

ISSN 0073-8433

PUBLIKATIONEN ZU WISSENSCHAFTLICHEN FILMEN

SEKTION
**TECHNISCHE WISSENSCHAFTEN
NATURWISSENSCHAFTEN**

SERIE 8 · NUMMER 8 · 1983

FILM E 2581

**Stoßwellen in Luft – Ausbreitung von Stoß-
wellen in einem Tunnel mit Verzweigungen**



INSTITUT FÜR DEN WISSENSCHAFTLICHEN FILM · GÖTTINGEN

Angaben zum Film:

Stummfilm, 16 mm, schwarzweiß, 59 m, 5¹/₂ min (24 B/s). Hergestellt 1972, veröffentlicht 1981. Das Filmdokument ist für die Verwendung in Forschung und Hochschulunterricht bestimmt. Die Aufnahmen entstanden durch Ing. (grad.) W. SCHÄTZLE und W. GEHRI am Ernst-Mach-Institut, Freiburg i.Br., Dr. H. REICHENBACH. Bearbeitet und veröffentlicht durch das Institut für den Wissenschaftlichen Film, Göttingen, Ing. G. HUMMEL.

Zitierform:

REICHENBACH, H.: Stoßwellen in Luft – Ausbreitung von Stoßwellen in einem Tunnel mit Verzweigungen. Film E 2581 des IWF, Göttingen 1981. Publikation von H. REICHENBACH, Publ. Wiss. Film., Sekt. Techn. Wiss./Naturw., Ser. 8, Nr. 8/E 2581 (1983), 11 S.

Anschrift des Verfassers der Publikation:

Dr. H. REICHENBACH, Ernst-Mach-Institut, Eckerstraße 4, D-7800 Freiburg i.Br.

PUBLIKATIONEN ZU WISSENSCHAFTLICHEN FILMEN

Sektion BIOLOGIE

Sektion PSYCHOLOGIE · PÄDAGOGIK

Sektion ETHNOLOGIE

Sektion TECHNISCHE WISSENSCHAFTEN

Sektion MEDIZIN

NATURWISSENSCHAFTEN

Sektion GESCHICHTE · PUBLIZISTIK

Herausgeber: H.-K. GALLE · Schriftleitung: E. BETZ, I. SIMON

PUBLIKATIONEN ZU WISSENSCHAFTLICHEN FILMEN sind die schriftliche Ergänzung zu den Filmen des Instituts für den Wissenschaftlichen Film und der Encyclopaedia Cinematographica. Sie enthalten jeweils eine Einführung in das im Film behandelte Thema und die Begleitumstände des Films sowie eine genaue Beschreibung des Filminhalts. Film und Publikation zusammen stellen die wissenschaftliche Veröffentlichung dar.

PUBLIKATIONEN ZU WISSENSCHAFTLICHEN FILMEN werden in deutscher, englischer oder französischer Sprache herausgegeben. Sie erscheinen als Einzelhefte, die in den fachlichen Sektionen zu Serien zusammengefaßt und im Abonnement bezogen werden können. Jede Serie besteht aus mehreren Lieferungen.

Bestellungen und Anfragen an: Institut für den Wissenschaftlichen Film
Nonnenstieg 72 · D-3400 Göttingen
Tel. (0551) 202202

HEINZ REICHENBACH, Freiburg i.Br.:

Film E 2581

Stoßwellen in Luft – Ausbreitung von Stoßwellen in einem Tunnel mit Verzweigungen

Verfasser der Publikation: HEINZ REICHENBACH

Mit 3 Abbildungen

Inhalt des Films:

Stoßwellen in Luft – Ausbreitung von Stoßwellen in einem Tunnel mit Verzweigungen. Der Film macht die Ausbreitung einer Stoßwelle mit der Stoßmachzahl $M_S = 1,48$ (Unterschall-Nachströmung), $M_S = 2,36$ (Überschall-Nachströmung) und $M_S = 1,27$ (Unterschall-Nachströmung) in einem Tunnel sichtbar, der in einem zweiten, unter 60° zum ersten geneigten Tunnel größeren Querschnitts einmündet. Die primären Aufnahmen wurden mit Hilfe einer 24fach-Kamera nach CRANZ-SCHARDIN in einem Stoßwellenrohr hergestellt. Dabei wurden mehrere, zeitlich versetzte Bildserien zu je 24 Einzelbilder des gleichen Vorgangs zu einem Film zusammengesetzt, um den Eindruck eines kontinuierlichen Vorgangs zu vermitteln. Durch mehrfaches Kopieren der Einzelbilder wird der Ablauf so verlangsamt, daß sich auch Details des Beugungsvorgangs erkennen lassen.

Summary of the Film:

Shock Waves in Air – Propagation of Shock Waves in a Tunnel with Bifurcations. The film shows the propagation of shock waves with shock Mach numbers $M_S = 1,48$ (subsonic after-flow), $M_S = 2,36$ (supersonic after-flow) and $M_S = 1,27$ (subsonic after-flow) in a tunnel, which branches at 60° into a second tunnel of larger cross-section. The primary pictures were made in a shock tube using a 24-frame CRANZ-SCHARDIN camera. Several series of 24 pictures, with each series taken at a different time, were made into a film in order to give the impression of a continuous sequence. By copying each pictures several times, the sequence is slowed down so that details of the diffraction process can be observed.

Résumé du Film:

Ondes de choc aériennes – Propagation des ondes de choc dans une galerie comportant des embranchements. Le film visualise la propagation d'une onde de choc à $M_S = 1,48$ (suivie d'un écoulement subsonique), à $M_S = 2,36$ (suivie d'un écoulement supersonique) et à $M_S = 1,27$ (suivie d'un écoulement subsonique) dans une galerie comportant un embranchement sous 60° de section plus grande. Au départ, les prises de vues ont été faites dans un tube à choc au moyen d'une chronoloupe à 24 étincelles d'après CRANZ-SCHARDIN. Pour pouvoir analyser l'ensemble du phénomène, on a réalisé successivement plusieurs séries de 24 images décalées dans le temps et on les a assemblées ensuite pour donner une impression de déroulement continu. Chaque image étant reproduite plusieurs fois, on obtient un ralenti qui permet d'observer en détail les phénomènes de diffraction des ondes.

Allgemeine Vorbemerkungen

Dieser Film macht die Ausbreitung von Stoßwellen in einem Tunnelsystem anhand von Schattenaufnahmen mit der CRANZ-SCHARDIN-Kamera sichtbar. Die Stoßmachzahlen sind so gewählt, daß einmal die Nachströmgeschwindigkeit im Unterschallbereich ($M_2 = 0,58$; bzw. $M_2 = 0,37$) zum anderen im Überschallbereich ($M_2 = 1,14$) liegt. Der Film ergänzt beim Institut für den Wissenschaftlichen Film vorhandene Filme (z.B. Filmveröffentlichungen [6] – [11], die ähnliche Vorgänge zum Thema haben.

Stoßwellen in Luft treten immer dann auf, wenn plötzliche Energiefreisetzen Gasbewegungen auslösen. Beispiele hierfür sind: Detonation eines Sprengstoffs, Bersten eines Behälters unter Überdruck, Funkendurchschlag in Luft u.a. Stets handelt es sich dabei um Störungen *e n d l i c h e r* Größe des thermodynamischen Gleichgewichts im jeweiligen Medium. Während sich Störungen infinitesimal kleiner Amplitude (akustischer Fall) in Luft mit Schallgeschwindigkeit ausbreiten ($c = 330$ m/s bei 0°C), gelten für Stoßwellen kompliziertere Gesetzmäßigkeiten, die durch die Rankine-Hugoniot-Gleichungen beschrieben werden. Einige wesentliche Stoßwelleneigenschaften in gasförmigen Medien seien summarisch erwähnt. Umfassendere Darstellungen findet man in den Lehrbüchern der Gasdynamik, z.B. Lit. [1] – [5].

Stoßwellen besitzen eine steile Front, deren Breite in der Größe der mittleren freien Weglänge der Moleküle liegt. In dieser schmalen Zone ändern sich die thermodynamischen Zustände des Gases, d.h. Druck, Dichte, Temperatur, sprunghaft. Die Front der Stoßwelle breitet sich mit Überschallgeschwindigkeit aus, deren Betrag von der Stoßstärke P_{21} (Verhältnis der Absolutdrücke beiderseits der Stoßfront) abhängt. Die thermodynamischen Zustandsgrößen nehmen mit der Stoßstärke zu. Das von der Stoßwelle erfaßte Medium besitzt eine Geschwindigkeit, die man als Strömungs- oder Partikelgeschwindigkeit bezeichnet. Diese unterscheidet sich prinzipiell von der Stoßfrontgeschwindigkeit. Deshalb existieren zwei verschiedene Machzahlen, die Strömungs- und die Stoßmachzahl¹⁾. Da die eine Stoßwelle auslösende Ursache normalerweise nur über eine kurze Zeitdauer wirksam ist, sind alle Zustandswerte zeitabhängige Funktionen. Es handelt sich demnach bei Stoßwellen um transiente Vorgänge.

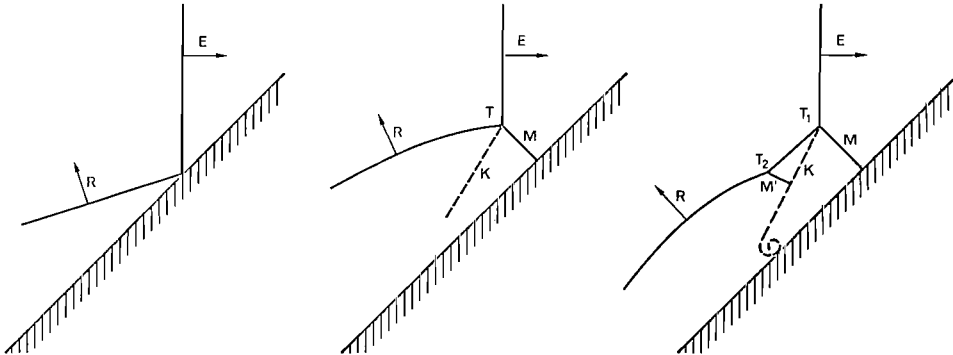
Neben dem hydrodynamischen Druck (Druck in der Strömung, gasdynamischer Zustandswert) tritt infolge der Gasströmung an umströmten Objekten ein Strömungsdruck auf, der auf den dynamischen Druck, $p_d = 1/2 \rho u^2$ (ρ = Dichte; u = Strömungsgeschwindigkeit) bezogen wird. Letzterer ist verantwortlich dafür, daß bei Reflexionen von Stoßwellen an Körperoberflächen wesentlich höhere Drücke auftreten als man nach akustischen Gesetzen erwarten würde. Die Stoßwellenreflexion gehorcht nichtlinearen Gesetzmäßigkeiten; Stoßwellen können nicht linear superponiert werden.

Bei *s e n k r e c h t e r* (normaler) Reflexion einer ebenen Stoßwelle an einer starren ebenen Wand ist grundsätzlich der Reflexionsfaktor $R > 2$ ($R = 2$ akustischer Fall) und erreicht bei extrem intensiven Stoßwellen im Realfall Werte bis etwa $R = 20$.

* Strömungsmachzahl M_2 = Verhältnis der Partikel – zur lokalen Schallgeschwindigkeit
Stoßmachzahl M_S = Verhältnis der Stoßfrontgeschwindigkeit zur Schallgeschwindigkeit im (ruhenden) Medium vor der Stoßfront

Bei schiefer Reflexion einer ebenen Stoßwelle an einer starren Wand (d.h. Winkel zwischen Stoßfront und Reflexionsfläche $\neq 0$) findet man, abhängig vom Winkelbereich und der Stoßstärke verschiedene Reflexionsarten (vgl. Abb. 1), und zwar:

- a) reguläre Reflexion
- b) Mach'sche Reflexion
- c) irreguläre oder doppelte Mach'sche Reflexion.



a) reguläre Reflexion b) Mach'sche Reflexion c) doppelte Mach'sche Reflexion

Abb. 1. Verschiedene Konfigurationen bei schiefer Reflexion von Stoßwellen

E = Einfallende Welle; R = Reflektierte Welle; M, M' = Mach'sche Welle; K = Kontaktfläche; T = Tripelpunkt

Hinter der Stoßfront befindet sich das Gas in Bewegung. Daher treten in diesem Gebiet alle die Vorgänge auf, die man von strömenden Medien kennt, z.B. Verdünnungswellen, Grenzschichten, Strömungsablösung, Wirbelbildung, Sekundärstöße usw. Bei sehr intensiven Stoßwellen können so hohe Gastemperaturen auftreten, daß Anregung, Dissoziation und Ionisation eintreten. In diesen Fällen müssen dann auch Vorgänge plasmaphysikalischer Art berücksichtigt werden.

Treten Stoßwellen in Wechselwirkung mit geometrischen Strukturen, z.B. Eindringen in Kanalsysteme, Auftreffen auf Hindernisse, so spielen sich komplexe Vorgänge ab, die sich meistens einer exakten und oftmals auch einer numerischen Rechnung entziehen. Es ist daher in vielen Fällen angezeigt, die Wechselwirkung kinematographisch sichtbar zu machen, um einerseits die Dynamik darzustellen und andererseits durch quantitative Vermessung Aussagen zu gewinnen, die geeignet sind, die Physik des Vorgangs aufzuklären und Ansätze für mathematische Beschreibungen zu finden.

Zur Entstehung des Films

Vorgeschichte

Um ein solches Vorhaben zu realisieren, bedarf es einer Versuchseinrichtung, die es ermöglicht, im Labor definiert und reproduzierbar Stoßwellen zu erzeugen. Außerdem sind Verfahren vonnöten, die schnell ablaufenden transienten Vorgänge zu visualisieren

und kinematographisch zu erfassen. Im Ernst-Mach-Institut in Freiburg sind diese Voraussetzungen erfüllt. Dort stehen Stoßwellenrohre und Cranz-Schardin-Mehrfachfunktionskameras zur Verfügung.

Versuchstechnik

Ein Stoßwellenrohr, vgl. Abb. 2, besteht aus einem langen Rohr, das durch eine Membran in zwei Kammern geteilt ist, in Kompressionskammer und Expansionskammer, in denen zu Versuchsbeginn unterschiedliche Drücke herrschen ($p_K > p_E$). Platzt die Membran, wobei entweder der Differenzdruck im Rohr den Berstdruck der Membran übersteigt oder das Bersten künstlich eingeleitet wird (z.B. durch Anstechen oder Ansprengen), so expandiert das komprimierte Gas plötzlich in die Expansionskammer. Das dort vorhandene Gas wird nun seinerseits komprimiert. Dabei entsteht eine Stoßwelle mit einer steilen Front und den zuvor beschriebenen Eigenschaften. Um die Stoßwelle beobachten zu können, ist im Expansionsteil eine Meßkammer eingesetzt. Diese besitzt Rechteckquerschnitt und ist mit parallel zur Rohrachse liegenden optisch hochwertigen Scheiben ausgestattet. In diese Meßkammer werden die zu untersuchenden Strukturen eingebaut. Die Abmessungen des Stoßwellenrohres, das für die in den Filmstreifen dargestellten Vorgänge eingesetzt wurde, sind in Abb. 2 angegeben. Mit dieser

Stoßwellenrohr

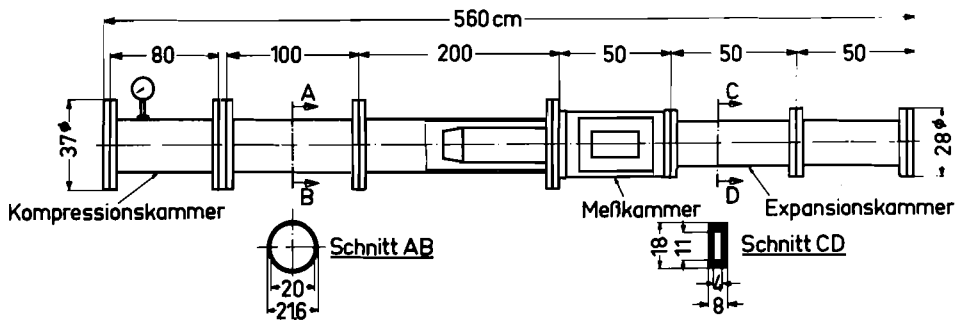


Abb. 2. Stoßwellenrohr

Anlage können Stoßwellen mit Stoßstärken zwischen 1 und 10 erzeugt werden. Zur präzisen Festlegung der Ausgangsbedingungen sind im Rohr empfindliche Drucksensoren eingebaut. Darüberhinaus können über Quarzdruckgeber an verschiedenen Stellen im Rohr und in den Modellen die zeitlichen Druckverläufe erfaßt und auch die notwendigen Triggersignale für die Kamerasteuerung entnommen werden. Zur Registrierung der Meßsignale dienen 12-bit-Transientenrecorder.

Aufnahmetechnik

Zur Erfassung der im Film gezeigten Beispiele wurde die funckenkinematografische Methode nach CRANZ-SCHARDIN benutzt, deren Prinzip in Abb. 3 erläutert ist. Als Lichtquelle dienen 24 räumlich getrennte punktförmige Funkenstrecken (im Bild sind

nur 3 davon eingezeichnet), die nacheinander zu genau definierten, elektronisch gesteuerten Zeitpunkten gezündet werden. Über einen Hohlspiegel werden diese Funkenstrecken auf die 24 Objektive der Kamera abgebildet. Im gemeinsamen Bereich aller 24 Beleuchtungskegel befindet sich die Meßkammer des Stoßwellenrohres.

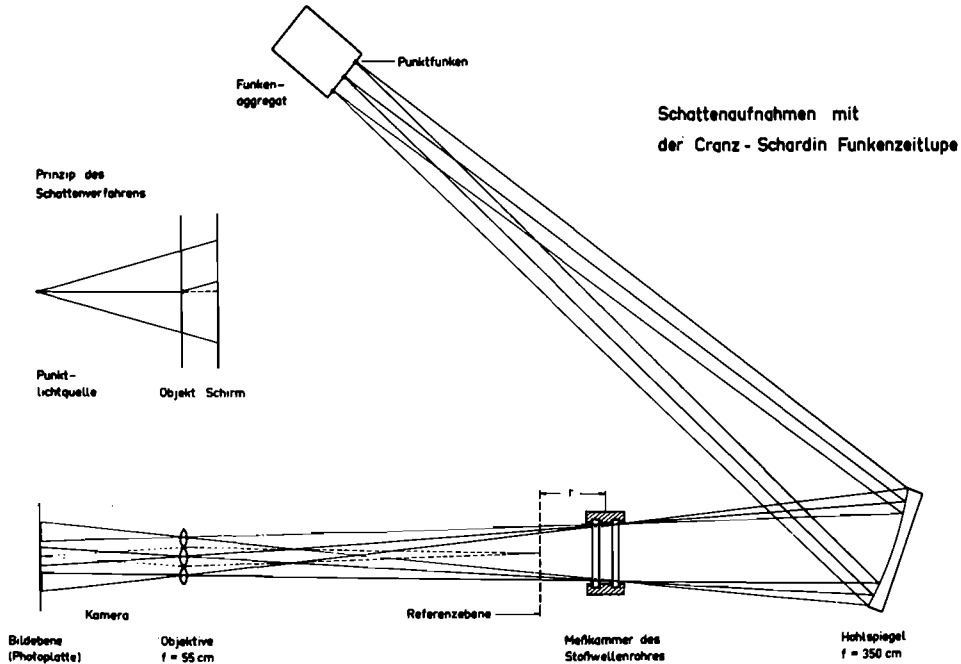


Abb. 3. CRANZ-SCHARDIN Funkenzeitlupe mit Schattenverfahren

Die Objekte sind nicht auf die Meßkammermitte, sondern auf die sog. Referenzebene fokussiert, die um die Strecke r zu jener verschoben ist. Ein Bild dieser Referenzebene auf der Photoplatte entsteht immer dann, wenn ein Funke der Lichtquelle gezündet wird. Durch elektronische Steuerung können die Zündzeitpunkte und damit der zeitliche Abstand der einzelnen Bilder in weiten Grenzen ($1 \text{ s} - 10^{-6} \text{ s}$) gewählt und dem zu beobachtenden Vorgang leicht angepaßt werden. Die Bildbelichtungszeit ist unabhängig von der Bildfrequenz und liegt bei 300 Nanosekunden ($3 \cdot 10^{-7} \text{ s}$).

Durch die gewählte Abbildungsmethode, die man als Schattenverfahren bezeichnet, ist es möglich, z.B. Stoßfronten zu verschiedenen Zeiten im Strömungsfeld sichtbar zu machen. Das Grundprinzip ist in einer Skizze in Abb. 3 erläutert. Das von einer Punktlichtquelle ausgehende Licht beleuchtet einen Schirm gleichmäßig. Befindet sich zwischen Lichtquelle und Schirm ein Objekt mit einer Störung, so wird der durchtretende Lichtstrahl abgelenkt. Er folgt nicht mehr der gestrichelt angegebenen Trajektorie, sondern fällt an einer anderen Stelle auf den Schirm. Die von der Trajektorie getroffene Stelle

des Schirms bleibt dunkel; sie kann direkt der Störung im Objekt zugeordnet werden (Zentralprojektion). Es ist leicht einzusehen, daß die Referenzebene im tatsächlichen Strahlengang und der Schirm in der Skizze einander entsprechen.

Je größer der Referenzebenenabstand r umso empfindlicher wird das Schattenverfahren, aber auch umso mehr nimmt die Bildschärfe der Vorgänge in der Meßkammer ab. Bei Schattenaufnahmen ist es daher wichtig, einen günstigen Kompromiß zwischen Empfindlichkeit und Bildschärfe zu finden.

Überlappungstechnik

Um den Eindruck eines kontinuierlichen Vorgangs zu vermitteln, werden die einzelnen aufeinanderfolgenden 24 Bilder einer Serie jeweils mehrfach kopiert. Außerdem ist es wegen der guten Reproduzierbarkeit der Stoßwellenvorgänge im Stoßrohr möglich, mehrere solcher Serien, die bei Wiederholungsversuchen mit entsprechend später gewähltem Triggersignal für den Bildeinsatzzeitpunkt entstanden, zu einem Film zusammenzustellen.

Filmbeschreibung¹

Stoßmachzahl M_S :	1,48
Stoßstärke P_{21} :	2,40
Strömungsmachzahl M_2 :	0,58
Breite der Meßkammer B :	200 mm

Aufnahmen mit Cranz-Schardin-Kamera 230 Einzelbilder im Abstand von $1,25 \mu s \hat{=} 800\,000 B/s$

Jedes Bild 2fach kopiert

Dauer des Vorgangs 0,3 ms

1. Realaufnahme:

Bildmontage, 2er Schritt mit Stillstand am Beginn und am Ende. Dauer der Einstellung: 19 s

Im horizontal angeordneten Tunnel breitet sich eine Stoßwelle mit $M_S = 1,48$ aus, deren Front durch Schattenverfahren sichtbar gemacht wurde. Die Nachströmgeschwindigkeit liegt im Unterschallbereich.

Sobald die Stoßwelle in den unter einem Winkel von 60° angesetzten Tunnel größeren Querschnitts eintritt, wird sie um die obere Kante gebeugt. Es tritt eine Expansion ein, die mit der Auslösung einer in der Kante zentrierten Verdünnungswelle einhergeht. Die Verdünnungswelle, als helle Linie sichtbar, sorgt für eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit in dem von ihr erfaßten Gebiet im horizontal verlaufenden Tunnel. Die an dessen Wänden entstandene Grenzschicht löst sich zunächst an der oberen, später an der unteren Kante ab. Es bilden sich Spiralwirbel, die in Wechselwirkung mit reflektierten Stoßwellen treten.

Die an dem horizontalen Kanal austretende Stoßwelle wird an der Gegenwand des schräg verlaufenden Tunnel reflektiert. Dabei tritt zunächst reguläre Reflexion, sobald nach einiger Laufzeit der Grenzwinkel überschritten wird, Machsche Reflexion auf. Diese

¹ Die *Kursiv*-Texte entsprechen den Zwischentiteln im Film.

Reflexionsart führt schließlich dazu, daß sich in den Tunnelzweigen ininigem Abstand von der Übergangsstelle eine ebene, senkrecht zu den Tunnelwänden stehende Stoßfront mit Strömungsvektor in Achsrichtung einstellt.

Wiederholung

Jedes Bild 4fach kopiert

2. Realaufnahme:

Bildmontage, 4er Schritt mit Stillstand am Beginn und am Ende. Dauer der Einstellung 39 s

Bei dieser Einstellung können die beschriebenen Effekte genauer verfolgt werden. Besonders das Auftreten der Verdünnungswellen an der oberen und unteren Kante und ihre Ausbreitung stromaufwärts im horizontal liegenden Tunnel können verfolgt werden. Deutlich läßt sich auch die Strömung um die Wirbel indirekt dadurch erkennen, daß die reflektierte Wellenfront in Wirbelnähe deformiert wird.

Stoßmachzahl M_S : 2,36

Stoßstärke P_{21} : 6,30

Strömungsmachzahl M_2 : 1,14

225 Einzelbilder im Abstand von $0,77 \mu s \approx 1\ 300\ 000\ B/s$

Jedes Bild 2fach kopiert

Dauer des Vorgangs 0,2 ms

3. Realaufnahme:

Bildmontage, 2er Schritt mit Stillstand am Beginn und am Ende. Dauer der Einstellung 18,5 s

Im gleichen Tunnelsystem breitet sich eine Stoßwelle mit einer Stoßmachzahl $M_S = 2,36$ aus. Sie läuft mit 1,6fach höherer Geschwindigkeit, da jedoch auch die Bildfrequenz um etwa den gleichen Faktor gegenüber zuvor erhöht wurde, kommt der Geschwindigkeitsunterschied nicht besonders zum Ausdruck. Bei den Versuchsbedingungen dieser Einstellung liegt die Strömungsgeschwindigkeit im Überschallbereich ($M_2 = 1,14$). Daher findet man beim Eintritt der Stoßwelle in die Tunnelverzweigung merkliche Unterschiede im Strömungsfeld. An den Kanten bilden sich sog. Verdünnungsfächer (Prandtl-Meyer-Fächer), die am Ende durch je einen sekundären Stoß abgeschlossen werden. Sekundäre Stöße bilden sich als Grenzflächen zwischen Über- und Unterschallgebieten.

Da die Strömungsgeschwindigkeit im horizontalen Tunnel die Schallgeschwindigkeit übersteigt, kann dort keine Welle stromaufwärts wandern, das Strömungsfeld wird daher von den Vorgängen stromabwärts nicht beeinflußt. Das Phänomen, daß sich in einem Tunnel Stoßwellen mit ebenen Fronten bilden, findet man auch unter den bei dieser Einstellung herrschenden Bedingungen.

Wiederholung

Jedes Bild 4fach kopiert

4. Realaufnahme:

Bildmontage 4er Schritt mit Stillstand am Beginn und am Ende. Dauer der Einstellung 37 s

Der Vorgang läuft mit halber Sequenz. Einzelheiten sind daher im Detail besser zu verfolgen.

Rauchfaden im Tunnel

Stoßmachzahl M_S : 1,27

Stoßstärke P_{21} : 1,70

Strömungsmachzahl M_2 : 0,37

290 Einzelbilder im Abstand von $2 \mu s \cong 500\,000 B/s$

Jedes Bild 2fach kopiert

Dauer des Vorgangs 0,6 ms

5. Realaufnahme:

Bildmontage 2er Schritt mit Stillstand am Beginn und am Ende. Dauer der Einstellung 24 s

Die Stoßmachzahl $M_S = 1,27$ der Stoßwelle hat eine Nachströmung im Unterschallbereich, $M = 0,37$, zur Folge. Daher treten prinzipiell die gleichen Erscheinungen auf, wie sie schon die 1. Einstellung zeigte. Der Unterschied besteht darin, daß diesmal im horizontal liegenden Tunnel, senkrecht zur Beobachtungsrichtung ein Rauchfaden (Zigarettenrauch) vorhanden ist. Dieser setzt sich aus einzelnen Teilchen mit Durchmessern im Bereich von μm ($1/1000$ mm) zusammen und erscheint zunächst als schwarzer Streifen im vorderen Drittel des horizontalen Tunnels.

Sobald die Stoßwelle den Rauchfaden erreicht, setzt sich dieser mit der lokalen Partikelgeschwindigkeit (= Strömungsgeschwindigkeit) in Bewegung. Es ist daher deutlich der Unterschied zwischen Stoßfront- und Nachströmgeschwindigkeit zu sehen. Darüber hinaus wird aber auch die Bewegung des Gaspakets, das mit Rauchteilchen markiert wurde, bei Eintritt in die Tunnelverzweigung erkennbar. So wird z.B. die abgelöste Grenzschicht an den Kanten nicht überschritten. Deutlich kann man die Verteilung in die beiden Tunneläste und das Einströmen in die Wirbel erkennen. Es fällt auch auf, daß die verschiedenen reflektierten Wellen nur verhältnismäßig wenig Einfluß auf die Ausbreitung des markierten Gaspakets haben.

Wiederholung

Jedes Bild 4fach kopiert

Bildmontage 4er Schritt mit Stillstand am Beginn und am Ende. Dauer der Einstellung 48 s

In dieser Einstellung lassen sich die einzelnen Vorgänge, da der Ablauf um Faktor 2 verlangsamt, im Detail besser erkennen.

Literatur

- [1] ABRAMOVITCH, G.N.: Angewandte Gasdynamik. Berlin 1958.
- [2] OSWATITSCH, K.: Gasdynamik. Wien 1952.
- [3] SAUER, R.: Einführung in die theoretische Gasdynamik. Berlin/Göttingen/Heidelberg 1960.
- [4] ZIEREP, J.: Vorlesung über theoretische Gasdynamik. Karlsruhe 1963.
- [5] ZUCROW, M.J., and J.D. HOFFMANN: Gasdynamics. II Bde. New York 1977.

Filmveröffentlichungen

- [6] GÜRKE, G.: Stoßwellen in Luft – Beugung einer Stoßwelle an einem keilförmigen Hindernis. Film E 2580 des IWF, Göttingen 1981. Publikation von H. REICHENBACH, Publ. Wiss. Film., Sekt. Techn. Wiss./Naturw., Ser. 8, Nr. 7/E 2580 (1983), 10 S.
- [7] REICHENBACH, H.: Stoßwellen in Luft – Durchgang einer Stoßwelle durch ein perforiertes Rohr. Film E 2582 des IWF, Göttingen (in Vorbereitung).
- [8] REICHENBACH, H.: Stoßwellen in Luft – Eindringen einer Stoßwelle in einen abgewinkelten Tunnel mit einheitlichem Querschnitt. Film E 2583 des IWF, Göttingen (in Vorbereitung).
- [9] REICHENBACH, H.: Stoßwellen in Luft – Wechselwirkung einer Stoßwelle mit Modellhäusern. Film E 2584 des IWF, Göttingen (in Vorbereitung).
- [10] REICHENBACH, H.: Stoßwellen in Luft – Wirkung von Stoßwellen beim Auftreffen auf Modellwände. Film E 2585 des IWF, Göttingen (in Vorbereitung).
- [11] SCHARDIN, H., und DEUTSCH-FRANZ. FORSCHUNGS-INST': Kinematographische Aufnahmen von Vorgängen im Stoßwellenrohr – Bildfrequenz 400 000/s. Film W 410 im Sonderarchiv des IWF, Göttingen 1958.

Abbildungsnachweis

Abb. 1–3: H. REICHENBACH.