

ISSN 0073-8433

PUBLIKATIONEN ZU WISSENSCHAFTLICHEN FILMEN

SEKTION
**TECHNISCHE WISSENSCHAFTEN
NATURWISSENSCHAFTEN**

SERIE 8 · NUMMER 7 · 1983

FILM E 2580

**Stoßwellen in Luft – Beugung einer Stoß-
welle an einem keilförmigen Hindernis**



INSTITUT FÜR DEN WISSENSCHAFTLICHEN FILM · GÖTTINGEN

Angaben zum Film:

Stummfilm, 16 mm, schwarzweiß, 34 m, 3 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., Dipl.-Phys. G. GÜRKE. Bearbeitet und veröffentlicht durch das Institut für den
Wissenschaftlichen Film, Göttingen, Ing. G. HUMMEL.

Zitierform:

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.

Anschrift des Verfassers der Publikation:

Dr. H. REICHENBACH, Ernst-Mach-Institut, Eckerstr. 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. (05 51) 20 22 02

GERHARD GÜRKE, Freiburg i. Br.:

Film E 2580

Stoßwellen in Luft – Beugung einer Stoßwelle an einem keilförmigen Hindernis

Verfasser der Publikation: HEINZ REICHENBACH, Freiburg i.Br.

Mit 3 Abbildungen

Inhalt des Films:

Stoßwellen in Luft – Beugung einer Stoßwelle an einem keilförmigen Hindernis. Das Phänomen der Beugung einer Stoßwelle der Stoßmachzahl $M_S = 1,5$ wird an einem keilförmigen Hindernis mit einer Handneigung von 45° demonstriert. 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 Einzelbildern 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 – Diffraction of a Shock Wave on a Wedge-Shaped-Obstacle. The diffraction of a shock wave, with a shock Mach number $M_S = 1,5$, on a wedge-shaped obstacle with a slope of 45° is demonstrated. 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 – Diffraction d'une onde de choc sur un obstacle en forme de dièdre. Le phénomène de la diffraction d'une onde de choc à $M_S = 1,5$ est visualisé sur un obstacle en forme de dièdre présentant une face inclinée à 45° . 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 phénomènes de diffraction des ondes.

Allgemeine Vorbemerkungen

Dieser Film macht Phänomene sichtbar, die sich beim Auftreffen von Luftstoßwellen auf Hindernisse einstellen. Er ergänzt beim Institut für den Wissenschaftlichen Film vorhandene Filme (z.B. Filmveröffentlichungen [6] – [11]), die ähnlich geartete 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 *endlich* der 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- und 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, $p_d = 1/2 \rho u^2$ ($\rho =$ 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.

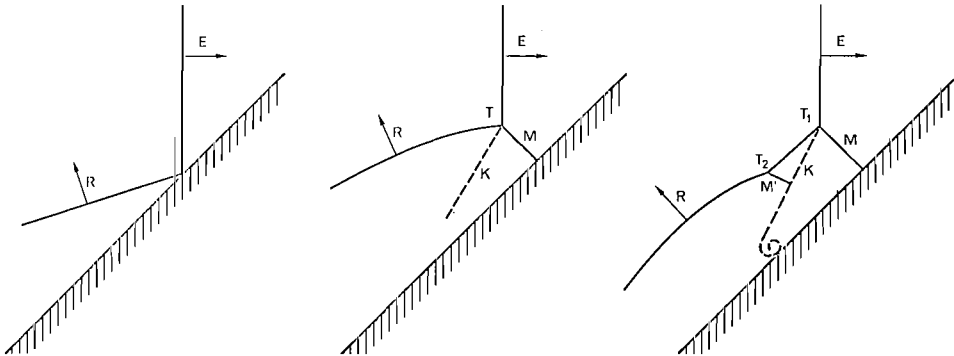
Bei *senkrechter (normaler) Reflexion* einer ebenen Stoßwelle an einer starren ebenen Wand ist grundsätzlich der Reflexionsfaktor $R > 2$ ($R = 2$ akustischer Fall) und erreicht bei extrem intensiven Stoßwellen im Realfall Werte bis etwa $R = 20$.

¹ Strömungsmachzahl M_2
Stoßmachzahl M_S

= Verhältnis der Partikel- zur lokalen Schallgeschwindigkeit
= 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

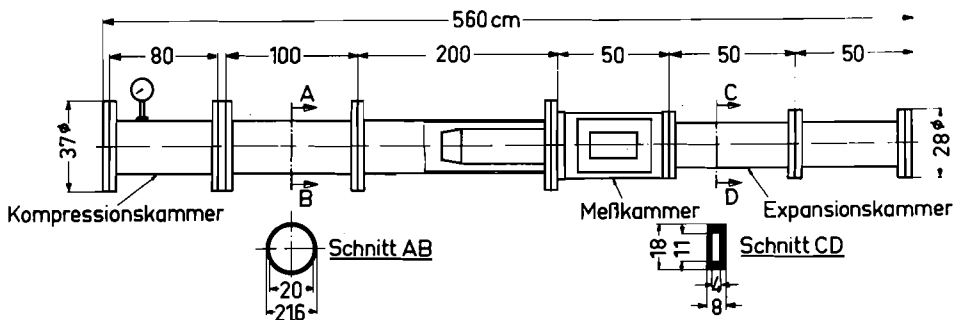


Abb. 2. Stoßwellenrohr

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 funkenkinematografische 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.

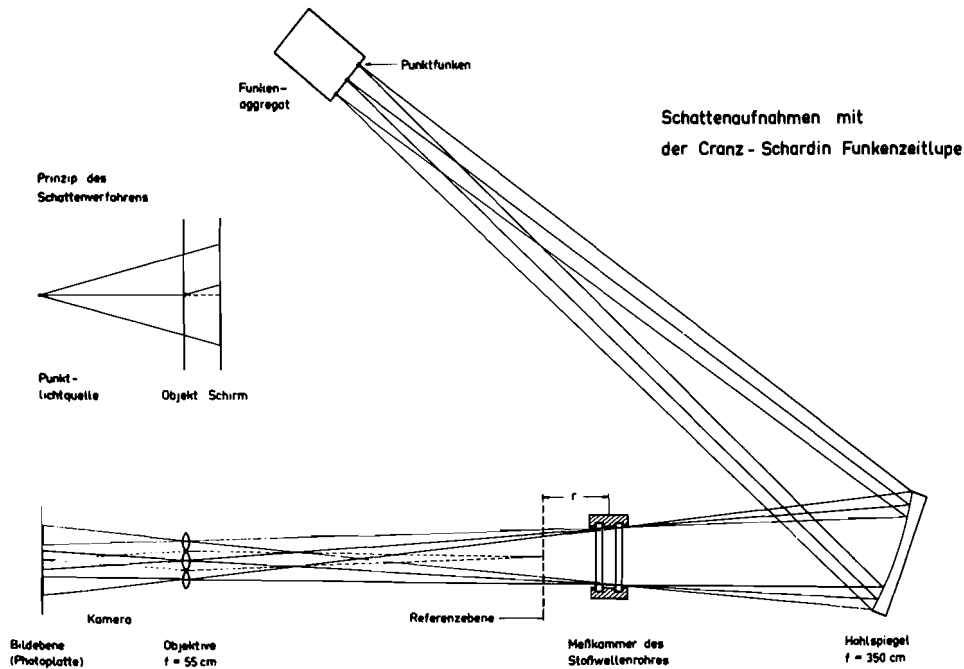


Abb. 3. CRANZ-SCHARDIN Funkenzeitlupe mit Schattenverfahren

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 späterem Triggersignal für den Bildeinsatzzeitpunkt entstanden, zu einem Film zusammenzustellen.

Filmbeschreibung¹

Modellhöhe H :	20 mm
Hangneigung α :	45°
Stoßmachzahl M_S :	1,5
Stoßstärke P_{21} :	2,46
Strömungsmachzahl M_2 :	0,6
Breite der Meßkammer B :	200 mm

Aufnahmen mit der Cranz-Schardin-Kamera 180 Einzelbilder im Abstand von $1,25 \mu\text{s} \cong 800\,000 \text{ B/s}$

Jedes Bild 1fach kopiert

Dauer des Vorgangs 0,2 ms

1. Realaufnahme:

Bildmontage, 1er Schritt mit Stillstand am Beginn und am Ende. Dauer der Einstellung 17 s

Eine Stoßwelle mit $M_S = 1,5$ startet von links und trifft auf ein keilförmiges Hindernis mit einer Hangneigung von $\alpha = 45^\circ$. An der Vorderseite des Keils wird die Welle reflektiert; es findet bei den gewählten Ausgangswerten (M_S, α) reguläre Reflexion statt. Die Wellenfront der reflektierten Welle ist gekrümmt, der Druck hinter ihr höher als hinter der primären Stoßfront.

Sobald die primäre Stoßfront die Keilspitze überschreitet, tritt Beugung der Wellenfront ein; die Stoßfront krümmt sich so, daß sie senkrecht auf die Rückseite des Keils auftrifft. Von der Keilspitze geht mit lokaler Schallgeschwindigkeit eine Verdünnungswelle aus, deren Kopf als helle Linie insbesondere in Richtung stromaufwärts sichtbar ist. Der Teil der primären Stoßfront, der noch nicht durch diese Verdünnungswelle bzw. durch die reflektierte Stoßfront erfaßt ist, besitzt die ursprüngliche Stoßstärke P_{21} . Der von der

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

Verdünnungswelle erfaßte Teil der primären Stoßfront weist eine verminderte Stoßstärke auf, was mit einer geringeren Ausbreitungsgeschwindigkeit verbunden ist und deshalb zur Krümmung der Stoßfront führt.

Da hinter der Stoßfront das Gas eine Strömungsgeschwindigkeit mit wandparallelem Strömungsvektor in unmittelbarer Wandnähe besitzt, entsteht an der Oberfläche des Hindernisses eine Grenzschicht (Zähigkeitseinfluß des Gases). An der Spitze des Keils löst sich die Grenzschicht ab und fließt in Form eines Spiralwirbels ab. Die Ausbreitung dieses Wirbels und seine hohe Rotationsgeschwindigkeit sind deutlich zu erkennen. Sobald Wellenfronten auf diesen Wirbel auftreffen, wird dieser unterbrochen; es treten Knoten auf, die schließlich zur Auflösung des Wirbels führen. Die Rotationsströmung in Wandnähe ist indirekt durch die Verformung der Wellenfronten erkennbar. Sobald die gebeugte Stoßfront auf den Boden hinter dem Hindernis auftrifft, setzt schiefe Reflexion ein; die Bedingungen sind derart, daß man Machsche Reflexion beobachtet.

Da die Stoßstärke der Machschen Welle höher als die der gebeugten Wellenfront ist, breitet sie sich schneller aus als letztere. Nach kurzer Laufstrecke findet man daher hinter dem Hindernis wieder eine nahezu ebene Stoßfront. Messungen ergeben, daß nach einem Laufweg der Stoßwelle, der etwa dem 10fachen der Basisbreite des Keils entspricht, nahezu die gleiche Stoßstärke vorhanden ist, wie sie die primäre Stoßwelle besaß. Das bedeutet, daß bei dem vorliegenden zweidimensionalen Objekt keine wesentliche Dämpfung durch das Hindernis eintritt, solange man sich in genügend weitem Abstand befindet. In der unmittelbaren Umgebung jedoch ist das Druck- und Strömungsfeld erheblich gestört.

Wiederholungen

Jedes Bild 2fach kopiert

2. Realaufnahme:

Bildmontage, 2er Schritt und Stillstand am Beginn und am Ende.

Dauer der Einstellung 20 s

Bei dieser um den Faktor 2 langsameren Wiederholung lassen sich insbesondere die Wirbelbildung, der zwischen Wirbel und Wand entstehende sekundäre Stoß und die Prozesse, die zur Glättung der über das Hindernis hinweglaufenden Stoßfront führen, besser beobachten.

Jedes Bild 4fach kopiert

3. Realaufnahme:

Bildmontage, 4er Schritt mit Stillstand am Beginn und am Ende.

Dauer der Einstellung 35 s

Bei dieser vierfach langsameren Einstellung des Vorgangs können die zuvor beschriebenen Effekte noch genauer verfolgt werden, besonders die Phänomene an der Keilspitze; Beginn der Beugung, Anfangsphase des Spiralwirbels, Auftreten der Verdünnungswelle usw.

Jedes Bild 1fach kopiert

4. Realaufnahme:

Bildmontage 1er Schritt mit Stillstand am Beginn und am Ende. Dauer der Einstellung 15 s

Wiederholung des schnellen Durchlaufs der 1. RA. Nachdem die Einzelheiten des Beugungsablaufes in langsamer Sequenz beobachtet werden konnten, sollte diese Einstellung nochmals die Dynamik des Vorgangs verdeutlichen.

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] REICHENBACH, H.: Stoßwellen in Luft – Ausbreitung von Stoßwellen in einem Tunnel mit Verzweigungen. Film E 2581 des IWF, Göttingen 1980. Publikation von H. Reichenbach, Publ. Wiss. Film., Sekt. Techn. Wiss./Naturw., Ser. 8, Nr. 8/E 2581 (1983), 11 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.