

## Forschungsprofil Rupert Klein

### Asymptotik als Beispiel für ein Forschungsparadigma

Im Rahmen seines Maschinenbaustudiums interessierte sich Herr Klein intensiv für die mathematische Beschreibung strömungsmechanischer Vorgänge sowie für die zugehörige Vielfalt mathematischer Lösungsmethoden. Besondere Faszination übte dabei die sogenannte asymptotische Analyse -- kurz "Asymptotik" -- auf ihn aus. Asymptotische Methoden und mehr noch die mit ihnen verbundenen Denk- und Vorgehensweisen ziehen sich denn auch wie ein roter Faden durch seine Forschungsarbeiten. Worin bestehen nun diese Vorgehensweisen?

Umfangreiche, seit langem weitgehend bekannte mathematische Gleichungssysteme beschreiben die Mehrzahl aller strömungsmechanischen Prozesse in großer Allgemeinheit. Diese Gleichungen sind jedoch so komplex, dass sich exakte Lösungen nur in wenigen Spezialfällen angeben lassen. Andererseits begegnen uns in der Praxis vielfältige gut identifizierbare Strömungsphänomene, deren Verhalten wir verstehen und möglichst genau vorhersagen möchten. Prominente Beispiele aus Herrn Kleins Forschung sind Flammenfronten in Verbrennungsmotoren, langgestreckte "schlanke" Wirbel im Windschatten großer Flugzeuge und die Hoch- und Tiefdruckgebiete, deren Entwicklung für den kommenden Tag uns abends im Wetterbericht erläutert wird.

Soll ein Strömungsphänomen so klar erkennbar sein wie eine Flammenfront, ein schlanker Wirbel oder ein Tiefdruckgebiet, so muss es sich von seiner Umgebung in einem zunächst leider nicht klar definierten Sinne "deutlich" abheben. Vielfach geschieht dies dadurch, dass am Ort des Geschehens einige wenige physikalische Prozesse das Strömungsverhalten dominieren, während sie in der übrigen Strömung untergeordnet oder zumindest nicht beherrschend sind. So ist eine Flammenfront gekennzeichnet durch chemische Verbrennungsreaktionen und Diffusionsprozesse als den wichtigsten aktiven Prozessen, die sich in einer eng begrenzten, flächenartigen Struktur -- der Flammenfront -- konzentrieren. In schlanken Wirbeln und Hoch- und Tiefdruckgebieten konzentriert sich die Wirbelstärke, welche ein Maß für die lokale Rotationsgeschwindigkeit eines strömenden Mediums darstellt, auf relativ engem Raum. Die innere Struktur schlanker Wirbel wird dabei durch ein radiales Kräftegleichgewicht zwischen Druck- und Fliehkräften, diejenige der Hoch- und Tiefdruckgebiete durch ein Gleichgewicht von Druck- und Coriolis-Kräften dominiert. Zur Erläuterung: Es sind Coriolis-Kräfte, die eine Eiskunstläuferin bei einer Pirouette schneller und schneller rotieren lassen, wenn sie ihre Arme anzieht. Analog wird auch die Luft der Atmosphäre beschleunigt, wenn sie in unseren Breitengraden z.B. nordwärts strömt und sich dadurch der Erdrotationsachse nähert.

Die Asymptotik bietet das mathematische Handwerkszeug, um zunächst eher vage Begriffe wie "dominant", "relativ enger Raum", "wichtigster Prozess" etc. auch quantitativ zu erfassen und ihre Konsequenzen für die so charakterisierten Strömungen zu analysieren. Sie ist andererseits kein Allheilmittel, welches auf ein Problem schematisch angewendet wird und dann "automatisch" die gewünschten Resultate in Form vereinfachter Gleichungen für ein interessierendes Phänomen und entsprechend vertiefte Einblicke in seine Natur liefert. Vielmehr gehört zur erfolgreichen Konstruktion einer asymptotischen Analyse immer auch ein intuitives Verständnis der betrachteten physikalischen Situation, der relativen Größenordnungen beteiligter Mechanismen und deren charakteristischer Längen- und Zeitskalen. Ein solches Verständnis gewinnt Herr Klein etwa aus der Analyse von Messdaten, aufwändigen Computersimulationen, langem Nachdenken bei einer starken Tasse Kaffee, einer gehörigen Portion mathematisch-wissenschaftlicher Abenteuerlust sowie dem spielerisch probierenden Umgang mit den komplexen Ausgangsgleichungen.

Mehr als die formale Technik der asymptotischen Analyse ist es diese halb systematische, halb intuitive Herangehensweise an wissenschaftliche Problemstellungen, die Herrn Kleins Arbeiten charakterisiert. Intuitiver Einblick in komplizierte, nicht notwendigerweise physikalische Vorgänge, ein lange geschulter Blick für das Wesentliche eines Phänomens und das mathematische

Handwerkszeug, die sich bildenden Erkenntnisse auch in formelmäßiger Klarheit herauszuarbeiten, erlauben es ihm, in sehr verschiedenen Forschungsgebieten erfolgreich tätig zu werden.

So untersuchte er im Rahmen seiner Diplomarbeit unter Prof. Norbert Peters (Technische Mechanik, RWTH Aachen) rein analytisch, wie die vielfache Akkumulation schwacher Druckwellen einen chemischen Zündvorgang beschleunigen und für das Einsetzen klopfender Verbrennung in einem Otto-Motor verantwortlich gemacht werden kann. In seiner Promotionsarbeit eroberte sich Herr Klein moderne (numerische) Berechnungsmethoden zur Simulation schneller Strömungs- und Explosionsvorgänge und studierte, wie eine solche irreguläre Verbrennung extrem starke Druckwellen hervorrufen und so zur Schädigung eines Motors führen kann.

Das Arbeitsgebiet seiner Habilitationsschrift "Zur Dynamik schlanker Wirbel" eröffnete sich Herrn Klein kurz bevor er als "Post-Doc" an das Mathematik-Department der Princeton University ging. Anlässlich eines Jubiläums des Aerodynamischen Instituts der RWTH Aachen besuchte er auf Anregung des Direktors Prof. Egon Krause eine Vorlesungsreihe über

"Viscous Vortical Flows" von Prof. Lu Ting, Courant Institute of Mathematical Sciences, New York University. Die Zusammenstellung der Vorlesungsnotizen in Form einer Monographie bot den Einstieg in eine Reihe weiterführender Arbeiten, die Herr Klein zusammen mit Prof. Andrew Majda, Princeton University, und Prof. Omar Knio, Johns Hopkins University, Baltimore, in Angriff nahm. Hier ging es um die mathematische Beschreibung und Computersimulation langgestreckter Wirbel, wie sie z.B. im Windschatten großer Verkehrsflugzeuge als "Kondensstreifen" beobachtet werden. (Das in den Triebwerken bei der Verbrennung entstehende Wasser kondensiert in den kalten Wirbelkernen. Kalt sind diese, weil in ihnen aufgrund der Fliehkräfte der Wirbelbewegung der Druck und damit auch die Temperatur stark abfallen.)

Parallel entwickelte Herr Klein, zurück am Institut für Technische Mechanik der RWTH Aachen, mit seiner kleinen Arbeitsgruppe neuartige Methoden zur Berechnung von Flammenausbreitungsprozessen. Bei der Entwicklung dieser Methoden wurden wiederum weitreichende analytische Kenntnisse über die mathematische Struktur von Flammen genutzt, um eine hohe Effizienz und Robustheit der Numerik auch in extremen Situationen zu erreichen.

Herrn Kleins Expertise in der Verbrennungssimulation war einer der Gründe für seine Berufung an den Fachbereich Sicherheitstechnik der Bergischen Universität Wuppertal kurz nach Abschluss seiner Habilitation. Man war im Rahmen des Brand- und Explosionsschutzes an diesen Kenntnissen sehr interessiert. Umgekehrt nahm Herr Klein die Gelegenheit dieser Berufung wahr, um sich in einem interdisziplinären Grenzgebiet der Ingenieurwissenschaften kundig zu machen: Die Sicherheitstechnik muss auch die Ergebnisse z.B. aus Psychologie, Medizin und Rechtswissenschaften berücksichtigen, wenn sie Sicherheitsrichtlinien und Sicherheitstechnologien entwickelt.

Umgekehrt qualifizierte dieser interdisziplinäre Abstecher Herrn Klein weiter für seine heutige Doppelaufgabe als Mathematiker an der Freien Universität Berlin und als Abteilungsleiter "Data & Computation" am Potsdam Institut für Klimafolgenforschung. Heute bewegt er sich im Spannungsfeld zwischen der Angewandten Mathematik bzw. des "Scientific Computing" und der anwendungs-orientierten Klimafolgenforschung. Ziel dieses Brückenschlags ist es einerseits, die heute verfügbaren Methoden der Mathematik in der Anwendung zum Tragen zu bringen. Andererseits stellen die komplexen wissenschaftlichen Fragen der Klimafolgenforschung zum Teil ganz neuartige Anforderungen an die mathematische Methodik. In solchen Fällen gilt es, neue Entwicklungen in der Angewandten Mathematik anzustoßen bzw. selbst zu verfolgen.