

ANWENDUNG EINER HOCHGESCHWINDIGKEITSBILDDATENERFASSUNG UND DIGITALEN BILDVERARBEITUNG ZUR BEOBACHTUNG VON STRÖMUNGSPHÄNOMENEN IM HYPERSCHALL

Holger W. Oelze, Hartmut Renken, Hans J. Rath

Universität Bremen, Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation (ZARM)
Am Fallturm, 28359 Bremen, E-mail: oelze@zarm.uni-bremen.de oder renken@zarm.uni-bremen.de

1. ZUSAMMENFASSUNG

Die Anwendung einer digitalen Hochgeschwindigkeitsbilddatenerfassung mit anschließender Bildverarbeitung, angewandt auf den *Bremer Hochschul Hyperschallkanal* (BHHK) ist Gegenstand dieses Beitrags. Die damit verbundene Arbeit stellt ausserdem ein Ergebnis der interdisziplinären Zusammenarbeit zwischen den Bereichen *Aerodynamik* und *Bildverarbeitung* am ZARM-Institut dar. Ein kompatibles Bildaufnehmer- und Bildverarbeitungssystem kommt in der Forschungsgruppe *Verbrennung* des Instituts und bei externen Projektpartnern zum Einsatz [1]. Der BHHK, Kamera- und Bildspeichersystem, sowie die Personal-Computer gestützte Bildverarbeitung werden nachfolgend beschrieben. Ergebnisbetrachtungen an Hand einiger Beispielbilder sowie eine Schlußbetrachtung schließen diesen Beitrag ab.

2. DER BREMER HOCHSCHUL HYPERSCHALL KANAL (BHHK)

Der BHHK basiert auf dem von Ludwieg 1955 vorgestellten Prinzip eines Hochdruck-Speicherrohres [2]. Vom Prinzip her handelt es sich hierbei um einen Druckspeicherkanal, bei dem der Speicherkessel die Form

eines langen Rohres hat. In seiner Arbeit mit dem Titel *Der Rohrwindkanal* schildert Ludwieg, daß auf Grund der Forderung der damaligen Benutzer von Windkanälen nach immer größeren Reynolds- und Machzahlen der Aufbau und der Betrieb der Versuchsanlagen zu enormen Verteuerungen geführt hat. Auf Grund dieser Tatsache, die bis in die heutige Zeit ihre Gültigkeit behalten hat, wurde von ihm ein Vorschlag für einen neuartigen Windkanal unterbreitet, der auch der hier vorgestellten Anlage zu Grunde liegt. Dieser Gedanke wurde von Herrn Priv.-Doz. Dr.-Ing.

G. Koppenwallner Ende der 80iger, Anfang der 90 Jahre aufgegriffen und mündete in dem Entwurf und Aufbau eines *Hochschul Hyperschall Kanals* (HHK). Die am ZARM betriebene Anlage entspricht in ihren wesentlichen Elementen diesem von Herrn Priv.-Doz. Dr.-Ing. G. Koppenwallner entworfenen Konzept. Die im folgenden beschriebene Anlage zeichnet sich neben ihrer einfachen Bedienung auch durch ihren preisgünstigen Betrieb aus, der insbesondere für Hochschulen und Universitäten interessant ist. Die Anordnung der einzelnen Bauelemente dieses Versuchsstandes ist Abb. 1 zu entnehmen. Abb. 2 zeigt den fertigen Versuchsstand aufgebaut in der ZARM 2 Versuchshalle als fotografische Darstellung.

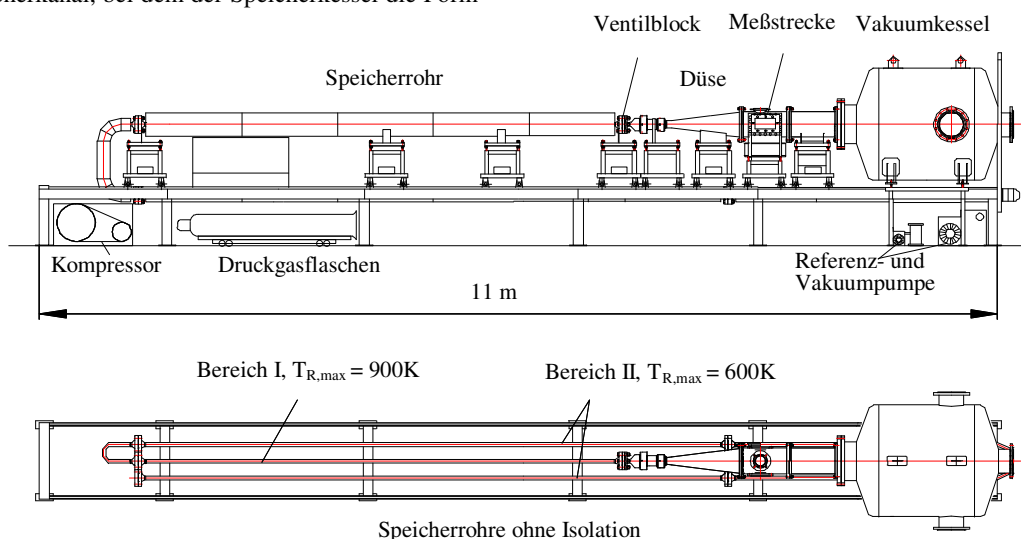


Abb. 1: Aufbauschema des Bremer Hochschul Hyperschall Kanals (BHHK)

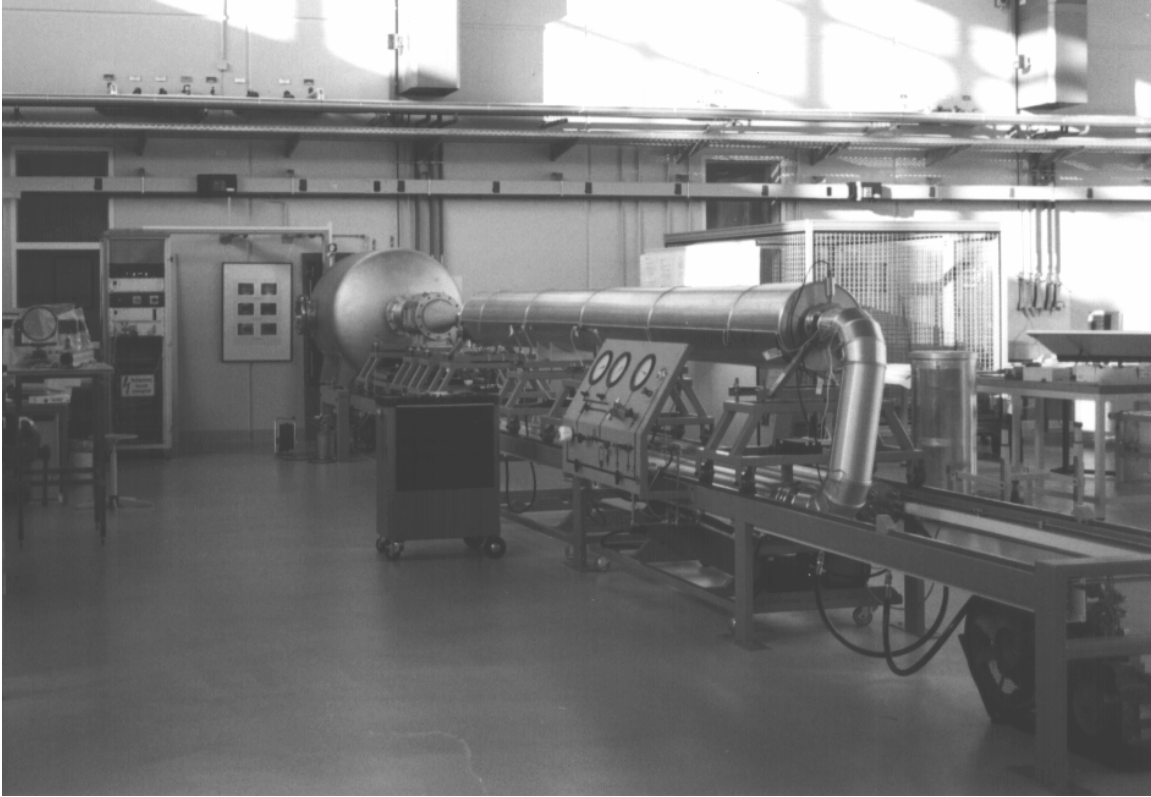


Abb. 2: Der BHHK in der Versuchshalle 2 des ZARM-Instituts

In dem 24 m langen Speicherrohr befindet sich das Testgas unter hohem Druck und hoher Temperatur. Gleichzeitig wird der aus Düse, Meßstrecke, Diffusor und Vakuumkessel bestehende Bereich evakuiert, so daß ein ausreichendes Druckgefälle entsteht, um den Windkanal zu starten. Getrennt sind beide Bereiche durch ein Schnellverschlußventil, über das der Versuch ausgelöst wird. Wird dieses Schnellverschlußventil nun geöffnet, so läuft eine Expansionswelle stromaufwärts in das Speicherrohr und setzt Druck und Temperatur in einem instationären Prozeß herab. Diese Expansionswelle wird am Blindflansch reflektiert und läuft zurück in Richtung des Ventilblocks. Zu diesem Zeitpunkt wird das Ventil wieder geschlossen, um die Restgasmenge - ca. 90% - im Speicherrohr für den nächsten Versuch zu halten. Eine Hin- und Rücklaufsequenz entspricht einer Meßperiode und liegt zwischen 0,08 und 0,13 sec. Das beschleunigte Gas gelangt in die Laval-Düse, erreicht an der engsten Stelle Schallgeschwindigkeit und erzeugt in der Meßstrecke (\varnothing 250 mm) eine stationäre Überschallströmung bis Mach 11. Der Zugang zu der Meßstrecke erfolgt über zwei optische Fenster mit den Abmessungen von 300 mm * 120 mm.

Eine detailliertere Beschreibung der Eigenschaften und des Aufbaus der Anlage ist der Veröffentlichung der Herren Friehmelt, Koppenwallner und Müller-Eigner [3] zu entnehmen.

Für die im BHHK geplanten Forschungsaufgaben ist eine gewisse Grundausstattung an Meß- und Steuertechnik notwendig. Hierzu zählen im jetzigen Ausbaustadium des BHHK die folgenden Einrichtungen:

- Anstellwinkelverstellung
- Pitotdruckmeßfassungssystem zur Kalibrierung der Versuchsanlage
- 32-Kanal Druckerfassungssystem
- Schlierenoptik
- High-Speed Kamerasystem (monochrom)

Auf die beiden letztgenannten Einrichtungen soll im folgenden näher eingegangen werden.

3. SCHLIERENOPTIK

Dichtegradienten in der näheren Umgebung eines zu untersuchenden Versuchskörpers im Hyperschall sind normalerweise sehr groß und können mit Hilfe von geeigneten optischen Systemen beobachtet werden. Obgleich die Art der Informationen, die man erhält, im allgemeinen nur qualitativer Natur sind, gehört ein derartiges Visualisierungssystem heutzutage zur Grundausstattung eines Hyperschallkanals. Dabei wird das *Toepler'sche Schlierensystem* am häufigsten eingesetzt. Beim Toepler'schen Schlierenverfahren, siehe [4] und Abb. 3, befindet sich eine Lichtquelle im Brennpunkt des

Hohlspiegels 1, so daß durch die Meßstrecke des Hyperschallkanals ein paralleles Lichtbündel gelenkt wird. Nachdem das Lichtbündel die Meßstrecke durchlaufen hat, wird es fokussiert und in einer Ebene abgebildet. In den Bereichen, in denen die Dichte schwankt, wird der parallele Lichtstrahl abgelenkt und somit nicht durch den Fokuspunkt laufen. Im Fokuspunkt wird nun eine

Schlierenblende angebracht, die die Strahlen ausblendet, die durch auftretende Dichteveränderungen abgelenkt worden sind. Die Ausblendung dieser Strahlen bewirkt nun eine Veränderung der Lichtintensität, die direkt proportional zu der Dichteänderung in der Meßstrecke ist.

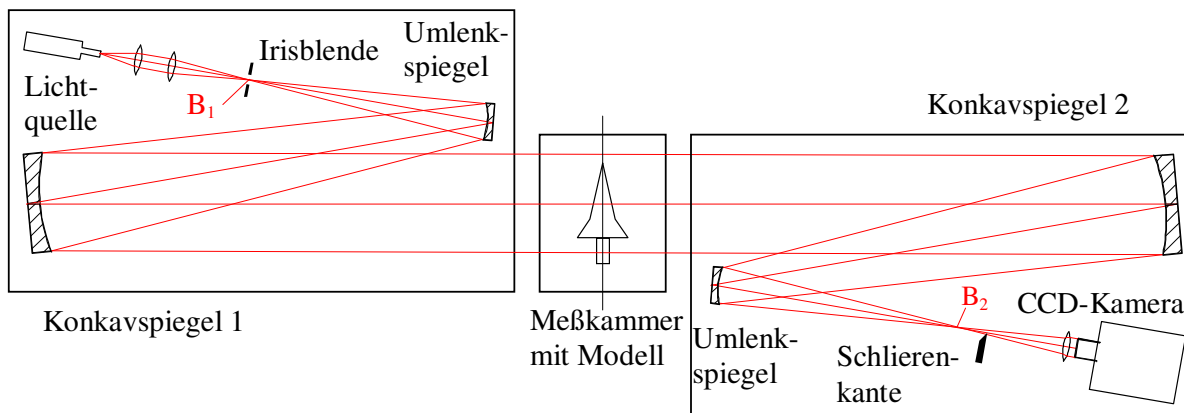


Abb. 3: Strahlengang des Schlierenoptiksystems

4. BILDAUFNEHMERSYSTEM

Bedingt durch die recht kurzen Versuchszeiten von maximal 0,13 Sekunden des BHHKs ergab sich die Notwendigkeit eines Kamera- und Bilddatenerfassungssystems, das wesentlich höhere Bildwiederholraten als konventionelle Videokameras gemäß CCIR-Standard (25 Bilder pro Sekunde) liefert. Somit sollte der reine Schnapschußcharakter innerhalb der kurzen Versuchsdauer vermieden werden. Es wurde daher ein analoges Kamerasystem der Firma DALSA ausgesucht, das bis zu 226 Bilder pro Sekunde liefert und somit in der Lage ist bis zu 30 Bilder unter den Versuchsbedingungen des BHHKs zu liefern. Das Bilddatenformat unterliegt einer festen Ortsauflösung von 256 x 256 Pixeln. Somit ergibt ein zunächst analoger Pixelstrom von 14,8 Mhz, der einem eigenst entwickelten digitalen Bildspeichersystem mit vorgeschaltetem Analog-/Digitalwandler (8 Bit Grauwerttiefe) zugeführt wird. Der separate Bildspeicher umfaßt 16 MByte DRAM Speichertiefe (aufrüstbar bis 96 Mbyte) und kann daher Bildfolgen für maximal ca. 1,1 Sekunden festhalten. Es steht somit neben der eigentlichen Experimentphase unter Hyperschallbedingungen auch genügend zeitlicher Vor- und Nachlauf zur Verfügung, der zur Hintergrund- und Nullbildkalibrierung nützlich sein kann.

Nach der Experimentdurchführung werden die im Bildspeichersystem vorliegenden Bildfolgen über eine SCSI-Interface Kopplung als Datei auf die Festplatte eines Personal-Computers kopiert und stehen somit der Auswertung durch Bildverarbeitungsroutinen (siehe Abschnitt 5) zur Verfügung. Der Speicherinhalt des digitalen DRAM-Bildspeichersystems wird sodann wieder freigegeben - ein neuer Experimentdurchlauf kann

beginnen. Zur letztlich dauerhaften Archivierung der Bildfolgendateien hat sich das Einbrennen der Daten auf CD-ROM bewährt. In Abb. 4 ist das Ablaufschema zur Bilddatenerfassung zusammengefaßt dargestellt.

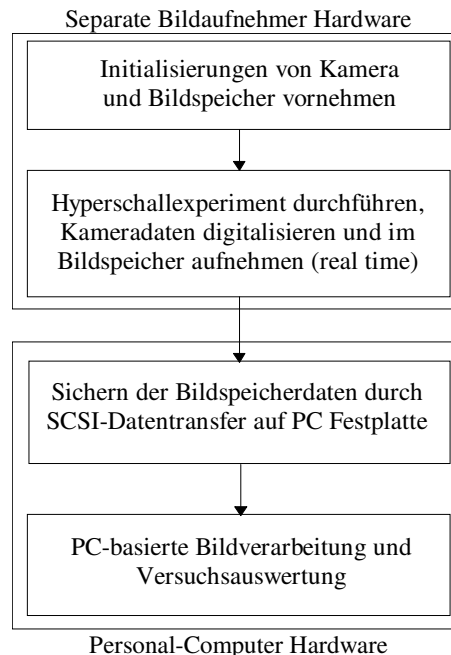


Abb. 4: Ablaufschema der Bilddatenerfassungs- und -verarbeitungskette

Zukünftig wird eine stark vereinfachte und ausschließlich Personal-Computer basierte Bilddatenerfassung vorgenommen, die über einen an die High-Speed Kamera angepassten universellen Frame-Grabber und konventionellen PC-RAM-Speicher bewerkstelligt wird, wie auch in Abb. 5 dargestellt. Durch die moderne PCI-Bus Technik und DMA-Datentransfer kann der PC-RAM-Speicher entsprechend aufgerüstet und als digitaler Filmspeicher genutzt werden. Bei 8 Bit Digitalisierungstiefe kann dann ein Pixelstrom bis zu 43 MHz in Echtzeit erfaßt werden. Mit der Einführung dieser auch in Abb. 5 dargestellten Systemvariante ist im Herbst 1997 zu rechnen.

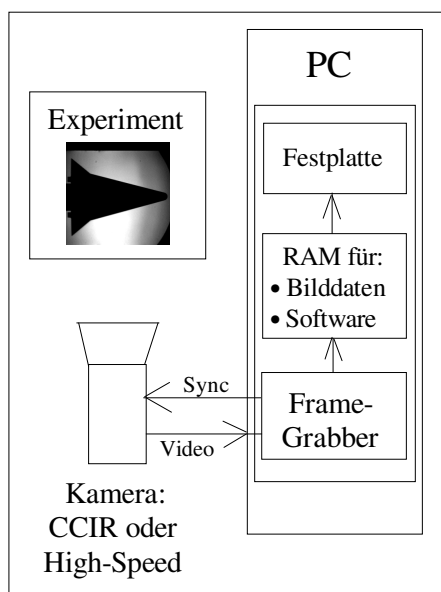


Abb. 5: Zukünftiges ausschließlich Personal Computer basiertes Bilddatenerfassungs- und Verarbeitungssystem

5. BILDVERARBEITUNGSSYSTEM

Mehrere Softwarepakete stehen zur Auswertung der Kameradaten auf Personal-Computer Ebene zur Verfügung: Ein unter dem Betriebssystem DOS arbeitendes Programm *HAMADIMO*, das mit minimalen Systemvoraussetzungen auskommt, stellt die umfangreichste Zusammenstellung aller benötigter Bildverarbeitungsoperatoren und -tools zur Verfügung [5].

Dieses Programm ist parallel zu den Experimentanforderungen dynamisch gewachsen. Ferner steht seit Mitte 1997 das Programm *DIGHSPEED* für den Windows Anwender (32 Bit) zur Verfügung, das neben der Bildverarbeitung in Zukunft auch die Kameraansteuerung und Digitalisierung mittels eines einzigen Softwaresystems übernehmen soll. Dies steht im Kontext zum bereits erwähnten komplett PC-basierten Bilddatenerfassungs- und -verarbeitungssystem und ist so universell ausgelegt, daß Bilddaten von Kameratypen verschiedener Hersteller nach Anpassung des Frame-Grabbers bis zu einem Pixelstrom von 43 MHz erfaßt werden können. Die graphische Oberfläche von *DIGHSPEED* zeigt Abb. 6 an Hand eines Bildverarbeitungsbeispiels.

Als auf ganze Filme anwendbare und wichtigste Bildverarbeitungsfunktionen [6] der beiden Programme sind zu nennen:

- Faltungsoptionen wie: Delta-x, Delta-y, Gauss, Durchschnitts-, Median- und Gradientenfilter sowie, Minimum- und Maximumoperator mit jeweils 3x3, 5x5 und 7x7 Faltungskernen.
- Möglichkeiten zur Modifikation der Grauwertverteilung wie: Histogrammspeizung und -ebnung, zur Kontrastverstärkung, Flächensegmentierung in verschiedene Grauwertbereiche.
- Tools wie: Zoom, Bildrehungen und -spiegelungen, Bitplanebetrachtung, Grauwertprofilvermessung in Spalte und Zeile, geometrische Vermessung, Falschfarbendarstellungen und Einzelbildexport (BMP und TIF).

Jederzeit können neue Prozeduren nach Benutzeranforderung hinzugefügt werden. Beide Programme *HAMADIMO* und *DIGHSPEED* kommen auch bei anderen Projekten des ZARM-Instituts und dessen Projektpartnern zum Einsatz.

Ferner steht eine Software zur Verfügung, welche die Bildinformation und ebenfalls im Experiment gemessene Druckverteilungsmessungen des Meßkörpers zusammenführt, um Verdichtungsstöße quantitativ analysieren zu können.

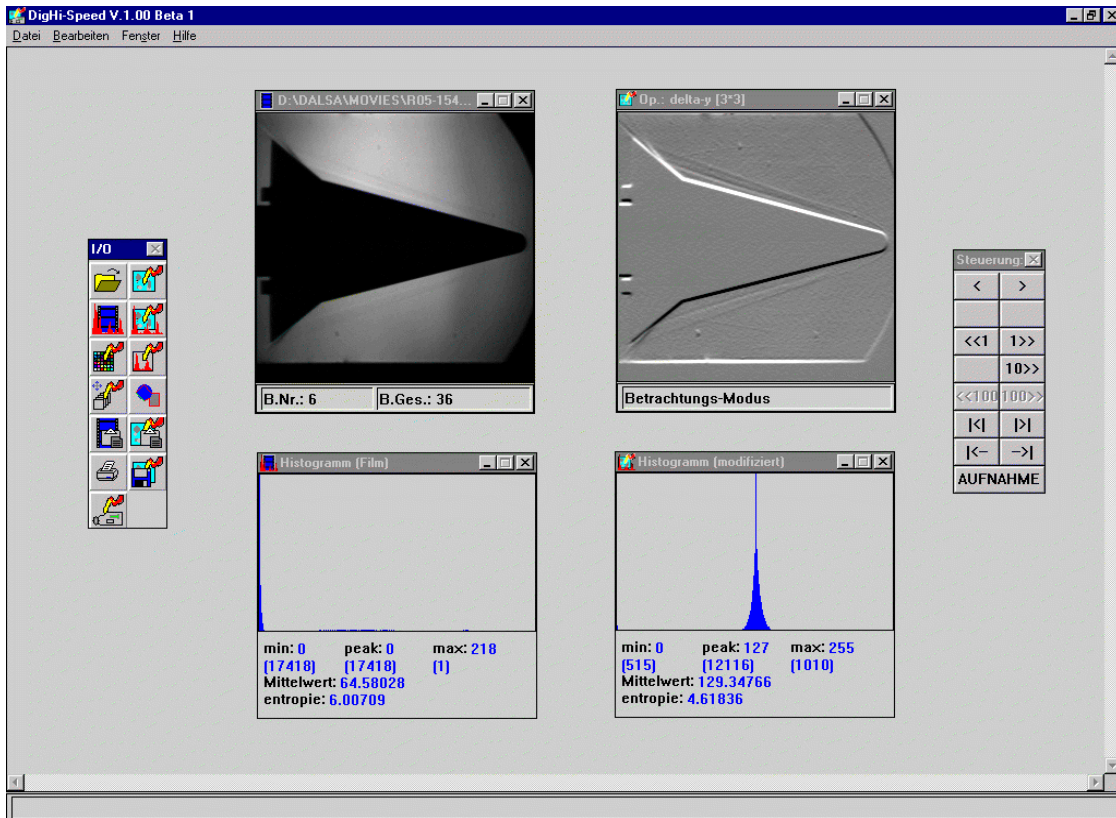


Abb. 6: Graphische Oberfläche der Windows 32 Bit Bildverarbeitungssoftware *DIGHISPEED* mit Anwendung einer Helligkeitsgradientenbildung (3×3 Δ -y Operator)

6. PROBLEMSTELLUNG

Der Strömungsverlauf über Steuerflächen wie Höhenruder und Seitenruder aber auch in Triebwerkseinläufen ist im allgemeinen für Wiedereintritts- und luftatmende Hyperschallfahrzeuge von besonderem Interesse, da die Wechselwirkung zwischen der Grenzschicht und den auftretenden Verdichtungsstößen zu einer reduzierten Ruderwirksamkeit bzw. zu einer geringeren Triebwerksleistung führen kann.

Bei einer dieser zu untersuchenden Problemstellungen handelt es sich um die Ablösung der Grenzschicht in Kompressionsecken, die in den letzten Jahren im Rahmen verschiedener experimenteller und numerischer Arbeiten behandelt worden ist. Im Rahmen der Grundlagenforschung werden dabei sowohl für experimentelle als auch für numerische Untersuchungen einfache geometrische Konfigurationen definiert, die eine ausgeschlagene Kontrollfläche darstellen sollen. Hierbei reicht die Palette der zum Einsatz kommenden Test-Konfigurationen von der einfachen Platte über Kompressionsrampen, achsensymmetrische Hyperboloiden bis zu Deltaflügeln.

Bei der hier vorgestellten Untersuchung wurden sogenannte Doppelkegel ausgewählt, um den Einfluß des Nasenradius zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurde eine Modellreihe von 27 Doppelkegeln generiert, bei der

insgesamt drei Modellparameter in jeweils drei Schritten variiert werden. Bei den drei Parametern handelt es sich neben dem Nasenradius R_N (0mm, 5 mm und 10 mm) um die beiden Kegelwinkel ϑ_1 (10° , 15° und 20°) sowie ϑ_2 (30° , 40° und 50°) [7]. Die Geometrie der Modelle ist an Hand der Abb. 7 dargestellt.

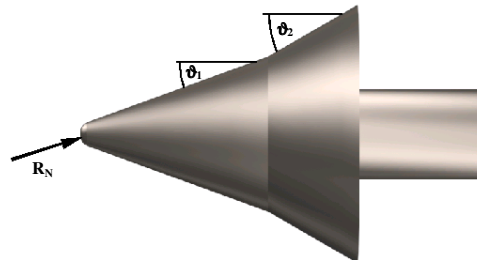


Abb. 7: Nomenklatur des Doppelkegels

Insbesondere wird bei den Untersuchungen auf die Ausbildung des Verdichtungsstoßes und die daraus folgende Strömungsablöseblase an der Kompressionsecke geachtet. Die beiden bei der optischen Analyse des Strömungsverhaltens interessierenden Bereiche sind in der Abb. 8 zu sehen.

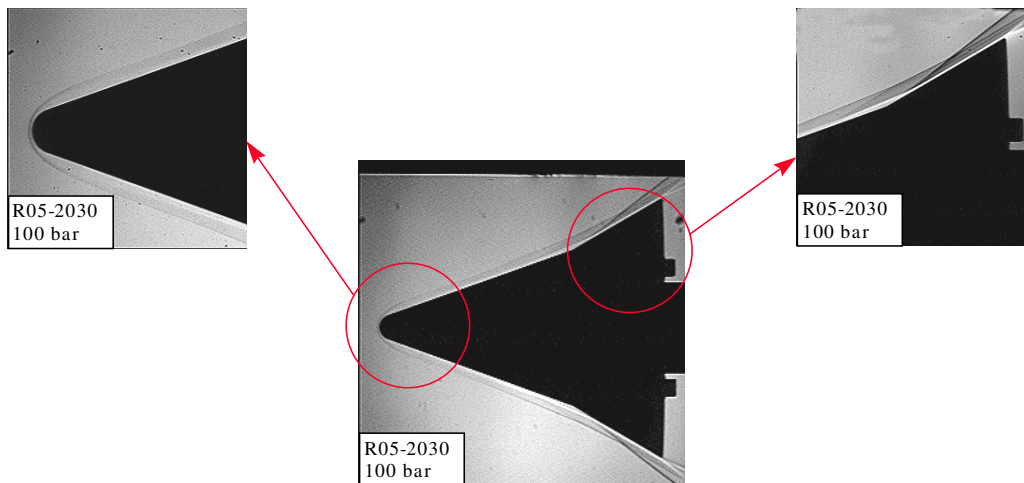


Abb. 8: Strömungsverlauf an der Nase und in der Kompressionsecke der Modelle

7. ERGEBNISBETRACHTUNGEN

Es wurden alle der oben vorgestellten Modelle bei vier verschiedenen Reynoldszahlen untersucht. Es wurde auf Grund der bei einigen Modellen jedoch recht hohen Speerung der Meßstrecke darauf verzichtet, die Modelle mit einem Anstellwinkel zu versehen, da dieses bei einigen Modellen sonst zu einer Blockierung der Versuchsanlage geführt hätte.

Zum Abschluß sollen zwei der mit dem hier vorgestellten System erzielten Aufnahmereihen sowie deren Bearbeitung exemplarisch vorgestellt werden.

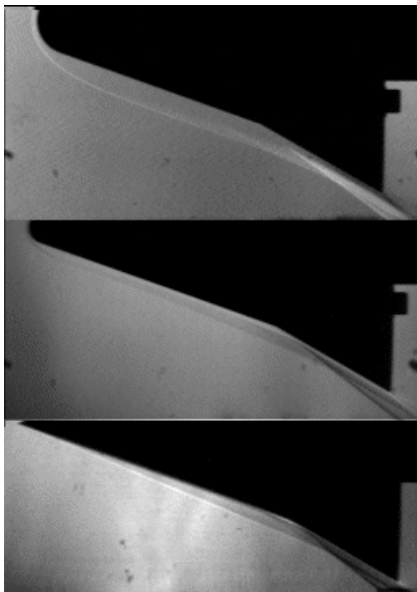


Abb. 9: Modelle der Familie RXX-2030

In Abb. 9 ist der Nasenradius R_N , zwischen 0 und 10mm - von unten nach oben betrachtet - variiert worden. Es handelt sich hierbei um die Modellreihe RXX-2030

($\vartheta_1=20^\circ$; $\vartheta_2=30^\circ$). Man kann sehr gut erkennen, wie die Form des Verdichtungsstosses sich entsprechend der Nasenform ändert und es zu sehr unterschiedlichen Interferenzen am zweiten Kegel kommt.

Die Analyse dieser mit einer Schlierenoptik erzielten Aufnahmen ist im Regelfall recht aufwendig und langwierig. Die Verläufe der Verdichtungsstöße lassen sich jedoch mit den zur Verfügung stehenden Software-Tools entsprechend herausarbeiten, so daß die Analyse der Daten wesentlich vereinfacht wird. Im folgenden Beispiel, in dem die Aufnahmen aus Abb. 9 bearbeitet wurden, wurden die Einzelaufnahmen, mit einem 3×3 *delta-y* Operator bearbeitet.

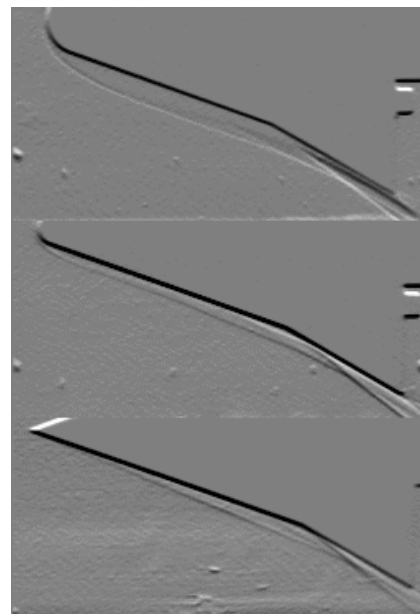


Abb. 10: Modelle der Familie RXX-2030 mit 3×3 *delta-y* Operator bearbeitet

Sehr gut ist zu sehen, daß die in den Originalaufnahmen nur ansatzweise zu erahrenden Verläufe der Verdichtungsstöße sowie deren Interferenzen, jetzt deutlicher zum Vorschein kommen. Es ist offensichtlich, daß mit weiteren Modulen jetzt eine geometrische Bestimmung der Verdichtungsstöße bzw. deren Interferenzen erfolgen kann.

Bei dem zweiten Beispiel wurde die Modellreihe R10-XX40 zusammengestellt. Hier wurde der Winkel ϑ_1 entsprechend der Vorgabe variiert ($\vartheta_1 = 10^\circ, 15^\circ$ und 20°). Der Nasenradius von $R_N = 10\text{mm}$ sowie der Winkel des zweiten Kegels von $\vartheta_1 = 40^\circ$ wurden konstant gehalten. In Abb. 11 sind die unbearbeiteten Aufnahmen zu sehen. Besonders hervorzuheben ist die untere Aufnahme, bei der auf Grund der Modellgeometrie nur ein schwacher Verdichtungsstoß zu sehen ist.

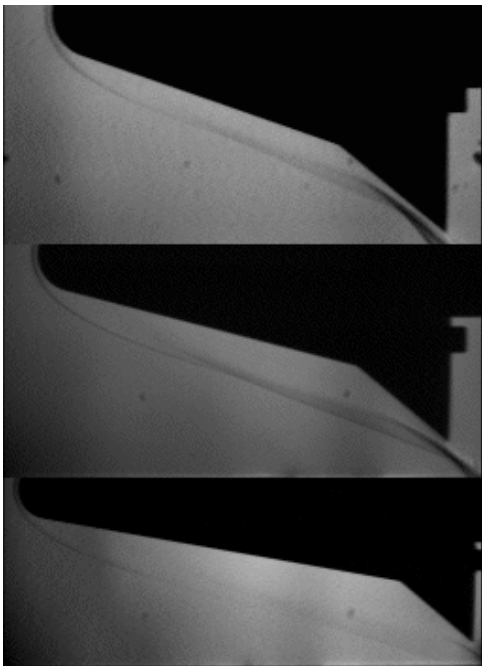


Abb. 11: Modelle der Familie R10-XX40

In der Abb. 12 sind die gleichen Aufnahmen nach der Bearbeitung mit einem 3×3 *delta-y* Operator zu sehen. Der zuvor schon angesprochene schwach ausgeprägte Verdichtungsstoß ist nun sehr gut zu erkennen und dürfte auch bei der weiteren Bearbeitung und Analyse mit anderen Auswerteprogrammen leicht zu bestimmen sein.

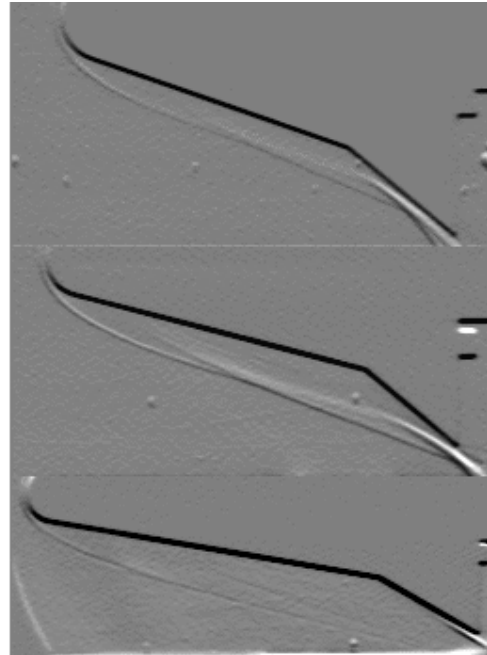


Abb. 12: Modelle der Familie R10-XX40 mit 3×3 *delta-y* Operator bearbeitet

8. SCHLUBBETRACHTUNG UND AUSBLICK

Mit dem am ZARM entwickelten Bilderfassungs- und bearbeitungssystem bestehend aus der High-Speed-Kamera, dem Bildspeichermodul und den verschiedenen, nachgeschalteten Bildverarbeitungsprogrammen wird ein System vorgestellt, das zum einen zwar sehr stark auf individuelle Anforderungen hin entwickelt wurde, jedoch auf Grund seiner Konzeptionierung sehr einfach an die aus den unterschiedlichsten Disziplinen neu herangetragenen Wünsche angepaßt werden kann.

Gegenwärtig wird das System parallel in den Arbeitsgruppen *Aerodynamik* und *Verbrennung* eingesetzt, die sehr unterschiedlichen Fragestellungen nachgehen. Am Beispiel der Fragestellungen aus dem Bereich der Aerodynamik wurden einige Aufnahmen mit einem Tool des Bildverarbeitungsprogramm *DIGHSPEED* bearbeitet und die Vorteile dargestellt. In der Zukunft sollen die bereits existierenden Programme um Module erweitert werden, die es ermöglichen Verdichtungsstöße automatisch zu bestimmen und geometrisch zu vermessen. Zu diesem Zweck gibt es bereits jetzt in dem bestehenden Programm die Möglichkeit Strecken und Winkel unter Berücksichtigung von in der Aufnahme enthaltenen Referenzgrößen zu bestimmen.

9. DANKSAGUNG

Wir danken Marc Antelmann, Axel Bittkau und Bernd Westermann für die Mithilfe bei der Implementierung der Software.

10. LITERATUR

- [1] H. Renken, T. Bolik, C. Eigenbrod, J. König, H. J. Rath: *Application of a Digital High-Speed Camerasystem for Combustion Research by Using UV Laserdiagnostic under Microgravity at Bremen Drop Tower*, SPIE 3018-07, 1996, Santa Fe, NM
- [2] H. Ludwig: *Der Rohrwindkanal*, Zeitschrift für Flugwissenschaften, Vol. 3, 1955, pp 206-216
- [3] H. Friehmelt, G. Koppenwallner, R. Müller-Eigner: *Calibration and First Results of a Redesigned Ludwig Expansion Tube*, AIAA-93-5001, AIAA/DGLR Fifth International Aerospace Planes and Hypersonics Technologies Conference, Munich, 1993
- [4] H. Schardin: *Ergebnisse der Exakten Naturwissenschaften 20*, S. 303 - 449, 1942
- [5] H. Renken: *Kurzanleitung zu HAMADIMO*, ZARM interne Publikation und Programmanleitung, 1997
- [6] B. Jähne: *Digital Image Processing - Concepts, Algorithms and Scientific Applications*, Springer-Verlag, 3. Auflage, 1995
- [7] D. Kumar, J. L. Stollery: *Effects of Leading-Edge Bluntness on Control Flap Effectiveness at Hypersonic Speeds* in *Shock Waves @ Marseille I*, Editors R. Brun and L. Z. Dumitrescu, 1995