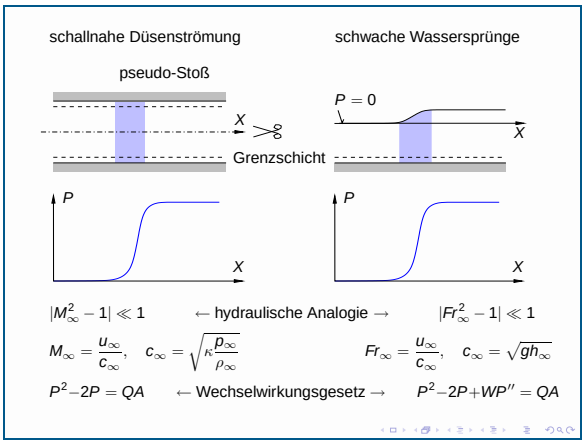
Starke Wechselwirkungen zwischen Grenzschichten und reibungslosen Außenströmungen sind nicht nur bei der Umströmung von Körpern von Bedeutung, sondern auch von Innenströmungen. Ich möchte die Diskussion eines solchen Beispiels zum Anlaß nehmen, um noch auf eine weitere Stärke analytischer Methoden hinzuweisen, nämlich die Formulierung von kanonischen Problemen. Um zu sehen, was damit gemeint ist, kehren wir zu den anfänglich behandelten stationären, schallnahen Strömungen in schlanken Düsen zurück, wobei jetzt aber auch der Einfluß innerer Reibung berücksichtigt werden soll. Aus Symmetriegründen genügt es, so wie in der Abbildung skizziert, die Strömungsvorgänge in der unteren Düsenhälfte zu betrachten. Für große Werte einer geeignet definierten Reynolds-Zahl bleibt der Einfluß der Reibung – so wie bei der eben besprochenen Profilumströmung – auf dünne wandnahe Grenzschichten beschränkt. Wie dort wechselwirken diese i.a. nur schwach mit dem benachbarten Gebiet reibungsloser Strömung, das jetzt den Kernbereich der Düse umfaßt. Reduziert man nun aber – dem heutigen Trend zur Minituarisierung technischer Geräte folgend – den engsten Querschnitt mehr und mehr, so führt die damit verbundene Zunahme der Bedeutung von Reibungseffekten schließlich zur Bildung eines Gebietes starker Wechselwirkung mit der uns schon bekannten triple deck Struktur, [J4], [J2]. Innerhalb der reibungslosen Kernregion gilt die schon früher hergeleitete Beziehung zwischen der Druckstörung P und der der Strömung zur Verfügung stehende Querschnittsfläche. Als Folge der reibungsbedingten Geschwindigkeitsreduktion in Wandnähe ist diese allerdings kleiner als der durch die Form der Wandkontur $s(x)$ definierte Düsenquerschnitt. Die Bestimmung der dies berücksichtigenden Querschnittskorrektur A erfordert daher die Berechnung der Strömungsverhältnisse innerhalb der Grenzschicht. Die dazu erforderlichen Gleichungen sind hier unten zusammengestellt. Dabei ist für uns nur die

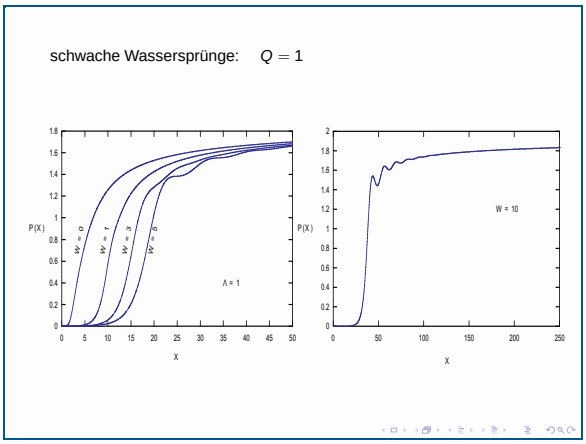
Beobachtung wesentlich, dass sie vollkommen parameterfrei sind, d.h. keine eine spezielle physikalische Situation festlegende Größen wie Anström-Mach-Zahl, Fundamentalableitung, Reynolds-Zahl, etc. explizit enthalten. Die Einflüsse dieser Größen sind bereits berücksichtigt durch den in dieser Beziehung auftretenden Kopplungsparameter Q sowie durch die Definition der mit Großbuchstaben gekennzeichneten Variablen. So hängt z.B. X in dieser Weise mit der "wirklichen" Ortskoordinate x zusammen. Entsprechendes gilt für die Druckstörung und die weiteren Feldgrößen. Eine Lösung dieses parameterfreien, kanonischen Problems beschreibt daher unendlich viele verschiedene physikalische Lösungen, die sich durch Variation von M_∞, Γ_∞, *Re*, etc. aus diesen Ähnlichkeitsvariablen ergeben, wie hier am Beispiel der Wanddruckverteilung angedeutet ist. Dies ist ein ganz wesentlicher Vorteil gegenüber einer rein numerischen Vorgangsweise, bei der diese Ähnlichkeitsgesetze unerkannt bleiben und daher jeder dieser Fälle getrennt behandelt werden müßte.





Zwei repräsentative Lösungen dieses kanonischen Problems sind auf der nächsten Folie gezeigt. Dabei wurde angenommen, dass der Kanal konstanten Querschnitt aufweist, sodass die früher zur Charakterisierung der Wandkontur eingeführte Funktion $S(X)$ identisch verschwindet. In einem solchen Kanal kann es im Fall rein reibungsloser Strömung zum Auftreten von Stoßunstetigkeiten kommen. Wie das linke Bild am Beispiel eines Verdichtungsstoßes in einem Medium mit positiver Fundamentalableitung, z.B. einem idealen Gas, zeigt, wird der in reibungslosen Gasen mögliche Drucksprung durch die Wirkung der nun berücksichtigten Wandgrenzschichten regularisiert, d.h. in einen kontinuierlichen Druckanstieg, einen "Pseudostoß", aufgelöst. Die damit verbundene Verzögerung der Strömung bewirkt eine Abnahme der Wandschubspannung τ_w und in diesem Bereich mit negativem τ_w die Bildung einer Ablöseblase, die – ähnlich wie bei der Vorderkantenablösung an Tragflügelprofilen – wegen ihrer Instabilität einen schädlichen Einfluß auf die Gesamtströmung haben kann und daher zu vermeiden ist.
Auch der in Gasen und Dämpfen mit negativer Fundamentalableitung Γ mögliche Verdünnungsstoß wird durch den Reibungseinfluß geglättet, wobei die mit der Druckabnahme verbundene Beschleunigung des Gases nun ein Ansteigen der Wandschubspannung zur Folge hat; es besteht daher überhaupt keine Ablösegefahr. Dies könnte bei der Entwicklung von Turbinen für Niedertemperaturdampfprozesse, die Erdwärme oder industrielle Abwärme benutzen, von Vorteil sein.
Damit möchte ich meine Ausführungen über Kanalströmungen abschließen, die gewonnenen Ergebnisse aber dazu benutzen, um einen relativ unbeachteten Aspekt analytischer Methoden zu beleuchten: das Auffinden von Analogien zwischen Strömungen, die auf den ersten Blick nichts miteinander zu tun haben. Um zu sehen, was damit gemeint ist, führen wir ein kleines Gedankenexperiment durch.
Dazu schneiden wir, wie auf der nächsten Folie angedeutet, den Kanal entlang der Mittellinie auf und ersetzen das bisher betrachtete gasförmige Medium durch eine inkompressible Flüssigkeit, [J7]. Dabei bleiben wegen der hydraulischen Analogie zwischen Gas- und Flachwasserströmungen alle bisher hergeleiteten Beziehungen erhalten, wenn wir die Mach-Zahl durch die Froude-Zahl ersetzen, wobei c_0 die sogenannte Grundwellengeschwindigkeit bedeutet. Einen wichtigen neuen Aspekt aber gibt es





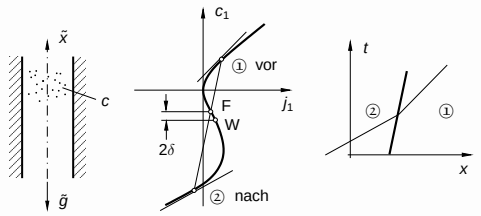
schon. Während im Falle der Kanalströmung die Druckverteilungen auf den Wänden und der Kanalachse übereinstimmen, ist im Falle der Flachwasserströmung der Druck an der freien Oberfläche konstant und somit das Verschwinden der Druckstörungen zu fordern. Da in der Flüssigkeitsschicht aber nahezu hydrostatische Druckverteilung herrscht, ist diese Bedingung einfach dadurch zu erfüllen, dass wir die freie Oberfläche um einen Betrag proportional zur Druckstörung an der Wand anheben. Wir erhalten damit ganz zwanglos die Beschreibung eines Phänomens, das auf den ersten Blick mit schallnahen Kanalströmungen überhaupt nichts zu tun hat, das wir aber durch die Untersuchung von Rollwellen (Beispiel 2) bereits kennen, den Wassersprung – jetzt allerdings in laminarer Form.Bisher blieb der Einfluß der Oberflächenspannung außer Betracht; aber auch er läßt sich nun auf einfache Weise berücksichtigen. Gemäß der Laplaceschen Formel ist der Drucksprung über die freie Oberfläche hinweg proportional zu ihrer Krümmung. Da deren Form, wie wir gesehen haben, bis auf einen konstanten Faktor, durch die Wanddruckverteilung gegeben ist, führt dies im Wechselwirkungsgesetz zum Auftreten eines zur zweiten Ableitung von P proportionalen Zusatzterms. Die dimensionslose Konstante W charakterisiert dann die relative Bedeutung von Reibungs- und Oberflächenspannungseffekten (aber auch, wie die genaue Rechnung zeigt, den Einfluß der mit der Anhebung der freien Oberfläche verbundenen Stromlinienkrümmung und der daraus resultierenden Abweichungen von der rein hydrostatischen Druckverteilung). Die mit diesem Zusatzterm verbundenen Modifikationen der bisher diskutierten Ergebnisse sind auf der nächsten Folie für einige repräsentative Beispiele gezeigt. Für kleine Werte von W steigt der Wanddruck – wie bei einem Pseudostoß – monoton auf den Endwert weit stromabwärts vom Wassersprung an. Steigende Werte von W bewirken eine zunehmende Welligkeit der Druckverteilung und damit auch des Verlaufes der freien Oberfläche, die für hinreichend große W schließlich oszillierenden Charakter aufweist. Zunehmendes W beschreibt daher den Übergang vom monotonen zum oszillierenden Wassersprung. Interessanterweise eignet sich die hier skizzierte Methode zur Beschreibung von Wassersprüngen in einzelnen Flüssigkeitsschichten auch zur Erfassung von Wellenphänomenen, die an der Grenzfläche von zwei übereinandergeschichteten Medien unterschiedlicher Dichte auftreten können. Eine solche Anordnung wird häufig als das wohl einfachste Modell einer geschichteten Atmosphäre verwendet und die nun möglichen internen Wassersprünge sind eng verwandt den sogenannten Leewellen, die hinter langgestreckten Hügeln oder Gebirgen auftreten und die von Segelfliegern z.B. in der Sierra Nevada ausgenützt werden, um in Höhen von über 14km vorzustoßen. Unter günstigen Bedingungen werden diese Welligkeiten als streifen- oder linsenförmige Wolkenmuster sichtbar, die nach dem Schäfer Gottlieb Matz, der sie im Riesengebirge beobachtete, als Moazagotln bezeichnet werden.
Eine genauere Analyse der auf der vorigen Folie angegebenen Beziehungen ergibt, dass in ihnen ein – unseren bisherigen Überlegungen widersprechendes – Phänomen steckt, das Herrn Cox und mir lange Zeit Kopfzerbrechen bereitet hat. Dies führt mich zu einer weiteren Stärke analytischer Methoden: dass man mit ihrer Hilfe auch in Situationen, die nicht den verbreiteten Vorstellungen von akademischer Tätigkeit entsprechen, wie etwa das Warten in einer Bushaltestelle, etwas Neues entdecken kann.

Alto-/Cirrocumulus-Lenticularis,"Moazagotl" Lee-Wolken

weil man beim Warten auf den Bus etwas Neues entdecken kann...

Beispiel 7: Stöße in Suspensionen von Teilchen in Flüssigkeiten (Cox & Kluwick 2001)

Um das eben erwähnte neue Phänomen schneller zu verstehen, diskutiere ich es anhand der einfacher zu behandelnden Wellenausbreitungsvorgängen in Suspensionen, [J24]. Die Mischung aus Flüssigkeit und starrer, kugelförmiger Teilchen befinde sich in einem vertikalen Rohr und die Geschwindigkeit der Flüssigkeit sei so gewählt, dass die Teilchen im ungestörten Zustand homogen verteilt sind und ruhen: die Volumskonzentration der Teilchen c_0 ist dann konstant. Stören wir diesen Grundzustand, so kommt es zur Bildung von Konzentrationswellen und die damit verbundenen Abweichungen der Teilchenkonzentration c_1 vom ungestörten Wert c_0 werden durch diese Gleichung beschrieben. Die Terme auf der rechten Seite haben dissipativen bzw. dispersiven Charakter und ihre Intensität wird durch die Konstanten μ und γ festgelegt. Von früher wissen wir, dass diese Gleichung mit verschwindender rechter Seite die Entstehung von Stoßunstetigkeiten zuläßt und wir nähern uns diesem Grenzfall, indem wir die Konstanten μ und γ gegen null streben lassen, wobei wir noch zusätzlich fordern, dass μ schneller verschwindet als γ.

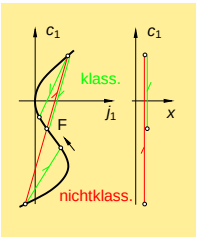


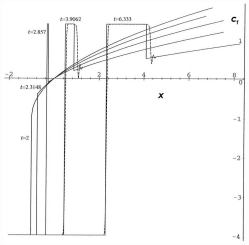
$c = c_0 + \varepsilon c_1$ ... Volumenkonzentration der Teilchen

$$\frac{\partial c_1}{\partial t} + \frac{\partial j_1}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 c_1}{\partial x^2} + \gamma \frac{\partial^3 c_1}{\partial x^3}, \qquad j_1 = \frac{c_1^2}{2} + \frac{c_1^3}{6}$$

nichtklassische Stöße: $\mu \ll 1, \gamma \ll 1: \quad \frac{\mu}{\gamma^2} = \delta$

nichtklassische Stöße entstehen paarweise:



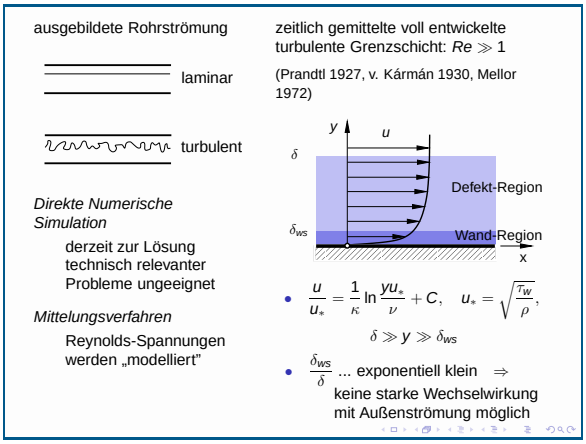


numerische Lösung: $\mu \to \mu + \mu_n \ll 1, \quad \gamma \to \gamma + \gamma_n \ll 1,$

$$\frac{\mu + \mu_n}{\gamma + \gamma_n} \ll 1$$

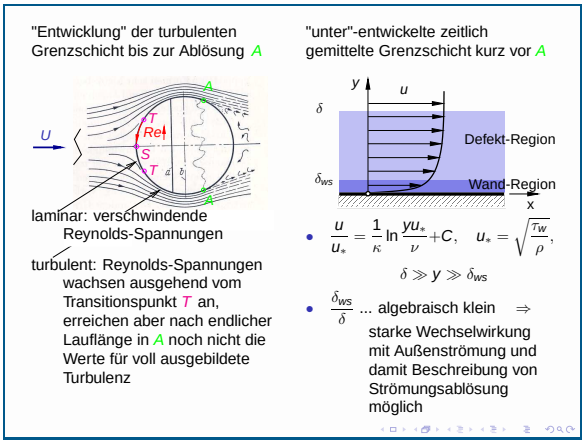
Man erhält dann das unerwartete Ergebnis, dass Stöße, deren Rayleigh-Geraden die Stoßpolare schneiden, zulässig sind. Und zwar sind alle Stöße zulässig, deren Rayleigh-Geraden durch den Fixpunkt F gehen, trotzdem sie die früher formulierte, einleuchtende Bedingung, dass Wellen von beiden Seiten auf sie zulaufen müssen, nicht erfüllen. Wie kommen solche “nichtklassischen” Stöße aber dann überhaupt zustande? Diese Frage hat Ted Cox und mich lange beschäftigt, bevor uns dann beim Warten auf einen Dubliner Bus die Lösung des Problems klar wurde: allein kann ein solcher nichtklassischer Stoß tatsächlich nicht entstehen, [J21]. Er benötigt dazu, wie auf der nächsten Folie gezeigt, einen klassischen Stoß als “Geburtshelfer”, der seine zu große Amplitude sofort auf den Wert im Schnittpunkt seiner Rayleigh-Geraden mit der Stoßpolaren reduziert, sodaß die Kombination beider, sich zunächst mit gleicher Geschwindigkeit bewegenden Stöße das früher formulierte Entstehungskriterium erfüllt. Ein Beispiel für das Auftreten dieses ungewöhnlichen Phänomens ist im Bild rechts zu sehen, das die Entwicklung eines klassischen Stoßes zeigt, der – wie durch den Pfeil im Stoßpolarendiagramm angedeutet

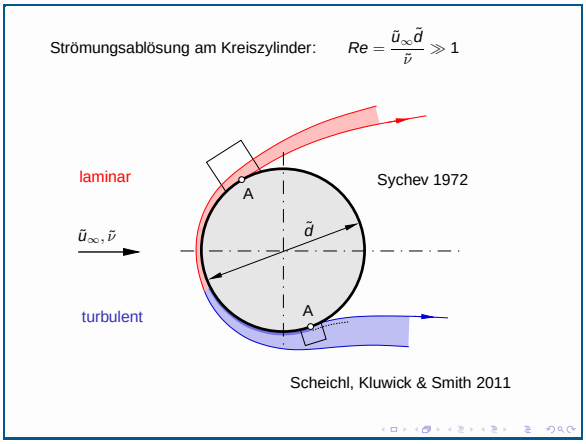
– in ein Gebiet steigender Teilchenkonzentration läuft. Die Zunahme der Teilchenkonzentration vor dem Stoß bewirkt zunächst ein stetiges Anwachsen der Stoßstärke bis die kritische Amplitude im Fixpunkt F erreicht wird. Nun kommt es schlagartig zur Bildung eines nichtklassischen Stoßes mit dem unmittelbar davorliegenden klassischen Geburtshelferstoß und damit zum Entstehen einer aus dem Wellenprofil herausschießenden Nadel. Auf das weitere Ansteigen von c_1 vor dem Stoßpaar kann der nichtklassische Partner nicht reagieren, da seine Stärke durch die Bedingung, dass die ihm zugeordnete Rayleigh-Gerade durch F gehen muß, fixiert ist. Also muß sich der klassische Stoß anpassen; er wird schwächer, dabei schneller und läuft nach vorne davon.
Die numerische Bestätigung dieser analytischen Vorhersagen erfordert einige Sorgfalt, denn die dazu erforderliche Diskretisierung der Wellengleichung für c_1 bedingt kleine Abweichungen von den tatsächlichen, physikalisch begründeten Werten der die Stärke dissipativer bzw. dispersiver Effekte charakterisierender Konstanten μ und γ. Wenn aber dafür gesorgt wird, dass die von der Theorie geforderten Größenordnungsrelationen auch nach der Diskretisierung erfüllt sind, so stehen die hier strichliert eingetragenen numerischen und die analytischen Ergebnisse, auch was die mit dem Entstehen des nichtklassischen Stoßes verbundenen Nadel anlangt, in ausgezeichneter Übereinstimmung. Wie von der früheren Diskussion von Wassersprüngen zu erwarten war, bewirken kleine aber endliche Werte von μ und γ die Regularisierung von Stoßunstetigkeiten und die für dispersive Systeme charakteristischen Oszillationen.



Bei den bisher besprochenen Strömungen handelt es sich mit einer Ausnahme um laminare Strömungen. Die letzten Folien sollen nun turbulenten Strömungen gewidmet sein und insbesondere der Rolle analytischer Methoden bei der Berechnung von modellunabhängigen Eigenschaften solcher Strömungen.
Laminare Strömungen sind dadurch ausgezeichnet, dass Fluidteilchen wie in Schichten übereinandergleiten, sodass sie auch bei komplexen Geometrien einen relativ hohen Grad von Ordnung aufweisen. Turbulente Strömungen, die in der Technik die wichtigere Rolle spielen, sind wesentlich komplizierter. Dies ist bereits an diesem Bild einer einfachen Rohrströmung, das die Bewegung von mit Farbe markierten Fluidteilchen zeigt, deutlich zu erkennen. Die Berechnung technisch relevanter Strömungsformen mithilfe von direkter numerischer Simulation der Navier–Stokes-Gleichungen ist gegenwärtig, aber auch in der überschaubaren Zukunft, völlig hoffnungslos. Bestehende numerische Verfahren beruhen daher meist auf einer vollständigen oder teilweisen zeitlichen Mittelung der instationären Navier–Stokes-Gleichungen, wobei die durch den Mittelungsprozeß entstehenden Reynolds-Spannungen, wie man sagt, modelliert werden, d.h. durch mehr oder weniger plausible Hypothesen auf die zeitliche gemittelten Feldgrößen zurückgeführt werden. Was können nun analytische Methoden in einer solchen – wie der Strömungsmechaniker mit einer gewissen Demut zugeben muß – sehr unbefriedigenden Situation leisten? Durchaus einiges, denn nur sie können z.B. zur Klärung der eingangs gestellten Frage beitragen, ob es modellunabhängige, d.h. genuine Eigenschaften von zeitlich gemittelten turbulenten Strömungen gibt. Dass diese Frage mit einem klaren *ja* zu beantworten ist, wenn man es mit anliegenden Strömungen bei großen Reynolds-Zahlen zu tun hat, ist durch Pionierarbeiten von Ludwig Prandtl [3] und Theodore

von Kármán [11] seit langem bekannt, auch wenn die strenge, formale Begründung dafür erst wesentlich später gelang, [1]. Die wesentlichen Ergebnisse, die in exzellenter Übereinstimmung mit dem experimentellen Befund stehen, sind hier zusammengefaßt: im Großteil der dünnen turbulenten Grenzschicht, der Defektregion, dominieren Reynolds-Spannungen über innere, viskose Reibungsspannungen und die Geschwindigkeit u weicht nur wenig vom Wert in der Außenströmung ab. Innere Reibung ist nur in einer, im Vergleich zur Grenzschichtdicke dünnen Wandregion von Bedeutung. Beim Übergang von der Wand- in die Defektregion weist die Geschwindigkeitsverteilung einen universellen, nur von zwei Konstanten κ und C abhängigen, Verlauf auf.





Alle Versuche, diese Strömungsstruktur so zu verallgemeinern, dass sie auch Strömungsablösung zu beschreiben vermag, sind bisher gescheitert. Als Haupthindernis hat sich dabei die geringe, (exponentiell kleine), Dicke der Wandschicht erwiesen, deren Verdrängungswirkung nicht ausreicht, um die Druckverteilung in der Defektregion aber auch außerhalb davon durch starke Wechselwirkung an den Ablöseprozeß anzupassen. Die Auflösung dieses scheinbar unüberwindlichen Hindernisses liegt, wie wir seit etwa zwei Jahren vermuten, darin, dass man nicht – wie in allen bisher durchgeführten Bemühungen – nur die turbulente Grenzschicht in der unmittelbaren Umgebung des Ablösepunktes betrachtet, sondern die gesamte Grenzschichtentwicklung vom Staupunkt bis zum Ablösepunkt mit in die Betrachtung einbezieht, [J10]. Denn diese Entwicklung läuft ja folgendermaßen ab: in der Nähe des Staupunktes S ist die Strömung laminar und die Reynolds-Spannungen verschwinden. Schließlich kommt es durch Stabilitätsverlust zum Umschlag von laminarer zu turbulenter Strömung und mit zunehmendem Abstand vom Staupunkt wachsen die Reynolds-Spannungen an, um den Endwerten im Zustand einer voll ausgebildeten turbulenten Grenzschicht zuzustreben. Dieser wird aber auf einem Körper endlicher Länge nie vollständig erreicht. Dennoch weist die Grenzschicht auch in diesem Fall “unterentwickelter” Turbulenz eine modellunabhängige Struktur bestehend aus Defekt- und Wandregion auf und wieder gilt im Übergangsbereich die universelle logarithmische Geschwindigkeitsverteilung. Der entscheidende Unterschied zu früher aber ist der folgende: die Wandregion, in der innere Reibung von Bedeutung ist, ist zwar wieder dünn im Vergleich zur Grenzschichtdicke, aber nur algebraisch und nicht exponentiell. Die damit verbundene etwas stärkere Verdrängungswirkung reicht nun, wie wir seit kurzem wissen aus, um im Rahmen einer Theorie starker Wechselwirkung eine selbstkonsistente Beschreibung des Grenzschichtablösevorganges zu ermöglichen. Dies führt zur Abbildung auf der letzten Folie, auf dem die Strömungsablösung am Kreiszylinder für laminare und turbulente Grenzschichten skizziert ist. Im Falle laminarer Strömung löst die Grenzschicht bereits auf der Vorderseite des Zylinders ab. Die Beschreibung des Ablösevorganges führt auf die schon mehrmals erwähnte triple deck Struktur, mit der die dabei wesentliche starke Wechselwirkung zwischen Grenzschicht und Außenströmung erfaßt wird, [8], [6]. Eine turbulente Grenzschicht löst erst auf der Rückseite des Zylinders ab. Die selbstkonsistente Beschreibung erfordert wieder die Berücksichtigung starker Wechselwirkung, nun aber primär zwischen der reibungsbehafteten Wandschicht und der Reynolds-spannungsdominierten Defektregion, [J3]. Im Gegensatz zum

Fall laminarer Strömung reicht die triple deck Region daher nicht in das Gebiet der Außenströmung hinein sondern bleibt in der Grenzschicht verborgen. Wir glauben, dass damit, wie es unser Koautor Frank Smith ausgedrückt hat, the mystery of turbulent separation weitgehend gelöst ist und sich so Anwendungsmöglichkeiten im technischen Bereich eröffnen, die der theoretischen Strömungsmechanik bisher verschlossen waren. Interessanterweise sind aber auch Umströmungen von geometrisch einfachen Körpern von wesentlich größerer Bedeutung, als ich das erwartet hätte...

Strömungsmechanik des Jabulani: Schnappschuss aus einem ORF-Kommentar zur Fußball-WM in Südafrika 2010.

Damit bin ich am Ende meines Vortrages und es bleibt mir nur mehr zu danken, aber das ist heute vielleicht das Wichtigste. Danken möchte ich allen, die zum Gelingen dieser Feier beigetragen haben und allen, die mich in den vielen Jahren meiner Tätigkeit an der TU Wien begleitet und unterstützt haben. Sie haben es meinen Mitarbeitern und mir ermöglicht, (nahezu) ungestört wissenschaftlich zu arbeiten – und das ist ein großes Geschenk.

Literatur

1 Mellor, G.L.: The large Reynolds number, asymptotic theory of turbulent boundary layers. *Int. J. Engng Sci.* **10**, 1972, 851–873.

2 Prandtl, L.: Über Flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner Reibung. *Verh. III. Int. Mathem. Kongr. Heidelberg*, 1904, 484–491.

3 Prandtl, L.: Über die ausgebildete Turbulenz. *Verh. II. Int. Kongr. Techn. Mechanik*, 1927, 62–75.

4 Ruban, A.I.: Singular solution of boundary layer equations which can be extended continously through the point of zero surface friction. *Izv. Akad. Nauk SSSR: Mekh. Zhidk. Gaza* **6**, 1981, 42–52 (engl. Übersetzg. *Fluid Dyn.* **16** (6), 835–843).

5 Ruban, A.I.: Asymptotic theory of short separation regions on the leading edge of a slender airfoil. *Izv. Akad. Nauk SSSR: Mekh. Zhidk. Gaza* **1**, 1981, 42–51 (engl. Übersetzg. *Fluid Dyn.* **17** (1), 33–41).

6 Smith, F.T.: The laminar separation of an incompressible fluid streaming past a smooth surface. *Proc. Roy. Soc. Lond.* A **356**, 1977, 433–463.

7 Stewartson, K., Smith, F.T. & Kaups, K.: Marginal separation. *Stud. Appl. Maths* **67**, 1982, 45–61.

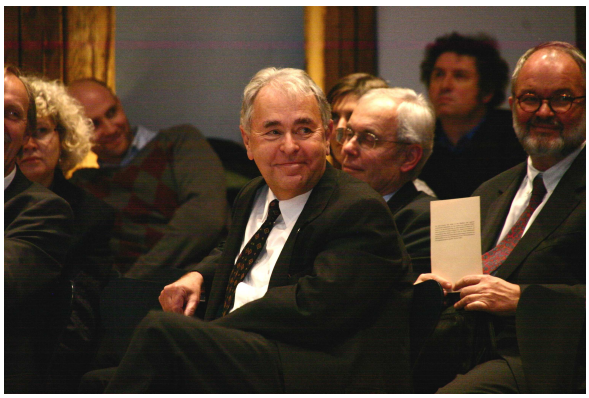
8 Sychev, V.V.: Concerning laminar separation. *Izv. Akad. Nauk SSSR: Mekh. Zhidk. Gaza* **3**, 1972, 47–59.

9 Thompson, P.A.: Liquid-vapor adiabatic phase changes and related phenomena. In: *Nonlinear Waves in Real Fluids*, Kluwick, A. (Ed.), Springer, 1991, 147–214.

10 Vicenti, W.G. & Kruger, Ch.H., Jr.: *Introduction to Physical Gas Dynamics*, John Wiley & Sons, Inc., 1967.

11 von Kármán, Th.: Mechanische Ähnlichkeit und Turbulenz. *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Fachgruppe I (Mathematik)* **5**, 1930, 58–76.

Ausgewählte Fotos vom Festkolloquium



Übergabe des Institutsmitarbeitergeschenkes symbolisiert durch einen von Kiki Kuhlmann handgefertigten Pinsel (Warengutschein der Fa. Boesner Künstlerbedarf über 555€).

Koncz-Ensemble

Von Enkelin Maria während der Festveranstaltung angefertigte Zeichnung (vergl. S. 26).

Laudatio anlässlich der Verleihung der Johann Joseph Ritter von Prechtl-Medaille der Technischen Universität Wien an Alfred Kluwick am 15. Juni 2011

von Hendrik C. Kuhlmann,
Institut für Strömungsmechanik und Wärmeübertragung, TU Wien

Foto: Herbert Steinrück

Sehr geehrte Magnifizenz,
Spektabilitäten,
sehr geehrte Preisträger,
insbesondere mein lieber Alfred Kluwick,
sehr geehrte Ehrengäste,
liebe Kollegen,
meine Damen und Herren,

Wir sind heute zusammengekommen, um einen Wissenschaftler zu ehren, dessen gesamtes berufliches Leben aufs engste mit der Technischen Universität Wien verbunden ist.

Alfred Kluwick wurde 1942 in Wien geboren und studierte Maschinenbau an der Technischen Hochschule Wien mit Abschluß Diplom im Jahre 1965. Bis auf diverse Auslandsaufenthalte, vor allem in den USA und Irland, ist er seiner Alma Mater treu geblieben. Seit letztem Wintersemester ist er Professor Emeritus.

Alfred Kluwick sagte einmal zu mir: “Erst mit der Thermodynamik, wie ich sie bei Oswatitsch gelernt habe, habe ich die Strömungsmechanik so richtig verstanden”. Die Lehrjahre bei Klaus Oswatitsch haben Alfred Kluwick sehr nachhaltig geprägt. Der Titel seiner Dissertation aus dem Jahre 1969 *Probleme der Störtheorie bei Wellenausbreitungsvorgängen* sowie seine Habilitationsschrift aus dem Jahre 1974 *Über gleichmäßig gültige Störtheorie und kumulative Effekte bei Wellenausbreitungsvorgängen* weisen auf zwei Themen hin, Störtheorie und Wellen, die ihn nicht mehr loslassen sollten.

Insbesondere die Störtheorie, oder die Methode der asymptotischen Entwicklung, wurde für Alfred Kluwick ein entscheidendes Werkzeug. Er hat diese Methode über die Jahre fortentwickelt und verfeinert und hat es in ihrer Anwendung zu einer großen Virtuosität gebracht. Die Methode diente auch als Brücke zur Mathematik. Sie war jedoch nicht Selbstzweck, sondern ein Mittel, um die Theorien der Strömungsmechanik weiterzuentwickeln. Hierbei standen zunächst Wellen, ob an Grenzflächen nicht-mischbarer Fluide oder interne Wellen, im Vordergrund. Eine besondere Herausforderung stellen hierbei die nichtlinearen Effekte und die sogenannten Realgaseffekte dar, mit denen sich Alfred Kluwick sehr eingehend befasst hat. Viele der damit verbundenen Phänomene hat er mit Hilfe der asymtotischen Methode erstmals erklären können.

Ein anderes wichtiges Arbeitsgebiet sind Grenzschichten, so wie sie bei der schnellen Umströmung von Körpern auftreten. Auf diesem Gebiet gilt sein Interesse nicht nur der einfachen Anpassung der Strömungen in den verschiedenen Schichten, sonderen auch der Wechselwirkung der Schichten untereinander. Dies stellt in einem gewissen Sinne die Kür im Bereich der asymptotischen Entwicklung dar. Die Grenzschichten weiten sich stromabwärts auf und können zur Ablösung der Strömung führen. Sowohl zur laminaren, wie auch zur turbulenten Strömungsablösung hat Alfred Kluwick bedeutende Beiträge geleistet. Insbesondere konnte er vor kurzem das über viele Jahrzehnte unverstandene Mysterium der späten Ablösung der turbulenten Strömung erstmals selbstkonsistent und modellunabhängig beschreiben, wobei eben diese wechselwirkenden Grenzschichten von zentraler Bedeutung für die Erklärung sind.
Ich habe nur zwei Forschungsbereiche von Alfred Kluwick angesprochen. Alle seiner stetig publizierten Arbeiten liegen seit Jahrzehnten auf internationalem Spitzenniveau. Hier macht es nicht die Masse, sondern die Klasse. Seine Arbeiten bewegen sich im Grenzbereich zwischen Mathematik, Physik und Ingenieurwissenschaften. Nicht zuletzt deshalb ist Alfred Kluwick auch über die Grenzen seines Fachs hinaus bekannt geworden. Seine Erfolge wurden durch verschiedene Auszeichnungen gewürdigt, von denen ich hier nur den Erwin-Schrödinger Preis der Akademie der Wissenschaften 1996 nennen möchte.
Es ist interessant anzumerken, dass sich auch schon Prechtl mit Strömungsvorgängen beschäftigt hat. Nach einem anfänglichen Aufsatz in den Annalen der Physik über Betrachtungen über den Strömungswiderstand publizierte dieser 1846 eine Monographie mit dem Titel *Untersuchungen über den Flug der Vögel*. Unvermittelt haben wir hier einen Bezug zu unserem Laureaten. Über 100 Jahre danach setzte sich Alfred Kluwick in einem Buch von Christian Hantschk über Johann Joseph Prechtl mit dessen damaligen Vorstellungen auseinander, [C10]. Darin würdigt er Prechtls Verdienste, das Phänomen des Vogelflugs konsequent auf der Grundlage der Mechanik klären zu wollen - was Prechtl damals allerdings noch nicht wirklich möglich gewesen ist.
Im wissenschaftlichen Diskurs kenne ich Alfred Kluwick vor allem aus unseren Seminaren. Mich hat stets sein Überblick über das gesamte Fachgebiet der Strömungsmechanik in allen ihren Zweigen beeindruckt. Zu paktisch jedem Thema konnte – und hat er – souverän entweder offene Fragen ausgeräumt oder inhaltliche Ergänzungen zu den Präsentation geliefert - nicht selten zur Überraschung der Vortragenden.
Alfred Kluwick übertrug seine Begeisterung für die Methode der asymptotischen Entwicklung auch auf viele seiner Schüler. Beispielhaft gilt vielleicht die Aussage von Stefan Braun: Die Mühe, die für den Erwerb des Rüstzeuges eines Asymptotikers erforderlich ist, hat sich dem “Geschmack” aufgeprägt: wer einmal gekostet hat, will mehr. Mit andern Worten: Er ist süchtig geworden. Für ihn hat die Methode eine derartige Bedeutung gewonnen, dass er eine eigene Spezies, die des Asymptotikers, kreiert, zu der er sich selbst zählt.
In der Strömungsmechanik sind häufig verschiedene physikalische Effekte zu einem komplexen Problem verwoben. Der Wert der von Alfred Kluwick kultivierten asymptotischen Methoden besteht vor allem darin, dass sich diese Effekte in gewissen Grenzfällen trennen lassen. Die verbleibenden Teilprobleme sind im günstigsten Fall analytisch lösbar und so einem Verständnis zugänglich. In seiner Abschiedsvorlesung hat Alfred Kluwick dies so ausgedrückt: Ein offensichtlicher Grund für die Anwendung analytischer Methoden ist das Bestreben, Strömungsvorgänge durch das Herausschälen der für ihr Auftreten maßgeblichen physikalischen Mechanismen zu verstehen. Es geht ihm also maßgeblich um das Verständnis. Dies ist der zentrale Punkt aller seiner Bestrebungen.
Und hier sind wir auch schon beim akademischen Lehrer Kluwick. Wie mir aus vielen Berichten bekannt ist, sind seine Vorlesungen Legende. Viele (vor allem die am meisten befähigten) Studenten haben davon sehr profitiert. Die souveräne Beherrschung von Kreide, Tafel und Schwamm zusammen mit einem karen, gestochenen Tafelbild waren und sind sein Markenzeichen. Als ich letztes Semester seine Vorlesung über Strömungslehre vertrat, musste ich von der Tafel doch wieder auf die Beamer-Projektion zurückgreifen, um auch nur annähernd den Stoff vermitteln zu können, den Alfred Kluwick standardmäßig darbot. Und auch in der Lehre verwendete Alfred Kluwick die Asymptotik. Diesmal wegen ihres hervorragenden didaktischen Werts, wenn es um das prinzipielle Verständnis geht. Als Beispiel sei hier nur die

Umströmung dünner Tragflügel genannt oder die schallnahe Strömung durch Laval-Düsen.
All diese schönen Dinge sind aber nicht umsonst zu haben. Stefan Braun spricht von “Mühen”. Alfred Kluwick nennt es im Titel seiner Abschiedsvorlesung etwas provozierend “Herumplagen”. Offenbar benötigt man die Mathematik und eine gewisse Leidensfähigkeit beim Hantieren mit länglichen Gleichungen. In diesem Zusammenhang ist es vielleicht interessant zu wissen, dass Johann Joseph Prechtl im Jahre 1815 seinen Studenten ein Jahr lang täglich 2 Stunden niedere, höhere und einen Theil der Angewandten Mathematik ins Stammbuch schrieb ...
Nach seiner Familie liebt Alfred Kluwick seine Wissenschaft wohl am meisten. Dabei geht es ihm stets um die Sache. Für ihn ist in der Wissenschaft kein Platz für Geheimniskrämerei, wie sein Freund Ted Cox vom University College Dublin sagt. Was ihn bewegt, ist die Suche nach der Wahrheit – bescheiden und unprätentiös. Es ist nicht seine Art, sich selbst zu produzieren oder andere mit erhobenem Zeigefinger zu belehren. Und diese Eigenschaft empfinden wir Mitmenschen als sehr wohltuend.
Obwohl ihm die Administration nicht besonders liegt, hat sich Alfred Kluwick schon kurz nach seiner Berufung 1986 zum ordentlichen Professor dennoch als Dekan in die Pflicht nehmen lassen. Ich selbst kenne ihn als Fakutätsratsvorsitzenden und als Institutsleiter. Seine Art, die administrativen Dinge auf ihren faktischen Kern zu beschränken ohne sich in ausschweifenden oder hypothetischen Diskussionen zu ergehen, hat ihm allgemein große Anerkennung eingebracht. Bei aller Knappheit war seine Leitung stets angemessen und gerecht. Seine Verdienste für die Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften wurden daher auch folgerichtig mit der Verleihung der Viktor-Kaplan-Medaille der Fakultät geehrt. Darüber hinaus hat er sich in vielen Organisationen engagiert, unter anderem als Mitglied des Kuratoriums des Forschungsfonds von 1995 bis 2000 oder als nunmehr langjähriger Mitherausgeber der Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Physik.
Prechtl stand Anfang des 19ten Jahrhunderts in einer Zeit des Aufbruchs und der großen Faszination für die Realienkunde. Durch seine Studien erwarb er sich Universalkenntnisse im gesamten Bereich der polytechnischen Wissenschaften. Durch den rapiden Fortschritt und die Auffächerung der Disziplinen findet man heutzutage keinen Universalgelehrten vom Schlage Alexander von Humboldts mehr, einem Zeitgenossen von Prechtl. Bezogen auf die Strömungsmechanik kommt Alfred Kluwick meiner Vorstellung eines Univeralgelehrten jedoch sehr nahe. Dazu muss man wissen, dass er auch über Lawinen, Suspensionen, Ozeanströmungen, Strömungen mit chemischen Reaktionen und biologischen Strömungen geforscht und gelehrt hat. Genauso wie für die genannten historischen Vorbilder befürchte ich nur, dass die Species Kluwicki eine Bedrohte ist. Seine vielfältigen musischen Begabungen und Aktivitäten, auf welche ich nicht eingehen kann, runden das Bild ab. Sie haben ihm sicher - wie auch seine Frau Christl - geholfen, stets mit Augenmaß zu handeln und die richtige Balance zwischen Wissenschaft und dem Rest der Welt zu finden.
Lieber Alfred, wir alle haben – und hier darf ich wohl für das ganze Auditorium sprechen – eine große Hochachtung vor Deiner wissenschaftlichen Leistung und Deinem Vorbild als Lehrer und als Mensch. Wir gratulieren Dir sehr herzlich zu der Johann Joseph Ritter von Prechtl-Medaille.

Dankesworte anlässlich der Verleihung der Johann Joseph Ritter von Prechtl-Medaille der Technischen Universität Wien am 15. Juni 2011

von Alfred Kluwick,
Institut für Strömungsmechanik und Wärmeübertragung, TU Wien

Foto: Herbert Steinrück

Magnifizenzen,
Herr Präsident,
Spektabilitäten,
Liebe Kollegen und Freunde,
natürlich freue ich mich riesig und möchte mich daher ganz herzlich bedanken – aber hier stocke ich schon – denn, bei wem soll ich mich bedanken? Natürlich beim Laudator, aber bei wem noch? Zwar fühlte ich schon seit Längerem, daß etwas in der Luft lag, aber Genaueres wußte ich nicht. Ich war daher völlig überrascht, als ich Ende März ein Schreiben von Magnifizenz Skalicky erhielt, in dem er mir mitteilte "Die TU Wien hat mit Beschluß des Rektorates den Wunsch begründet, Dir die JOHANN JOSEPH RITTER VON PRECHTL-MEDAILLE der Technischen Universität Wien zu verleihen".
Diese Überraschung habe ich auch dem Vizerektor für Lehre Prechtl – nomen est omen – gegenüber zum Ausdruck gebracht und seine Antwort werde ich nie vergessen. Er sagte: "Aber Alfred, das ist doch gut so und schön, man hat halt so seine Freunde".
Also danke ich jetzt aus ganzem Herzen den Freunden, die ich halt so habe.
Ganz besonders danken muß ich auch meiner Familie für die jahrzehntelange liebevolle Unterstützung.
Danken will ich aber auch meinen Lehrern, und bei der Vorbereitung zu dieser akademischen Feier ist mir wieder einmal bewußt geworden, welches Glück ich mit ihnen hatte – in der Volksschule, der Mittelschule, dieser Hohen Schule, aber auch im privaten Bereich. Und ich freue mich daher sehr, daß mein Orgellehrer, der derzeitige Direktor des Diözesankonservatoriums für Kirchenmusik heute hier anwesend ist.
Drei akademische Lehrer haben mich besonders beeindruckt. Am Beginn meines Studiums Walter Wunderlich, ein brillanter Darstellender Geometer und brillanter Vortragender. Er hat uns – im wahrsten Sinne des Wortes – die Augen für bewußtes Sehen geöffnet. Ich bedauere es daher, daß Darstellende Geometrie heute nicht mehr zum Fächerkanon des Maschinenbaustudiums gehört. Denn jemand, der nicht in der Lage ist, einen dreidimensionalen Körper im Kopf rotieren zu lassen, um ihn sich von verschiedenen Seiten ansehen zu können, wird wohl schwerlich eine gute Konstrukteurin, ein guter Konstrukteur werden.
Von Walter Wunderlich haben wir aber auch einfachere Dinge gelernt. Zum Beispiel, wie man freihändig einen Kreis zeichnet. "Beginnen Sie nie," sagte er, "mit dem Mittelpunkt – das konnte Leonardo da Vinci. Wir andere müssen mit der Peripherie, dem Kreisumfang beginnen und dann erst den Mittelpunkt festlegen." Das funktioniert tatsächlich, probieren Sie es aus.

Viel zu verdanken habe ich auch Heinz Parkus, Professor für Mechanik. Er hat ein fesselndes Buch “Mechanik fester Körper” geschrieben, das 1960, dem Jahr meines Studienbeginns, erschien. Es ist ein relativ dünnes Buch, das aber durch hohe Abstraktion und Präzision der Sprache alle wesentlichen Aspekte der Festkörpermechanik in einheitlicher Form enthält.
Auch von Heinz Parkus ist mir ein Satz in Erinnerung geblieben. Er war Koreferent bei meinem Rigorosum und als ich bei der Beantwortung einer seiner Fragen mit “eigentlich” begann, unterbrach er mich sofort mit den Worten “Herr Kluwick, ja oder nein?”. Und diese Forderung nach sprachlicher Präzision ist mir – wie nun auch meine Dissertanten wissen – bis heute wichtig.
Schließlich will ich, und muß ich, auch meinem verehrten Lehrer Klaus Oswatisch danken. Klaus Oswatitsch studierte in Graz Physik, unter anderem bei Erwin Schrödinger. Anschließend ging er nach Göttingen zu Ludwig Prandtl, dem Begründer der modernen Strömungslehre, wo er die stürmische Entwicklung der Gasdynamik von Anfang an miterlebte und ganz wesentlich mitgestaltete. Dies führte 1952 zu dem wundervollen Buch “Gasdynamik”, das für mich zu einer Art wissenschaftlicher Bibel wurde. Offensichtlich gilt dies auch für meinen Freund Wilhelm Schneider, denn wir stellten später fest, daß wir uns viele Seiten dieses Buches recht genau ins Gedächtnis rufen konnten.
Im Gegensatz zu Walter Wunderlich war Klaus Oswatitsch kein brillanter Vortragender. Er stockte des öfteren und man mußte lernen, abgebrochene Sätze zu ergänzen. Wenn man aber diese Schwierigkeit gemeistert hatte, dann waren seine Vorlesungen einzigartige Erlebnisse, da man “aus erster Hand” das Entstehen physikalischer Theorien über strömende Medien miterleben konnte – nein, miterleben durfte. Das hat mich schließlich dazu bewogen, es mit der Strömungslehre zu versuchen.
Als ich ihn Jahre später einmal fragte, ober er mir für meine wissenschaftliche Arbeit einen Rat geben könne, antwortete er spontan “man muß dem Zufall eine Chance geben”. Erst bei der Vorbereitung zu dieser Dankesrede ist mir aufgefallen, wie eng dieser Rat mit der Wunderlich’schen Anweisung zur Kreiskonstruktion zusammenhängt: zuerst die Peripherie, das Umfeld ausloten und dann, wenn der Mittelpunkt erkannt ist, auf diesen energisch zugehen.
Ich denke heute aber noch aus einem anderen Grund an Klaus Oswatisch. Ihm wurde vor 21 Jahren, im Jahr 1990, die Prechtl-Medaille verliehen. Ich habe ihn nur noch einmal, anläßlich der Feier seines achtzigsten Geburtstages, ähnlich gerührt gesehen. Nicht einmal in meinen kühnsten Träumen hätte ich mir damals vorstellen können, daß mir einmal, als einem seiner Nachfolger die gleiche Auszeichnung zuteil werden würde. Dafür danke ich nochmals den Freunden, die ich halt so habe, aus ganzem Herzen. Auf Freunde hat man, wie auf vieles im Leben, keinen Anspruch – sie sind Geschenk. Und dies kommt, meine ich, in der Prechtl’schen Formulierung, “Freunde, die man halt so hat”, ganz wunderbar zum Ausdruck.

Schriften- und Vortragsverzeichnis von Alfred Kluwick

Bucheditorenschaft

B1 Kluwick, A. (Ed.): *Recent advances in boundary layer theory.* Springer, Wien-New York, 1998, ISBN 3-211-83136-3, 330 Seiten.

B2 Kluwick, A. (Ed.): *Nonlinear waves in real fluids.* Springer, Wien New York, 1991, ISBN 3-211-82277-1, 334 Seiten.

Wissenschaftliche Journale

J1 Meyer, G. & Kluwick, A.: On the stability of pseudo-shocks in transonic flows from an asymptotic viewpoint. *J. Mech. Eng. Sci.*, in press.

J2 Kluwick, A. & Meyer, G.: Viscous–inviscid interactions in transonic flows through slender nozzles. *J. Fluid Mech.* **672**, 2011, 487–520.

J3 Scheichl, B., Kluwick, A. & Smith, F.T.: Break-away separation for high turbulence intensity and large Reynolds number. *J. Fluid Mech.* **670**, 2011, 260–300.

J4 Kluwick, A. & Meyer, G.: Shock regularization in dense gases by viscous-inviscid interactions. *J. Fluid Mech.* **644**, 2010, 473-–507.

J5 Smith, F.T., Scheichl, B. & Kluwick, A.: On turbulent separation (James Lighthill Memorial Paper 2010). *J. Eng. Math.* **68** (3-4) (eingeladen), 2010, 373–400.

J6 Kluwick, A., Exner, A., Cox, E.A. & Grinschgl, Ch.: On the internal structure of weakly nonlinear bores in laminar high Reynolds number flow. *Acta Mech.* **210**, 2010, 135–157.

J7 Kluwick, A.: Transonic flows in narrow channels. *J. Therm. Sci.* **18** (2) (eingeladen), 2009, 99–108.

J8 Kluwick, A., Braun, S. & Cox, E.A.: Near critical phenomena in laminar boundary layers. *J. Fluid Struct.* **24** (8) (eingeladen), 2008, 1185–1193.

J9 Scheichl, B. & Kluwick, A.: Asymptotic theory of bluff-body separation: a novel shear-layer scaling deduced from an investigation of the unsteady motion. *J. Fluid Struct.* **24** (8), 2008, 1326–1338.

J10 Scheichl, B., Kluwick, A. & Alletto, M.: “How turbulent” is the boundary layer separating from a bluff body for arbitrarily large Reynolds numbers?. *Acta Mech.* **201** (1-4) (eingeladen), 2008, 131-–151.

J11 Scheichl, S., Braun, S. & Kluwick, A.: On a similarity solution in the theory of unsteady marginal separation. *Acta Mech.* **201** (1-4) (eingeladen), 2008, 153–170.

J12 Scheichl, S., Kluwick, A. & Cox, E.A.: On the admissibility of hydraulic jumps in two-layer fluids. *Acta Mech.* **195**, 2008, 103–116.

J13 Kluwick, A., Scheichl, S. & Cox, E.A.: Near-critical hydraulic flows in two-layer fluids. *J. Fluid Mech.* **575**, 2007, 187–219.

J14 Scheichl, B. & Kluwick, A.: On turbulent marginal boundary layer separation: how the half-power law supersedes the logarithmic law of the wall. *Int. J. Comp. Sci. Math.* **1** (2/3/4) (Special Issue on the BAIL 2006 Conference), 2007, 343–359.

J15 Scheichl, B. & Kluwick, A.: Turbulent Marginal Separation and the Turbulent Goldstein Problem. *AIAA J.* **45** (1), 2007, 20–36.

J16 Braun, S. & Kluwick, A.: Blow-up and control of marginally separated boundary layers. *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.* A **363** (1830) (eingeladen), 2005, 1057–1067.

J17 Braun, S. & Kluwick, A.: Unsteady three-dimensional marginal separation caused by surface mounted obstacles and/or local suction. *J. Fluid Mech.* **514**, 2004, 121–152.

J18 Kluwick, A.: Internal flows of dense gases. *Acta Mech.* **169**, (2004), 123–143.

J19 Braun, S. & Kluwick, A.: Analysis of a bifurcation problem in marginally separated laminar wall jets and boundary layers. *Acta Mech.*, **161** (3-4), 2003, 195–211.

J20 Braun, S. & Kluwick, A.: The effect of three-dimensional obstacles on marginally separated laminar boundary layer flows. *J. Fluid Mech.* **460**, 2002, 57–82.

J21 Cox, E.A. & Kluwick, A.: Waves and nonclassical shocks in a scalar conservation law with non-convex flux. *Z. Angew. Math. Phys.* **52**, 2001, 924–949.

J22 Kluwick, A. & Exner, A.: On thermally induced separation of free-convection flows. *Phys. Fluids* **13**, 2001, 1691-–1703.

J23 Kluwick, A.: Marginally separated flows in dilute and dense gases. *Philos. T. R. Soc. Lond.* A **358** (eingeladen), 2000, 3169–3192.

J24 Kluwick, A., Cox, E.A. & Scheichl, S.: Non-classical kinematic shocks in suspensions of particles in fluids. *Acta Mech.* **144**, 2000, 197–210.

J25 Kluwick, A. & Scheichl, S.: Asymptotic analysis of surface waves in continuous strip casting processes. *Fluid Dyn. Res.* **27**, 2000, 163–181.

J26 Sampl, P., Zwinger, T. & Kluwick, A.: SAMOS – Simulation von Trockenschneelawinen. *Wildbach- und Lawinenverbau* **63**, 1999, 7–21.

J27 Bodonyi, R.J. & Kluwick A.: Transonic Trailing-Edge Flow. *Q. J. Mech. Appl. Math.* **51**, 1998, 297–310.

J28 Kluwick, A. & Cox, E.A.: Nonlinear waves in materials with mixed nonlinearity. *Wave Motion* **27**, 1998, 23–41.

J29 Kluwick, A. & Gittler, Ph.: Viscous-inviscid interaction on a slender axisymmetric trailing tip flow. *Proc. Roy. Soc. Lond.* A **453**, 1997, 963–982.

J30 Kluwick, A. & Scheichl, S.: On the evolution of unsteady disturbances in continuous strip casting processes. *Phys. Fluids* **9** (12), 1997, 3697–3706.

J31 Braun, S., Kluwick, A. & Cramer, M.S.: The effect of thermal expansion on nonlinear first and second sound in the whole temperature region of He II. *Phys. Fluids* **8** (9), 1996, 2513–2526.

J32 Kluwick, A. & Cox, E.A.: Resonant oscillations in dense gases. *J. Fluid Mech.* **318**, 1996, 251–271.

J33 Kluwick, A. & Scheichl, S.: Unsteady transonic nozzle flows in dense gases. *J. Fluid Mech.* **310**, 1996, 113–137.

J34 Kluwick, A.: Book review: “Propagation of a curved shock and nonlinear ray theory” by P. Prasad. *J. Fluid Mech.* **276**, 1994 (eingeladen), 404–405.

J35 Kluwick, A.: Nachruf für Klaus Oswatitsch. *ZAMM* **74**, 1994, 223-–224.

J36 Cramer, M.S. & Kluwick, A.: The effect of thermal expension on nonlinear fourth sound. *Phys. Fluids* A **5**, 1993, 1239-–1245.

J37 Kluwick, A.: Interacting laminar boundary layers of dense gases. *Acta Mech.* **4**, 1993, 335–349.

J38 Kluwick, A.: Transonic nozzle flow of dense gases. *J. Fluid Mech.* **247**, 1993, 661–688.

J39 Kluwick, A. & Cox, E.A.: Propagation of weakly nonlinear waves in stratified media having mixed nonlinearity. *J. Fluid Mech.* **244**, 1992, 171–185.

J40 Kluwick, A.: Axisymmetric laminar interacting boundary layers. *Arch. Mech.* **43** (5), 1991 (eingeladen), 623–651.

J41 Kluwick, A.: Weakly nonlinear kinematic waves in suspensions of particles in fluids. *Acta Mech.* **88**, 1991, 205–217.

J42 Gittler, Ph. & Kluwick, A.: Interacting laminar boundary layers in quasi two-dimensional flow. *Fluid Dyn. Res.* **5**, 1989, 29–47.

J43 Hackmüller, G. & Kluwick, A.: The effect of a surface mounted obstacle on marginal separation. *Z. Flugwiss. Weltraum.* **13**, 1989, 365–370.

J44 Kluwick, A.: Marginale Ablösung laminarer achsensymmetrischer Grenzschichten. *Z. Flugwiss. Weltraum.* **13**, 1989, 254–259.

J45 Gittler, Ph. & Kluwick, A.: Triple-deck solutions for supersonic flows past flared cylinders. *J. Fluid Mech.* **197**, 1987, 469–487.

J46 Cramer, M.S., Kluwick, A., Watson, L.T. & Pelz, W.: Dissipative waves in fluids having both positive and negative nonlinearity. *J. Fluid Mech.* **169**, 1986, 323–336.

J47 Kluwick, A. & Wohlfart, H.: Hot wire anemometer study of entry flow in a curved duct. *J. Fluid Mech.* **165**, 1986, 335–353.

J48 Bodonyi, R.J., Smith, F.T. & Kluwick, A.: Axisymmetric flow past a slender body of finite length. *Proc. Roy. Soc. Lond.* A **400**, 1985, 37-–54.

J49 Kluwick, A.: On the nonlinear distortion of waves generated by interacting supersonic boundary layers. *Acta Mech.* **55**, 1985, 177-–189.

J50 Kluwick, A., Bodonyi, R.J. & Gittler, Ph.: Freely interacting boundary layers on bodies of revolution. *Q. J. Mech. Appl. Math.* **38**, 1985, 575–588.

J51 Cramer, M.S. & Kluwick, A.: On the propagation of waves exhibiting both positive and negative nonlinearity. *J. Fluid Mech.* **142**, 1984, 9–37.

J52 Kluwick, A., Gittler, Ph. & Bodonyi, R.J.: Viscous-inviscid interactions on axisymmetric bodies of revolution in supersonic flow. *J. Fluid Mech.* **140**, 1984, 281–301.

J53 Kluwick, A. & Stross, N.: Interaction between a weak oblique shock wave and a turbulent boundary layer in purely supersonic flow. *Acta Mech.* **53**, 1984, 37–56.

J54 Kluwick, A. & Wohlfart, H.: Entry flow in weakly curved ducts. Ingenieur Archiv **54**, 1984, 197–220.

J55 Kluwick, A.: Small-amplitude finite-rate waves in suspensions of particles in fluids. *ZAMM* **63**, 1983, 161–171.

J56 Kluwick, A. & Stross, N.: On the propagation of non-linear pressure waves in pipes with turbulent non-zero mean flow. *Acta Mech.* **47**, 1983, 73–86.

J57 Bodonyi, R.J. & Kluwick, A.: Supercritical transonic trailing edge flow. *Q. J. Mech. Appl. Math.* **35**, 1982, 265–277.

J58 Kluwick, A.: The analytical method of characteristics. *Prog. Aerosp. Sci.* **19**, 1981 (eingeladen), 179–313.

J59 Kluwick, A.: On the nonlinear distorsion of waves generated by flate plates under harmonic excitations. *J. Sound Vib.* **73**, 1980, 601–603.

J60 Kluwick, A. & Stross, N.: Unsteady, turbulent flow in pipes. *Acta Mech.* **37**, 1980, 1–12.

J61 Kluwick, A.: Stationäre, laminare wechselwirkende Reibungsschichten. *Z. Flugwiss. Weltraum.* **3**, 1979, 157-–174.

J62 Kluwick, A. & Nayfeh, A.H.: Nonlinear waves in homogeneous and heterogeneous elastic solids. *J. Phys. Paris* **C8**, 1979, 207-–211.

J63 Kluwick, A.: Characteristic surface in one-dimensional unsteady and two-dimensional steady expansion fans. *Z. Angew. Math. Phys.* **29**, 1978, 134-–146.

J64 Bodonyi, R.J. & Kluwick, A.: Freely interacting transonic boundary layers. *Phys. Fluids* **20**, 1977, 1432–1437.

J65 Kluwick, A.: Kinematische Wellen. *Acta Mech.* **26**, 1977, 15–46.

J66 Nayfeh, A.H. & Kluwick, A.: A comparison of three perturbation methods for nonlinear hyperbolic waves. *J. Sound Vib.* **48**, 1976, 293–299.

J67 Kluwick, A.: Gleichmäßig gültige Störtheorie und kumulative Effekte bei Wellenausbreitungsvorgängen. *J. Mecanique* **13**, 1974, 131–157.

J68 Kluwick, A. & Sockel, H.: Winderregte Schwingungen kreiszylindrischer Bauwerke. *Der Bauingenieur* **49**, 1974, 58–62.

J69 Kluwick, A.: Die Überschallströmung um eine plötzlich angestellte Platte. *Z. Flugwiss. Weltraum.* **20**, 1972, 295–300.

J70 Kluwick, A.: Schallnahe Wellenausbreitungsvorgänge in schlanken Düsen. *Acta Mech.* **15**, 1972, 105–119.

J71 Kluwick, A.: Zur Ausbreitung schwacher Stöße in dreidimensionalen instationären Strömungen. *ZAMM* **51**, 1971, 225–232.

J72 Kluwick, A. & Oswatitsch, K.: Leistungen und Verlust in stationärer und instationärer Strömung. *Z. Flugwiss. Weltraum.* **19**, 1971, 308–331.

Buchbeiträge

C1 Kornfeld, M. & Kluwick, A.: Weakly 3D effects upstream a surface mounted obstacle in transonic flows. In: *CISM Courses and Lectures Vol. 523 - Asymptotic Methods in Fluid Mechanics: Survey and Recent Advances*, Steinrück, H. (Ed.), Springer-Verlag, Wien/New York, 2010, ISBN 978-3-7091-0407-1, 409–414.

C2 Zwinger, T., Kluwick, A. & Sampl, P.: Numerical Simulation of Dry-Snow Avalanche Flow over Natural Terrain. In: *Dynamic Response of Granular and Porous Materials under Large and Catastrophic Deformations*, Hutter, K., Kirchner, N. (Ed.), Springer-Verlag, Heidelberg, 2003 (eingeladen), ISBN 3-540-00849-7, 161-–194.

C3 Kluwick, A.: Rarefaction Shocks. In: *Handbook of Shock Waves*, Vol. 1, Ben-Dor, G., Elprin, T., Ingra, O. (Ed.), Academic Press, San Diego, 2001 (eingeladen), ISBN 0-120-86431-2, 339–411.

C4 Kluwick, A.: Zur Bedeutung der Prandtl'schen Untersuchung über die dissipative Struktur von Verdichtungsstößen. In: *Ludwig Prandtl, ein Führer durch die Strömungslehre*, Meier, G.E.A. (Ed.), Vieweg-Verlag, Braunschweig/Wiesbaden, 2000 (eingeladen), ISBN 3-528-02561-1, 139–146.

C5 Kluwick, A.: Interacting laminar and turbulent boundary layers. In: *Recent Advances in Boundary Layer Theory*, Kluwick, A. (Ed.), Springer-Verlag, Wien New York, 1998, ISBN 3-211-83136-3, 231–330.

C6 Kluwick, A.: Comments on the paper "On the flow of water through ducts and channels" by Hahn, H., Herklotz G. and Schwarzschild, K. In: *Hans Hahn. Gesammelte Abhandlungen / Collected Works*, Schmetterer, L., Sigmund, K. (Ed.), Springer-Verlag, Wien New York, 1996 (eingeladen), ISBN 3-211-82750-1, 513–517.

C7 Kluwick, A.: Obituary for Klaus Oswatitsch. In: *Memorial Tributes: National Academy of Engineering*, Vol. 7, The National Academies Press, 1994 (eingeladen), 170–175.

C8 Kluwick, A., Gittler, Ph. & Bodonyi, R.J.: Viscous-inviscid laminar interaction near the trailing tip of an axisymmetric body. In: *Advances in Analytical Methods in Modelling of Aerodynamic Flows*, Walker, J.D.A., Barnett, M., Smith, F.T. (Ed.), AIAA, Reston, Virginia, 1994, ISBN 1-563-47-093-4, 108–111.

C9 Kluwick, A.: Small-amplitude finite-rate waves in fluids having both positive and negative nonlinearity. In: *Nonlinear waves in real fluids*, Kluwick, A. (Ed.), Springer-Verlag, Wien New York, 1991, ISBN 3-211-82277-1, 1–43.

C10 Kluwick, A.: "Untersuchung über den Flug der Vögel" - Beurteilung der Prechtl-Theorien über die Flugmechanik insbesondere über den Luftwiderstand aus der Sicht der modernen Strömungslehre. In: *Johann Joseph Prechtl. Sichtweisen und Aktualität seines Werkes*, Hanschk, Ch. (Ed.), Böhlau, Wien, 1990 (eingeladen), ISBN 3-205-05331-1, 79–83.

C11 Kluwick, A.: Wechselwirkung zwischen Grenzschicht und reibungsfreier Außenströmung. In: *Führer durch die Strömungslehre*, Prandtl, L., Oswatitsch, K., Wieghardt, K. (Ed.), Vieweg-Verlag, Braunschweig/Wiesbaden, 1984 (eingeladen), ISBN 3-528-18209-5, 355-–361.

C12 Kluwick, A.: Comparison of various perturbation methods. In: *Lecture series: Mathematical methods in Fluid Mechanics*, von Karman Institute for Fluid Dynamics, 1980 (eingeladen), 1–9.

C13 Kluwick, A.: Partial diffenential equations of first order and kinematic waves. In: *Lecture series: Mathematical methods in fluid mechanics*, von Karman Institute for Fluid Dynamics, 1980 (eingeladen), 1–35.

C14 Kluwick, A.: Hyperbolic waves of small amplitude. In: *Course on asymptotic methods in mechanics*, CISM Lecture Notes, Udine, 1979 (eingeladen), 1–73.

C15 Kluwick, A. & Oswatitsch, K.: Unstetigkeitseigenschaften der Integralgleichung für stationäre räumliche schallnahe Strömungen. In: *Estratto dal volume "Omaggio a Carlo Ferrari"*, Libreria Editrice Universitaria Levrotto & Bella, Torino, 1974 (eingeladen), 417–428.

Tagungsbandbeiträge

T1 Hackmüller, G. & Kluwick, A.: Effects of 3-D surface mounted obstacles on marginal separation. In: "Proceedings of the IUTAM Symposium: Separated Flows and Jets", Kozlov, V.V., Dovgal, A.V. (Ed.), Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1991, (eingeladen), ISBN 3-540-53762-7, 55–65.

T2 Kluwick, A. & Horvath, M.: Stöße in drehungsfreien Strömungen. In: Gesellschaft für angewandte Mathematik und Mechanik, *ZAMM* **53** (1973), ISSN: 0044-2267, T107–T108.

Vorträge und Poster-Präsentationen mit Tagungsbandbeitrag

P1 Scheichl, B., Kluwick, A. & Smith, F.T.: Time-mean description of turbulent bluff-body separation in the high-Reynolds-number limit. 12th EUROMECH European Turbulence Conference, Marburg/DE, 09-07-2009 - 09-10-2009. In: *Advances in Turbulence XII. Proceedings of the 12th EUROMECH European Turbulence Conference*, Eckhardt, B. (Ed.), Springer Proceedings in Physics Vol. 132, Berlin, Heidelberg, New York, 2009, ISBN 978-3-642-03084-0 / ISSN 0930-8989, 577-–580.

P2 Scheichl, B., Kluwick, A., Smith, F.T. & Paton, J.: A Uniformly Valid Theory of Turbulent Separation. iTi 2010 Conference on Turbulence, Bertinoro/IT, 09-19-2010 - 09-22-2010. In: *Progress in Turbulence IV*, Springer, 2011.

P3 Meyer, G. & Kluwick, A.: Viscous-inviscid interactions in transonic flows of regular and BZT fluids through slender channels. The 8th Euromech Fluid Mechanic Conference (EFMC8), Bad Reichenhall/DE, 09-13-2010 - 09-16-2010. In: *Book of Abstracts*, 2010, S9-3.

P4 Scheichl, B., Kluwick, A., Paton, J. & Smith, F.T.: A rational separation criterion for turbulent flow. The 8th Euromech Fluid Mechanics Conference (EFMC8), Bad Reichenhall/DE, 09-13-2010 - 09-16-2010. In: *Book of Abstracts*, 2010.

P5 Kornfeld, M. & Kluwick, A.: Local Interaction Theory for Laminar Transonic Flows in Slender Channels. GAMM 2009, Danzig/PL, 02-09-2009 - 02-13-2009. In: *PAMM* **9** (1), 2009, ISSN 1617-7061, 467-–468.

P6 Scheichl, B. & Kluwick, A.: Evolution of a Boundary Layer from Laminar Stagnation-Point Flow Towards Turbulent Separation. iTi Conference on Turbulence III, Bertinoro/IT, 10-12-2008 - 10-15-2008. In: *Progress in Turbulence III. Proceedings of the iTi Conference in Turbulence 2008*, Peinke, J., Oberlack, M., Talamelli, A, et al. (Ed.), Springer Proceedings in Physics Vol. 131, Berlin, Heidelberg, New York, 2009, ISBN 978-3-642-02224-1, 187–190.

P7 Kluwick, A, & Scheichl, B.: High-Reynolds-Number Asymptotics of Turbulent Boundary Layers: From Fully Attached to Marginally Separated Flows. International Conference on Boundary and Interior Layers (BAIL) 2008, University of Limerick/IR (eingeladener Hauptvortrag), 07-28-2008 - 08-01-2008. In: *BAIL 2008 - Boundary and Interior Layers. Proceedings of the International Conference on Boundary and Interior Layers - Computational and Asymptotic Methods*, Stynes, M, Hegarty, A. (Ed.), Springer, Lecture Notes in Computational Science and Engineering Vol. 69, Berlin, Heidelberg, 2009, ISBN 978-3-642-00604-3, ISSN 1439-7358, 3–22.

P8 Kluwick, A., Braun, S. & Cox, E.A.: Near critical phenomena in laminar boundary layers. IUTAM Symposium "Unsteady separated flows and their control", Korfu/GR (eingeladener Hauptvortrag), 06-18-2007 - 06-22-2007. In: *IUTAM Symposium on Unsteady Separated Flows and their Control*, Braza, M., Hourigan, K. (Ed.), Springer, Vol. 14, Heidelberg, 2009, ISBN 978-1-4020-9897-0, 91-–110.

P9 Kluwick, A., Braun, S. & Szeywerth, R.: Bifurcation phenomena in incompressible laminar ramp flow. 22nd International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM) 2008, Adelaide/AU, 08-24-2008 - 08-29-2008. In: *CD-ROM Proceedings*, Denier, J., Finn, M., Mattner, T. (Ed.), 2008, ISBN 978-0-9805142-1-6, Paper ID 10484, 2 Seiten.

P10 Meyer, G. & Kluwick, A.: Shockregularisation in dense gases by viscous inviscid interaction. XXII International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM 2008), Adelaide/AU, 08-24-2008 - 08-29-2008. In: *CD-ROM Proceedings*, Denier, J., Finn, M., Mattner, T. (Ed.), 2008, ISBN 978-0-9805142-1-6, 2 Seiten.

P11 Kluwick, A. & Meyer, G.: Transonic Viscous Inviscid Interactions of Dense Gases in Narrow Channels. 8th World Congress on Computational Mechanics (WCCM8) and 5th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2008), Venice/IT, 06-30-2008 - 07-04-2008. In: *WCCM8, ECCOMAS 2008 - CD-ROM Proceedings*, Schrefler, B., Perego, U. (Ed.), CIMNE, 2008, 2 Seiten.

P12 Scheichl, B. & Kluwick, A.: Level of Turbulence Intensity Associated with Bluff-Body Separation for Large Values of the Reynolds Number. 5th AIAA Theoretical Fluid Mechanics Conference, Seattle, WA/US, 06-23-2008 - 06-26-2008. In: *2008 AIAA Meeting Papers on Disc*, American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), 2008, Paper ID AIAA 2008-4348, 23 Seiten.

P13 Scheichl, S. & Kluwick, A.: On the effects of compressibility in marginally separated flows. GAMM 2008, Bremen/DE, 03-31-2008 - 04-04-2008. In: *Proceedings of the annual GAMM meeting*, *PAMM* **8** (1), 2008, ISSN 1617-7061, 10639–10640.

P14 Scheichl, B. & Kluwick, A.: Turbulent shear-layer scaling in the limit of infinite Reynolds number derived from the unsteady equations of motion. GAMM 2007 / 6th International Congress on Industrial and Applied Mathematics, Zürich, 07-16-2007 - 07-20-2007. In: *Special Issue: Sixth International Congress on Industrial Applied Mathematics (ICIAM07) and GAMM Annual Meeting*, *PAMM* **7** (1), 2008, ISSN 1617-7061, Paper ID 526, 4090011–4090012.

P15 Scheichl, B. & Kluwick, A.: Asymptotic Theory of Bluff-Body Separation: A Novel Shear Layer Scaling Deduced From an Investigation of the Unsteady Motion. IUTAM Symposium on Unsteady Separated Flows and their Control, Corfu/GR, 06-18-2007 - 06-22-2007. In: *Proceedings of the IUTAM Symposium on Unsteady Separated Flows and their Control*, Braza, M., Hourigan, K. (Ed.), Springer, Vol. 14, 2008, ISBN 978-1-4020-9897-0, ISSN 1875-3507, 135–150.

P16 Meyer, G. & Kluwick, A.: Transonic Viscous Inviscid Interactions in Narrow Channels. GAMM 2007 / 6th International Congress on Industrial and Applied Mathematics, Zürich, 07-16-2007 - 07-20-2007. In: *PAMM* **7** (1), 2007, 2 Seiten.

P17 Szeywerth, R. & Kluwick, A.: On a new numerical algorithm for the solution of triple deck problems. GAMM 2007 / 6th International Congress on Industrial and Applied Mathematics, Zürich, 07-16-2007 - 07-20-2007. In: *PAMM* **7** (1), 2007, 2 Seiten.

P18 Scheichl, B. & Kluwick, A.: Turbulent Marginal Separation: A Novel Triple-Deck Problem for Turbulent Flows. ITI Conference on Turbulence 2005, Bad Zwischenahn/DE, 09-25-2005 - 09-28-2005. In: *Progress in Turbulence II. Proceedings of the iTi Conference in Turbulence 2005*, Oberlack, M., Khujadze, G., Guenther S., Weller, T., Frewer, M., Peinke, J., Barth, S. (Ed.), Springer Proceedings in Physics Vol. 109, Berlin, Heidelberg, New York, 2007, ISBN 978-3-540-32602-1, 165–168.

P19 Scheichl, B. & Kluwick, A.: On Turbulent Marginal Separation: How the Logarithmic Law of the Wall is Superseded by the Half-Power Law. International Conference on Boundary and Interior Layers (BAIL) 2006, Göttingen, 07-24-2006 - 07-28-2006. In: *Proceedings of the International Conference on Boundary and Interior Layers*, Lube, G., Rapin, G. (Ed.), Georg-August University Göttingen, 2006, ISBN 978-3-00-019600-3, Paper ID 24, 8 Seiten.

P20 Scheichl, B. & Kluwick, A.: On the Brillouin-Villat Condition in Connection with Turbulent Massive Separation. International Symposium on Trends in Applications of Mathematics to Mechanics (STAMM), Vienna, 07-10-2006 - 07-14-2006. In: *International Symposium on Trends in Applications of Mathematics to Mechanics (STAMM) 2006*, Kuhlmann, H.C., Troger, H., Zysset, P.K. (Ed.), 2006, ISBN 3-200-00682-x, 121–122.

P21 Scheichl, S. & Kluwick, A.: On the formation of classical and non-classical shocks in a tube lined with Helmholtz resonators. ICSV13 - Thirteenth International Congress on Sound and Vibration, Vienna, 07-02-2006 - 07-06-2006. In: *CD-ROM Proceedings of the 13th International Congress on Sound and Vibration*, Vienna University of Technology, 2006, ISBN 3-9501554-5-7, Paper ID 379, 8 Seiten.

P22 Kluwick, A.: The effect of surface topography on weakly nonlinear roll waves. GAMM 2006, Berlin, 03-27-2006 - 03-31-2006. In: *Proceedings of the annual GAMM meeting, PAMM* **6** (1), 2006, ISSN 1617-7061, 607-–608.

P23 Kluwick, A. & Braun, S.: Structure formation in marginally separated aerodynamic and related boundary layer flows. IUTAM Symposium "One Hundred Years of Boundary Layer Research", Göttingen (eingeladen), 08-12-2004 - 08-14-2004. In: *IUTAM Symposium on One Hundred Years of Boundary Layer Research*, Meier, G.E.A., Sreenivasan, K.R., Heinemann, H.-J. (Ed.), Springer, 2006, ISBN 1-4020-4149-7, 373–382.

P24 Braun, S. & Kluwick, A.: Über den Einsatz asymptotischer Methoden zur Untersuchung transitionaler Ablöseblasen in Grenzschichtströmungen und deren aktiver Beeinflussung. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2005, Friedrichshafen/DE; 09-26-2005 - 09-29-2005. In: *DGLR Jahrbuch 2005*, Vol. I/II, 2005, ISSN 0070-4083, Paper ID DGLR-JT2005-114, 10 Seiten.

P25 Scheichl, B. & Kluwick, A.: Turbulent Marginal Separation and the Turbulent Goldstein Problem. 4th AIAA Theoretical Fluid Mechanics Conference, Toronto (eingeladen), 06-06-2005 - 06-09-2005. In: *2005 AIAA Meeting Papers on Disc*, American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), 2005, ISBN 1-56347-763-7, Paper ID AIAA 2005-4936, 27 Seiten.

P26 Kluwick, A. & Viertl, N.: Triple-deck regularization of weak hydraulic jumps in a two layer shallow water flow. GAMM 2005, Luxembourg, 03-28-2005 - 04-01-2005. In: *Proceedings of the annual GAMM meeting, PAMM* **5** (1), 2005, ISSN 1617-7061, 2 Seiten.

P27 Streibl, B. & Kluwick, A.: On transonic marginal separation. GAMM 2004, Dresden, 03-22-2004 - 03-26-2004. In: *Proceedings of the annual GAMM meeting, PAMM* **4** (1), 2005, ISSN 1617-7061, 2 Seiten.

P28 Wrabel, M. & Kluwick, A.: Shock boundary layer interaction in dense gases. GAMM 2004, Dresden, 03-22-2004 - 03-26-2004. In: *Proceedings of the annual GAMM meeting, PAMM* **4** (1), 2005, ISSN 1617-7061, 2 Seiten.

P29 Scheichl, B. & Kluwick, A.: Non-unique Self-similar Turbulent Boundary Layers in the Limit of Large Reynolds Numbers. ITI Conference on Turbulence 2003, Bad Zwischenahn/DE, 09-21-

2003 - 09-24-2003. In: *Progress in Turbulence*, Peinke, J., Kittel, A., Barth, S., Oberlack, M. (Ed.), Springer Proceedings in Physics Vol. 101, Berlin, Heidelberg, New York, 2005, ISBN 3-540-23216-8, 111–114.

P30 Braun, S. & Kluwick, A.: Near critical unsteady three-dimensional triple deck flows. 21. International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, Warsaw/PL, 08-15-2004 - 08-21-2004. In: *ICTAM04 Abstracts Book and CD-ROM Proceedings*, Gutkowski, W., Kowalewski, T.A. (Ed.), IPPT PAN, 2004, ISBN 83-89687-01-1, Paper ID FM2L_11084, 2 Seiten.

P31 Kluwick, A. & Kinell, M.: Nonclassical dynamics of laminar dense gas boundary layers. 21. International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, Warsaw/PL, 08-15-2004 - 08-21-2004. In: *ICTAM04 Abstracts Book and CD-ROM Proceedings*, Gutkowski, W., Kowalewski, T.A. (Ed.), IPPT PAN, 2004, ISBN 83-89687-01-1, Paper ID FM5L_10789, 2 Seiten.

P32 Scheichl, B. & Kluwick, A.: Non-Unique Quasi-Equilibrium Turbulent Boundary Layers. XXI International Congress on Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM 04), Warsaw/PL, 08-15-2004 - 08-21-2004. In: *ICTAM04 Abstracts Book and CD-ROM Proceedings*, Gutkowski, W., Kowalewski, T.A. (Ed.), Ippt Pan, Warsaw, 2004, ISBN 83-89687-01-1, Paper ID FM2L_11083, 2 Seiten.

P33 Steinrück, H., Braun, S. & Kluwick, A.: Multiple Scales and Bifurcation Problems in Boundary Layer Theory. Symposium on Trends of Applications of Mathematics to Mechanics, Seeheim/DE (eingeladen), 08-15-2004 - 08-20-2004. In: *Proccedings of STAMM 2004*, Hutter, K., Wang, Y. (Ed.), Shaker, 2004, ISBN 3-8322-3600-7, 539-–548.

P34 Scheichl, S. & Kluwick, A.: Wave propagation phenomena governed by a modified Korteweg-de Vries-Burgers equation with mixed nonlinearity. 10th International Congress on Sound and Vibration, Stockholm, 07-07-2003 - 07-10-2003. In: *CD-ROM Proceedings of the 10th International Congress on Sound and Vibration*, The International Institute of Acoustics and Vibration, 2003, Paper ID P357, 8 Seiten.

P35 Scheichl, B. & Kluwick, A.: Annular spread of a thin liquid film over a rotating disk. 2nd MIT Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics, Cambridge, MA/US, 06-17-2003 - 06-20-2003. In: *Compilation of Abstracts for the Second M.I.T. Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics*, Bathe, K.J. (Ed.), Massachusetts Institute of Technology, Cambridge/US, 2003, 187.

P36 Braun, S. & Kluwick, A.: Blow-up phenomena in marginally separated boundary layer type flows. GAMM 2003, Abano Terme/IT, 03-24-2003 - 03-28-2003. In: *Proceedings of the annual GAMM meeting*, *PAMM* **3**, 2003, ISSN 1617-7061, 350–351.

P37 Kinell, M. & Kluwick, A.: On a new form of marginal separation. GAMM 2003, Abano Terme/IT, 03-24-2003 - 03-28-2003. In: *Proceedings of the annual GAMM meeting*, *PAMM* **3**, 2003, ISSN 1617-7061, 2 Seiten.

P38 Kluwick, A., Braun, S. & Gittler, Ph.: Transonic laminar high Reynolds number flow in slender channels. Symposium Transsonicum IV, Göttingen (eingeladen), 09-02-2002 - 09-06-2002. In: *IUTAM Symposium Transsonicum IV*, Sobieczky, H. (Ed.), Kluwer Academic Publishers, Vol. 73, 2003, ISBN 1-4020-1608-5, 105—110.

P39 Kluwick, A., Exner, A. & Cox, E.A.: Structure of weak laminar hydraulic jumps in single layer and two layer fluids. GAMM 2002, Augsburg, 03-25-2002 - 03-28-2002. In: *Proceedings of the annual GAMM meeting*, *PAMM* **2**, 2003, ISSN 1617-7061, 2 Seiten.

P40 Wrabel, M., Braun, S., Kluwick, A. & Aloy, A.: Analysis of the Behavior of a Respirator Model under Superposed High Frequency Jet Ventilation. Proceedings of the 2nd European Medical and Biological Engineering Conference, Wien, 12-04-2002 - 12-08-2002. In: *Proceedings of the 2nd European Medical and Biological Engineering Conference*, 2002, 1600–1601.

P41 Scheichl, S. & Kluwick, A.: Weakly nonlinear waves propagation phenomena in perfect and real gases. 9th International Congress On Sound and Vibration, Orlando, Florida, 07-08-2002 - 07-11-

2002. In: *CD-ROM Proceedings of the 9th International Congress on Sound and Vibration*, The International Institute of Acoustics and Vibration, 2002, Paper ID P724-2, 8 Seiten.

P42 Scheichl, B. & Kluwick, A.: Singular solutions of the boundary layer equations in the case of marginal separation as Re tends to infinity. 9th European Turbulence Conference, Southampton/UK, 07-02-2002 - 07-05-2002. In: *Advances in Turbulence IX. Proceedings of the Ninth European Turbulence Conference*, Castro, I.P., Handock, P.E. (Ed.), CIMNE, Barcelona, 2002, ISBN 84-95999-07-2, 829–832.

P43 Braun, S. & Kluwick, A.: Unsteady three-dimensional effects in marginally separated laminar boundary layer flows. 3rd AIAA Theoretical Fluid Mechanics Meeting, St. Louis, Missouri/US, 06-24-2002 - 06-26-2002. In: AIAA-paper 2002-2983, 2002, 1–7.

P44 Braun, S., Kluwick, A. & Trenker, M.: Leading edge separation: a comparison between interaction theory and Navier-Stokes computations. GAMM 2002, Augsburg/DE, 03-25-2002 - 03-28-2002. In: *Proceedings of the annual GAMM meeting*, *PAMM* **2**, 2002, ISSN 1617-7061, 312–313.

P45 Kluwick, A.: Introduction to nonclassical shock solutions of the modified Burgers-Korteweg-de Vries equation. GAMM 2001, Zürich (eingeladen), 02-12-2001 - 02-15-2001. In: *Proceedings of the annual GAMM meeting*, *PAMM* **1**, 2002, ISSN 1617-7061, 4 Seiten.

P46 Kluwick, A. & Helma, S.: Steady and Unsteady Jet Wiping Processes. GAMM 2001, Zürich, 02-12-2001 - 02-15-2001. In: *Proccedings of the annual GAMM meeting*, *PAMM* **1**, 2002, ISSN 1617-7061, 2 Seiten.

P47 Braun, S., Kluwick, A. & Steinrück, H.: The effect of 3D surface mounted obstacles on laminar, incompressible marginally separated boundary layer flows. GAMM 2000, Göttingen, 04-03-2000 - 04-07-2000. In: *Proceedings of the annual GAMM meeting*, *ZAMM* **81** (4), 2001, ISSN 0946-8463, S909–S910.

P48 Exner, A. & Kluwick, A.: The interaction problem for the locally cooled free convection boundary layer. GAMM 2000, Göttingen, 04-02-2000 - 04-07-2000. In: *Proceedings of the annual GAMM meeting*, *ZAMM* **81**, 2001, ISSN 0946-8463, S463–S464.

P49 Kluwick, A.: Laminar boundary layer separation, fast and slow. GAMM 2000, Göttingen (eingeladen), 04-02-2000 - 04-07-2000. In: *Proceedings of the annual GAMM meeting*, *ZAMM* **81**, 2001, ISSN 0946-8463, S77–S80.

P50 Kluwick, A. & Gittler, Ph.: Transonic laminar interacting boundary layers in narrow channels. GAMM 2000, Göttingen, 04-02-2000 - 04-07-2000. In: *Proceedings of the annual GAMM meeting*, *ZAMM* **81**, 2001, ISSN 0946-8463, S473-–S474.

P51 Kluwick, A. & Kronberger, R.: On the interaction of a 2-dimensional transonic turbulent boundary layer with a localized 3-dimensional disturbance. GAMM 2000, Göttingen, 04-02-2000 - 04-07-2000. In: *Proceedings of the annual GAMM meeting*, *ZAMM* **81**, 2001, ISSN 0946-8463, S475–S476.

P52 Kluwick, A. & Scheichl, B.: Singular solutions of the turbulent boundary layer equations in the case of marginal separation as Re tends to infinity. GAMM 2000, Göttingen, 04-02-2000 - 04-07-2000. In: *Proceedings of the Annual GAMM Meeting*, *ZAMM* **81**, 2001, ISSN 0946-8463. S927–S928.

P53 Braun, S. & Kluwick, A.: Two- and three-dimensional marginal separation of laminar, incompressible viscous jets. GAMM 1999, Metz/FR, 04-12-1999 - 04-16-1999. In: *Proceedings of the annual GAMM meeting*, *ZAMM* **80** (3), 2000, ISSN 0946-8463, S623–S624.

P54 Cox, E.A., Kluwick, A. & Scheichl, S.: Resonant wave response to obstacle forcing in two layer fluid flows. GAMM 1999, Metz/FR (eingeladen), 04-12-1999 - 04-16-1999. In: *Proceedings of the annual GAMM meeting*, *ZAMM* **80** (1), 2000, ISSN 0946-8463, 105–108.

P55 Kluwick, A. & Scheichl, B.: On marginal turbulent separation due to an imposed adverse pressure gradient. GAMM 1999, Metz/FR, 04-12-1999 - 04-16-1999. In: *Proceedings of the Annual GAMM Meeting*, *ZAMM* **80**, 2000, ISSN 0946-8463, 647-–648.

P56 Cox, E.A., Kluwick, A. & Scheichl, S.: Weakly nonlinear waves in a two-layer fluid. GAMM 1998, Bremen, 04-06-1998 - 04-09-1998. In: *Proceedings of the annual GAMM meeting*, *ZAMM* **79** (S3), 1999, ISSN 0946-8463, 765–766.

P57 Exner, A. & Kluwick, A.: Locally cooled free convection boundary layer on the verge of separation. GAMM 1998, Bremen, 04-06-1998 - 04-09-1998. In: *Proceedings of the annual GAMM meeting*, *ZAMM* **79** (S3), 1999, ISSN 0946-8463, 711–712.

P58 Kluwick, A.: Weakly-nonlinear hyperbolic waves in BZT-fluids. 7th International Conference on Hyperbolic Problems, Zürich (eingeladen), 02-07-1998 - 02-13-1998. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Hyperbolic Problems*, Birkhäuser, 1999, 559–568.

P59 Kluwick, A.: Non-classical flow phenomena of classical gases, 41th Ludwig Prandtl memorial lecture. GAMM 1998, Bremen (eingeladen), 04-06-1998 - 04-09-1998. In: *DGLR Jahrbuch*, 1998-3, 1998, ISSN 0946-8463, 2017-–2034.

P60 Braun, S. & Kluwick, A.: Linear coupling effects between first and second sound in superfluid Helium. GAMM 1997, Regensburg, 03-24-1997 - 03-27-1997. In: *Proceedings of the annual GAMM meeting*, *ZAMM* **78** (1), 1998, ISSN 0946-8463, S299–S300.

P61 Kluwick, A. & Reiterer, M.: On three-dimensional Marginal Separation. GAMM 1997, Regensburg, 03-24-1997 - 03-27-1997. In: *Proceedings of the annual GAMM meeting*, *ZAMM* **78** (S2), 1998, ISSN 0946-8463, 543–544.

P62 Kluwick, A., Reiterer, M. & Hackmüller, G.: Marginal separation caused by three-dimensional surface mounted obstacles. 1st International Conference on Asymptotics in Mechanics, St. Petersburg (eingeladen), 08-16-1994 - 08-19-1994. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Asymptotics in Mechanics*, Neyfeh, A.H., Rozhdestvensky, K.V. (Ed.). St. Petersburg State Marine Technical University, 1997, 113–120.

P63 Kluwick, A. & Lindner, G.: Perturbation analysis of steady and unsteady transonic flow through cascades. 1st AIAA Theoretical Fluid Mechanics Meeting, New Orleans, 06-17-1996 - 06-20-1996. In: *AIAA paper 96-2118*, 1996, 1-–11.

P64 Braun, S., Kluwick, A. & Cramer, M.S.: The effect of the thermal expansion coefficient on nonlinear first and second sound in superfluid Helium. 3rd International Congress on Industrial and Applied Mathematics, Hamburg, 07-03-1995 - 07-07-1995. In: *Proceedings of the GAMM/ICIAM 95 Conference*, *ZAMM* **76** (5), 1996, ISSN 0044-2267, 69-–70.

P65 Scheichl, S. & Kluwick, A.: Steady and unsteady transonic nozzle flow of dense gases. 3rd International Congress on Industrial and Applied Mathematics, Hamburg, 07-03-1995 - 07-07-1995. In: *Proceedings of the GAMM/ICIAM 95 conference*, *ZAMM* **76** (5), 1996, ISSN 0044-2267, 445–446.

P66 Braun, S., Kluwick, A. & Cramer, M.S.: Effect of thermal expansion on the shock speeds of first, second and fourth sound in He II. 20th International Symposium on Shock Waves, Pasedena, California/US, 07-23-1995 - 07-28-1995. In: *Proceedings of the Conference*, 1995, 1327–1332.

P67 Kluwick, A.: Adiabatic waves in the neighbourhood of the critical point. IUTAM Symposium on Waves in Liquid/Gas and Liquid/Vapor Two-Phase Systems, Kyoto (eingeladen), 05-09-1994 - 05-13-1994. In: *IUTAM Symposium on Waves in Liquid/Gas and Liquid/Vapor Two-Phase Systems*, Morioka, S., van Wijngaarden, L. (Ed.), Kluwer, 1995, 387–404.

P68 Gittler, Ph. & Kluwick, A.: Laminare Grenzschichtwechselwirkung in der Nähe des Hinterendes achsensymmetrischer Körper. GAMM 1994, Braunschweig, 04-04-1994 - 04-08-1994. In: *Proceedings of the annual GAMM meeting*, *ZAMM* **75** (S1), 1995, ISSN 0946-8463, 333–334.

P69 Kluwick, A. & Gittler, Ph.: Zur Strömung in der Nähe des Hinterendes achsensymmetrischer Körper bei großen Reynolds Zahlen. GAMM 1993, Dresden. In: *Proceedings of the annual GAMM meeting*, *ZAMM* **74**, 1994, T389–T391.

P70 Oertl, H., Kluwick, A. & Laurin, E.: Instabilität und Transition. GAMM 1993, Dresden (eingeladen). In: *Proceedings of the annual GAMM meeting*, *ZAMM* **74**, 1994, T339.

P71 Kluwick, A.: Spherical and cylindrical second-sound waves in He II exhibiting mixed nonlinearity. GAMM 1991, Krakau. In: *Proceedings of the annual GAMM meeting*, *ZAMM* **72** (5), 1992, T312–T314.

P72 Kluwick, A.: Waves in phase transition. GAMM 1990, Hannover (eingeladen). In: *Proceedings of the annual GAMM meeting*, *ZAMM* **71**, 1991, T397-–T401.

P73 Kluwick, A. & Hackmüller, G.: Marginal separation in quasi-two-dimensional flow. 8th Symposium on Trends in Applications of Mathematics to Mechanics, Hollabrunn, 08-13-1989 - 08-16-1989. In: *Trends in Applications of Mathematics to Mechanics*, Schneider, W., Troger, H., Ziegler, F. (Ed.). Longman Scientific and Technical, Harlow/UK, 1991, ISBN 0470218029, 143–149.

P74 Hackmüller, G. & Kluwick, A.: Effects of surface geometry and suction/blowing on marginal separation. 3rd International Congress of Fluid Mechanics, Kairo, 01-02-1990 - 01-04-1990. In: *Proceedings of the 3rd International Congress of Fluid Mechanics*, 1990, 1–6.

P75 Kluwick, A. & Czemetschka, E.: On the propagation of spherical and cylindrical waves in media having both positive and negative nonlinearity. 3rd International Congress of Fluid Mechanics, Kairo, 01-02-1990 - 01-04-1990. In: *Proceedings of the 3rd International Congress of Fluid Mechanics*, 1990, 725–732.

P76 Hackmüller, G. & Kluwick, A.: Marginale Ablösung an ebenen schlanken Hügeln und Dellen. GAMM 1989, Karlsruhe. In: *Proceedings of the annual GAMM meeting*, *ZAMM* **70**, 1990, ISSN 0044-2267, T478–T479.

P77 Kluwick, A. & Czemetschka, E.: Kugel- und Zylinderwellen in Medien mit positiver und negativer Nichtlinearität. GAMM 1989, Karlsruhe. In: *Proceedings of the annual GAMM meeting*, *ZAMM* **70**, 1990, ISSN 0044-2267, T207-–T208.

P78 Koller, F. & Kluwick, A.: Asymptotic analysis of transonic flow through oscillating cascades. AGARD 74th A and B Specialists' Meeting of the Propulsion and Energetics Panel, Luxembourg (eingeladen), 08-28-1989 - 09-01-1989. In: *Proceedings of the AGARD 74th A and B Specialists' Meeting of the Propulsion and Energetics Panel*, 1989, 16-1–16-10.

P79 Kluwick, A. & Gittler, Ph.: Dispersive wall-friction effects on high frequency waves in media having both positive and negative nonlinearity. Euromech 240, Bologna (eingeladen), 08-30-1988 - 09-02-1988. In: *Proceedings of the Euromech 240: Dispersive waves in dissipative fluids*, 1989, 34–35.

P80 Kluwick, A. & Koller, F.: Perturbation analysis of unsteady transonic flow through cascades. IUATM Symposium Transsonicum III, Göttingen (eingeladen), 05-24-1988 - 05-27-1988. In: *Proceedings of the IUTAM Symposium Transsonicum III*, Zierep, J., Oertl, H. (Ed.), Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1989, ISBN 3-540-50202-5, 189–196.

P81 Gittler, Ph. & Kluwick, A.: Dispersive Wandreibungseffekte bei hochfrequenten Wellen in gasgefüllten Rohren. GAMM 1988, Wien. In: *Proceedings of the annual GAMM meeting*, *ZAMM* **69**, 1989, ISSN 0044-2267, T578-–T579.

P82 Kluwick, A.: Interacting turbulent boundary layers. GAMM 1988, Wien (eingeladen). In: *Proceedings of the annual GAMM meeting*, *ZAMM* **69**, 1989, ISSN 0044-2267, T560-–T561.

P83 Kluwick, A.: Marginale Ablösung laminarer achsensymmetrischer Grenzschichten. GAMM 1988, Wien. In: *Proceedings of the annual GAMM meeting*, *ZAMM* **69**, 1989, ISSN 0044-2267, T606–T607.

P84 Koller, F. & Kluwick, A.: Ausbreitung periodischer Wellen kleiner Amplitude in Gasen mit großen spezifischen Wärmen. GAMM 1987, Stuttgart. In: *Proceedings of the annual GAMM meeting, ZAMM* **68**, 1988, ISSN 0044-2267, T306–T307.

P85 Gittler, Ph. & Kluwick, A.: Nonuniqueness of Triple-Deck Solutions for Axisymmetric Supersonic Flow with Separation. IUTAM Symposium on Boundary Layer Separation, London (eingeladen), 08-26-1986 - 08-28-1986. In: *Proceedings of the IUTAM Symposium on Boundary-Layer Separation*, Smith, F.T., Brown, S.N. (Ed.), Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1987, ISBN 3-540-17453-2, 395–397.

P86 Kluwick, A.: Interacting boundary layers. GAMM 1986, Dortmund. In: *Proceedings of the annual GAMM meeting, ZAMM* **67**, 1987 (eingeladen), ISSN 0044-2267, T3–T13.

P87 Koller, F. & Kluwick, A.: Theorie kleiner Störungen für ebene, schallnahe Strömungen durch schwingende Schaufelgitter. GAMM 1986, Dortmund. In: *Proceedings of the annual GAMM meeting, ZAMM* **67**, 1987, ISSN 0044-2267, T296–T298.

P88 Gittler, Ph. & Kluwick, A.: Wechselwirkende achsensymmetrische Überschallgrenzschichten. GAMM 1985, Dubrovnik. In: *Proceedings of the annual GAMM meeting, ZAMM* **66**, 1986, ISSN 0044-2267, T207–T208.

P89 Kluwick, A.: Zur Ausbreitung langer Wellen kleiner Amplitude in Suspensionen von Teilchen in Flüssigkeiten. GAMM 1984, Regensburg. In: *Proceedings of the annual GAMM meeting, ZAMM* **65**, 1985, ISSN 0044-2267, T205–T207.

P90 Kluwick, A. & Wohlfart, H.: Experimentelle Untersuchung der Strömung im Eintrittsbereich kreisförmig gekrümmter Rohre. GAMM 1984, Regensburg. In: *Proceedings of the annual GAMM meeting, ZAMM* **65**, 1985, ISSN 0044-2267, T256-–T257.

P91 Kluwick, A.: Wellenhierarchie in Suspensionen von Teilchen in Fluiden. GAMM 1982, Budapest, in: *Proceedings of the annual GAMM meeting, ZAMM* **63** (1983), ISSN 0044-2267, T264–T266.

P92 Kluwick, A. & Bodonyi, R.J.: Freely interacting laminar boundary layers in channels. GAMM 1978, Brüssel, in: *Proceedings of the annual GAMM meeting, ZAMM* **59** (1979), ISSN 0044-2267, T243–T245.

P93 Kluwick, A.: Rollwellen kleiner Amplitude. GAMM 1977, Kopenhagen, in: *Proceedings of the annual GAMM meeting, ZAMM* **58** (1978), T283–T284.

P94 Kluwick, A.: Zur Bedeutung der kumulativen Glieder im analytischen Charakteristikenverfahren. GAMM 1973, München, in: *Proceedings of the annual GAMM meeting, ZAMM* **54** (1974), ISSN 0044-2267, T126–T128.

P95 Kluwick, A.: Schallnahe Wellenausbreitungsvorgänge in schlanken Düsen. GAMM 1971, Mannheim, in: *Proceedings of the annual GAMM meeting, ZAMM*, 1972 (1971), ISSN 0044-2267, T92–T93.

Vorträge und Poster-Präsentationen ohne Tagungsbandbeitrag

V1 Kluwick, A.: Laminare, schallnahe Strömungen in schlanken Kanälen. TU Graz (eingeladen), 05-06-2009.

V2 Kluwick, A.: Schallnahe Strömungen in schlanken Kanälen. Festkolloquium anlässlich des 80. Geburtstages von Prof. Jürgen Zierep, Universität Karlsruhe, Karlsruhe (eingeladen), 01-21-2009.

V3 Braun, S., Scheichl, S. & Kluwick, A.: On a similarity solution in unsteady marginal separation. 7th Euromech Fluid Mechanics Conference (EFMC7), Manchester, 09-14-2008 - 09-18-2008.

V4 Kluwick, A., Szeywerth, R. & Viertl, N.: On the admissibility of weak hydraulic jumps in two layer fluids. STAMM 2006, Wien, 07-10-2006 - 07-14-2006.

V5 Kluwick, A., Szeywerth, R. & Viertl, N.: On the formation of hydraulic jumps in two layer fluids. 6th Euromech Fluid Mechanics Conference (EFMC6), Stockholm, 06-26-2006 - 06-30-2006.

V6 Scheichl, B. & Kluwick, A.: A general asymptotic description of turbulent boundary layers. 6th Euromech Fluid Mechanics Conference (EFMC6), Stockholm, 06-26-2006 – 06-30-2006.

V7 Scheichl, B. & Kluwick, A.: Asymptotic Structure of Turbulent Boundary Layers: Multi-Valued Solutions and Boundary Layer Separation. 2005 APS Division of Fluid Dynamics 58th Annual Meeting (DFD05), Chicago, 11-20-2005 - 11-22-2005.

V8 Kluwick, A. & Braun, S.: Response of marginally separated boundary layers to three-dimensional unsteady perturbations. 5th European Fluid Mechanics Conference (EFMC), Toulouse, 08-24-2003 - 08-28-2003.

V9 Braun, S. & Kluwick, A.: Blow-up and control of marginally separated boundary layer flows. LMS Durham Workshop on "New developments and applications in rapid fluid flows", Durham/UK (eingeladen), 07-14-2003 - 07-18-2003.

V10 Cox, E.A. & Kluwick, A.: Wave propagation in two layer fluid flow. 5th World Congress on Compuational Mechanics (WCCM V), Wien, 07-07-2002 – 07-12-2002.

V11 Kluwick, A.: Dense gas acoustics. Mech2k2, Linz (eingeladen), 07-03-2002 - 07-06-2002.

V12 Zwinger, T. & Kluwick, A.: Re-suspension process in turbulent particle-fluid mixture boundary layers. 27th General Assembly of the European Geophysical Society, Nizza, 04-21-2002 - 04-26-2002.

V13 Kluwick, A., Exner, A. & Cox, E.A.: Structure of small amplitude hydraulic jumps in laminar high Reynolds number flow. 4th Euromech Fluid Mechanics Conference, Eindhoven, 11-19-2000 - 11-23-2000.

V14 Braun, S. & Kluwick, A.: Three-dimensional marginal separation of laminar viscous wall jets and boundary layer flows. 20th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM), Chicago, Illinois, 08-27-2000 - 09-02-2000.

V15 Kluwick, A., Scheichl, S. & Cox, E.A.: Negative and nonclassical hydraulic jumps in two layer fluid flow. 20th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM), Chicago, Illionois, 08-27-2000 - 09-02-2000.

V16 Zwinger, T., Kluwick, A. & Sampl, P.: Dynamics of dry snow avalanches on arbitrarily shaped slopes. 20th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM), Chicago, Illinois, 08-27-2000 – 09-02-2000.

V17 Kluwick, A., Cox, E.A. & Scheichl, S.: Wellenausbreitungsvorgänge in Zweischichtenströmungen mit freier Oberfläche. Kolloquium über Angewandte Mathematik in Österreich, Wien (eingeladen), 10-02-1998 - 10-03-1998.

V18 Kluwick, A.: On marginally separated flows in dilute end dense gases. Euromech 384 "Steady and unsteady separated flows", Manchester (eingeladen), 07-06-1998 - 07-09-1998.

V19 Kluwick, A., Cox, E.A. & Scheichl, S.: Near critical two-layer film flow over topography. Euromech 376 "Waves in two-phase flows", Istanbul (eingeladen), 04-27-1998 - 04-30-1998.

V20 Kluwick, A.: Steady and unsteady flow phenomena in dense gases. University College, Dublin (eingeladen), 11-20-1997.

V21 Kluwick, A. & Scheichl, S.: On the interaction of gravity waves and thermal disturbances with solidification fronts. 3rd European Fluid Mechanics Conference, Göttingen (eingeladen), 09-15-1997 – 09-18-1997.

V22 Kluwick, A.: Stationäre und instationäre Strömungen vom Dämpfen retrograder Fluide. RWTH Aachen, Graduiertenkolleg "Transportvorgänge in Hyperschallströmungen", Aachen (eingeladen), 01-17-1997.

V23 Kluwick, A.: Zur Dynamik von Gasen mit großen spezifischen Wärmen. Österreichische Akademie der Wissenschaften, Wien (eingeladen), 10-10-1996.

V24 Kluwick, A. & Cox, E.A.: Resonant dense gas oscillations. ICTAM 1996, Kyoto, 08-25-1996 - 08-31-1996.

V25 Kluwick, A.: Dynamik dichter Gase. ETH Zürich, Zürich (eingeladen), 06-11-1996.

V26 Cox, E.A. & Kluwick, A.: Finite amplitude sound beam propagation in dense gases. 130th Meeting of the Acoustical Society of America, St. Louis, Missuri, 11-27-1995 - 12-01-1995.

V27 Braun, S., Kluwick, A. & Cramer, M.S.: Über den Einfluß des thermischen Expansionskoeffizienten auf die Nichtlinearitätsparameter bei 1., 2., und 4. Schall in Superfluidem Helium. 44. ÖPG-Jahrestagung, Innsbruck/AT, 09-19-1994 – 09-23-1994.

V28 Kluwick, A.: Gasdynamic flows in the general neighbourhood of the critical point. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia (eingeladen), 09-14-1994.

V29 Kluwick, A.: Steady and unsteady flows of dense gases. Computing Centre of the Russian Academy of Sciences, Moskau (eingeladen), 08-09-1994.

V30 Kluwick, A. Gittler, Ph. & Bodonyi, R.J.: Viscous-inviscid laminar interaction near the trailing tip of an axisymmetric body. International Workshop on Advances in Modelling of Aerodynamic Flows, Miedzyzdroje, Polen, 07-12-1993 - 07-14-1993.

V31 Kluwick, A.: Strömungen realer Gase. Gründungssymposium Euroavia (TU Wien), Wien (eingeladen), 12-11-1992.

V32 Kluwick, A.: Gasdynamik schwerer Gase. Technische Universität Berlin “Seminar für Thermo- und Fluiddynamik”, Berlin (eingeladen), 11-20-1992.

V33 Kluwick, A.: Marginal abgelöste turbulente Grenzschichten. TU Wien Seminar “Nichtlineare dynamische Systeme”, Wien, 10-30-1992.

V34 Kluwick, A.: Transonic nozzle flow of dense gases. ICTAM 1992, Haifa, Israel, 08-22-1992 - 08-28-1992.

V35 Kluwick, A.: Quasi one-dimensional second-sound waves in He II exhibiting mixed nonlinearity. Symposium anlässlich des 80. Geburtstages von Prof. Fiszdon, Warschau, Polen (eingeladen), 06-26-1992.

V36 Kluwick, A.: Introduction to Triple-Deck-Theory of Real Gases. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blackburg, Virginia (eingeladen), 05-27-1992.

V37 Kluwick, A.: Nonclassical dynamics of fluids with high specific heats. 1st EFMC, Cambridge, England (eingeladen), 09-16-1991 - 09-20-1991.

V38 Kluwick, A.: Structure of nonlinear waves in real fluids: effects of boundary layer dissipation, varying cross-section and stratification, nozzle flow. Max Planck Institut, Göttingen (eingeladen), 08-07-1991.

V39 Kluwick, A.: Structure of nonlinear waves in real fluids: weakly nonlinear effects connected with waves and shocks. Max Planck Institut, Göttingen (eingeladen), 08-01-1991.

V40 Kluwick, A.: Axisymmetric laminar interacting boundary layers. 19th Biennial Symposium on Advanced Problems and Methods in Fluid Mechanics, Kozubnik, Polen (eingeladen), 09-03-1989 - 09-08-1989.

V41 Kluwick, A.: Asymptotische Methoden in der Strömungslehre. Antrittsvorlesung an der TU Wien (Band 67, Verlag der TU Wien, 1999), Wien, 12-13-1988.

V42 Kluwick, A.: Weakly nonlinear waves in gases with high specific heats. KTH Stockholm, Stockholm, Norwegen, 12-01-1988.

V43 Kluwick, A.: Quasi-two-dimensional interacting laminar boundary layers. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blackburg, Virginia (eingeladen), 09-15-1987.

V44 Kluwick, A.: Quasi-two-dimensional interacting laminar boundary layers. Ohio State University, Columbus, Ohio (eingeladen), 09-11-1987.

V45 Kluwick, A.: Quasi-two-dimensional interacting laminar boundary layers. The University of Michigan, Ann Arbor, Michigan (eingeladen), 07-27-1987.

V46 Kluwick, A.: Wechselwirkungseffekte bei Grenzschichtströmungen. Universität Stuttgart, Stuttgart (eingeladen), 11-06-1985.

V47 Kluwick, A.: Wechselwirkende Reibungsschichten. TH Darmstadt "Kolloquium über Mechanik", Darmstadt (eingeladen), 05-15-1985.

V48 Kluwick, A.: Wechselwirkende Reibungsschichten. TU Wien "Kolloquium über neuere Arbeiten auf dem Gebiete der Mechanik und Strömungslehre", Wien, 04-19-1985.

V49 Kluwick, A., Bodonyi, R.J. & Smith, F.T.: Zur Struktur der laminaren Grenzschicht in der Nähe der Hinterkante eines schlanken Rotationskörpers. GAMM 1985, Dubrovnik, Jugoslawien, 04-01-1985 - 04-04-1985.

V50 Kluwick, A.: Schwach nichtlineare akustische Wellen mit negativer und positiver Nichtlinearität. Max Planck Institut, Göttingen (eingeladen), 02-28-1985.

V51 Kluwick, A.: Wechselwirkungsvorgänge in laminaren und turbulenten Grenzschichten. DFVLR-AVA "Zentrumskolloquium", Göttingen (eingeladen), 02-28-1985.

V52 Cramer, M.S., Kluwick, A., Watson, L.T. & Pelz, W.: Dissipative nonlinear propagation of waves in fluids having both positive and negative nonlinearity. 37th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics, American Physical Society, Providence, 1984.

V53 Cramer, M.S., Kluwick, A., Watson, L.T. & Pelz, W.: The propagation of viscous, nonlinear waves in fluids having both positive and negative nonlinearity. ICTAM 1984, Lyngby, 1984.

V54 Kluwick, A.: Entry-Flow in Weakly Curved Ducts. The University of Michigan, Ann Arbor, Michigan (eingeladen), 03-29-1983.

V55 Kluwick, A.: On one-dimensional waves in suspensions of particles in fluids. Indiana University Purdue University at Indianapolis, Indianapolis, Indiana (eingeladen), 02-28-1983.

V56 Kluwick, A.: On one-dimensional waves in suspensions of particles in fluids. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia (eingeladen), 02-23-1983.

V57 Kluwick, A.: Entry-Flow in Weakly Curved Ducts. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia (eingeladen), 02-03-1983.

V58 Bodonyi, R.J., Kluwick, A. & Gittler, Ph.: Viscous-inviscid interactions on axisymmetric bodies of revolution in supersonic flow. 36th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics, American Physical Society, Houston/US, 1983.

V59 Cramer, M.S. & Kluwick, A.: Waves in fluids having both positive and negative nonlinearity. 36th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics, American Physical Society, Houston/US, 1983.

V60 Kluwick, A.: Kinematic Waves. Euromech 144: Mechanics of Sedimentation and Fluidised Beds, Wien (eingeladen), 09-14-1981 – 09-16-1981.

V61 Kluwick, A.: On the propagation of non-linear pressure waves in pipes. 9th International Symposium on Nonlinear Acoustics, Leeds, U.K., 07-20-1981 - 07-24-1981.

V62 Kluwick, A. & Bodonyi, R.J.: Die Strömung nahe der Hinterkante einer ebenen Platte im schallnahen Überschallbereich. GAMM 1981, Würzburg, BRD, 04-21-1981 - 04-24-1981.

V63 Kluwick, A.: On kinematic and dynamic waves in liquid films and suspensions of particles in fluids. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia (eingeladen), 05-20-1980.

V64 Kluwick, A.: On kinematic and dynamic waves in liquid films and suspensions of particles in fluids. The University of Michigan, Ann Arbor, Michigan (eingeladen), 04-22-1980.

V65 Kluwick, A.: Wechselwirkungsvorgänge bei laminaren und turbulenten Reibungsschichten. ETH Zürich, Zürich, Schweiz (eingeladen), 02-15-1980.

V66 Kluwick, A.: Wechselwirkungsvorgänge bei laminaren und turbulenten Reibungsschichten. TU Wien "Kolloquium über neuere Arbeiten auf dem Gebiete der Mechanik und Strömungslehre", Wien (eingeladen), 01-23-1979.

V67 Kluwick, A.: Wechselwirkungseffekte bei instationären, laminaren Grenzschichten. Universität Karlsruhe, Karlsruhe (eingeladen), 10-26-1978.

V68 Kluwick, A.: Wechselwirkende laminare Grenzschichten Technische Universität Wien, Wien, 01-18-1978.

V69 Kluwick, A.: Wechselwirkende Reibungsschichten. DFVLR-AVA Göttingen, Göttingen (eingeladen), 06-06-1977.

V70 Kluwick, A. & Bodonyi, R.J.: Freely Interacting Transonic Boundary Layers. Jahrestagung der Amerikanischen Physikalischen Gesellschaft, Eugene, Origon, 11-22-1976 - 11-24-1976.

V71 Kluwick, A.: Shock wave boundary layer interaction. University of Maryland, Maryland (eingeladen), 08-27-1976.

V72 Kluwick, A.: A comparison of three perturbation methods for nonlinear hyperbolic waves. 7th International Symposium on Nonlinear Acoustics, Blacksburg, Virginia, 08-19-1976 - 08-21-1976.

V73 Kluwick, A.: Freely interacting transonic boundary layers. International Workshop on Interacting Boundary Layers, Columbus, Ohio (eingeladen), 08-16-1976 - 08-17-1976.

V74 Kluwick, A.: Nonlinear waves in compressible flow. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blackburg, Virginia (eingeladen), 04-26-1976.

V75 Kluwick, A.: Die Rolle des Leistungssatzes bei der Bestimmung des Strömungswiderstande. Technische Hochschule Aachen, Aachen (eingeladen), 05-20-1974.

V76 Kluwick, A.: Kinematische Wellen. TU Wien "Kolloquium über neuere Arbeiten auf dem Gebiete der Mechanik und Strömungslehre", Wien (eingeladen), 04-24-1974.

V77 Kluwick, A.: Analytische Darstellung von Verdichtungsstößen. TU Wien "Kolloquium über neuere Arbeiten auf dem Gebiete der Mechanik und Strömungslehre", Wien (eingeladen), 10-15-1971.

V78 Kluwick, A.: Analytische Darstellung von Verdichtungsstößen. Technische Hochschule Aachen, Aachen (eingeladen), 10-13-1971.

Betreute Dissertationen

D1 Szeywerth, R.: Triple deck analysis of subsonic flows past expansion ramps and two layer shallow water flows. 2011.

D2 Kornfeld, M.: Weakly three-dimensional transonic laminar flows in slender channels. 2011.

D3 Meyer, G.: Transonic viscous inviscid interactions in narrow channels. 2009.

D4 Grinschgl, Ch.: Einschichtströmung über ein Hindernis. 2005.

D5 Helma, S.: Gasstrahlabstreifverfahren bei kontinuierlichen Beschichtungsverfahren. 2005.

D6 Streibl, B.: Untersuchung zur schallnahen marginalen Ablösung. 2005.

D7 Viertl, N.: Viscous regularisation of weak laminar hydraulic jumps and bores in two-layer shallow water flows. 2005.

D8 Kinell, M.: On a new form of marginal separation in dense gases. 2004.

D9 Kronberger, R.: Mehrdimensionale Simulation transonischer Innenströmungen. 2002.

D10 Scheichl, B.: Asymptotic theory of marginal turbulent separation. 2001.

D11 Exner, A.: Thermally induced separation of free-convection boundary layers. 2000.

D12 Zwinger, T.: Dynamik einer Trockenschneelawine auf beliebig geformten Berghängen. 2000.

D13 Reiterer, M.: Dreidimensionale marginale Ablösung. 1998.

D14 Scheichl, S.: Wellenausbreitungsvorgänge und Turbulenzerscheinung beim Bandgießen. 1998.

D15 Braun, S.: Über den Einfluß des thermischen Expansionskoeffizienten auf die nichtlineare Schallausbreitung in superfluidem Helium. 1997.

D16 Lesching, A.: Ein Trimm- und Leistungsrechenverfahren mit Berücksichtigung der Interferenz zwischen Rotor und Tragflügel für den Vorentwurf von Drehflüglern neuer Technologie. 1995.

D17 Lindner, G.: Berechnung der schallnahen Gitterströmung nach der Theorie kleiner Störungen unter Berücksichtigung der Vorderkantenumströmung. 1993.

D18 Klenner, G.: Untersuchung der Ölströmungen in Torsionsschwingungsdämpfen. 1992.

D19 Hackmüller, G.: Zwei- und dreidimensionale Ablösung von Strömungsgrenzschichten. 1991.

D20 Tran, V.: Berechnung der Ruderkräfte in flachem Wasser. 1991.

D21 Koller, F.: Schallnahe, instationäre Strömung durch Flügelgitter. 1989.

D22 Gittler, Ph.: Dreidimensionale Wechselwirkungsvorgänge bei laminaren Grenzschichten. 1985.

D23 Reif, H.P.: Experimentelle Untersuchung der Reflexion von stationären und instationären schiefen Stößen an laminaren Grenzschichten. 1982.

D24 Stross, N.: Wechselwirkung zwischen einem schwachen Stoß und einer turbulenten Plattengrenzschicht bei reiner Überschallströmung. 1982.

D25 Wohlfart, H.: Theoretische und experimentelle Untersuchung der stationären laminaren inkompressiblen Strömung im Eintrittsbereich kreisförmig gekrümmter Rohre konstanten Querschnittes. 1981.

ISBN 978-3-200-02304-8