



Spezialgebiete der  
**Gasdynamik**

Schallnähe, Hyperschall,  
Tragflächen, Wellenausbreitung

K. Oswatitsch

Springer-Verlag  
Wien New York



Prof. Dr. KLAUS OSWATITSCH  
Vorstand des Institutes für Strömungslehre  
der Technischen Universität Wien, Österreich,  
Ehemaliger Direktor des Institutes für Theoretische Gasdynamik  
der DFVLR, Aachen, Bundesrepublik Deutschland

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt.  
Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdruckes, der  
Entnahme von Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem  
oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei  
nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten.  
© 1977 by Springer-Verlag/Wien  
Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1977

Library of Congress Cataloging in Publication Data. Oswatitsch, Klaus. Spezialgebiete der Gasdynamik. 1. Aero-  
dynamics. 2. Gas dynamics. I. Title. QA 930.083. 533'.01'51. 77-22302

Mit 161 Abbildungen

ISBN-13:978-3-7091-8441-7      e-ISBN-13:978-3-7091-8440-0  
DOI: 10.1007/978-3-7091-8440-0

## Vorwort

Im Rahmen der Gasdynamik ist eine Reihe von Spezialgebieten entstanden, die in einem allgemeinen Lehrbuch nicht mehr in ausreichender Breite und Tiefe behandelt werden können und denen daher dieser gesonderte Band gewidmet ist. Das Hauptgewicht wird darin auf eine möglichst verständliche Analyse der wichtigsten Phänomene gelegt, nicht aber auf eine vollständige Wiedergabe der gängigen Methoden. Von diesen wird nur die eine oder andere verwendet, im übrigen wird mit einer kurzen Erläuterung auf die Literatur verwiesen.

Bei Steigerung der Machzahlen stationärer Strömungen begegnet man den ersten ernsteren Schwierigkeiten beim gleichzeitigen Auftreten der in ihren Eigenschaften so grundlegend verschiedenen Strömungsformen bei Unter- und Überschallgeschwindigkeit. Im ersten Teil werden daher diese sogenannten schallnahen Strömungen behandelt. Am ausgeprägtesten treten die Probleme hier bei der ebenen, stationären Strömung zutage. Ihr ist daher eine Reihe von Kapiteln gewidmet, wobei die leistungsfähige Rheographenmethode von Sobieczky wiederholt herangezogen wird. Anschließend werden achsensymmetrische und räumliche Strömungen bearbeitet. Dabei findet der Äquivalenzsatz seine besondere Beachtung.

Der zweite Teil umfaßt die Hyperschallströmung, also den Bereich sehr hoher Machzahlen. Die Probleme liegen hier etwas einfacher, da selbst bei stumpfen Körpern in der Newton- und Busemann-Näherung sehr einfache, brauchbare Verfahren zur Verfügung stehen. Für höhere Genauigkeitsansprüche wird die Methode von W. Schneider dargelegt.

Der dritte Teil ist der räumlichen stationären Strömung gewidmet, vor allem den Tragflächen in reiner Unterschall- oder reiner Überschallströmung. Hier kann die lineare gasdynamische Gleichung mit den dazugehörigen Singularitätenmethoden angewendet werden. Die wesentliche Entwicklung erfolgte hier bereits vor rund 30 Jahren. Größere Teile der Darstellung sind dem älteren Buch [•11] entnommen. Die Hauptaufgabe in diesem Gebiet besteht in der Entwicklung des erforderlichen mathematischen Rüstzeuges. Die Behandlung der Tragflächen in Überschallströmung führt bereits zu Problemen der räumlichen Wellenausbreitung und damit zu Problemen, wie sie ausführlicher im letzten Teil behandelt werden.

Während in der Aerodynamik der Tragflächen und somit im vorangegangenen Teil im wesentlichen die Geschwindigkeits- und Druckverteilungen auf der Flügeloberfläche interessieren, werden in der ersten Hälfte des vierten Buchteiles die stehenden Wellen behandelt, die an einem mit Überschallgeschwindigkeit angeblasenen Flügel im Raume auftreten. Dies führt bereits im Linearisierungsgebiet der gasdynamischen Gleichung zu interessanten Aufgaben, die mittels der Gauß-

schen Flächentheorie gelöst werden. Zur richtigen Darstellung der Wellenfronten in größerer Entfernung vom Flügel und — bei schallnahen Kanten — selbst in unmittelbarer Kantenumgebung muß über die lineare akustische Theorie hinausgegangen werden. Zur Lösung wird hier und im folgenden das analytische Charakteristikenverfahren herangezogen. Die zweite Hälfte des vierten Teiles ist den instationären Wellenausbreitungsvorgängen bei zwei räumlichen Veränderlichen gewidmet, also instationären Wellen bei ebener oder achsensymmetrischer Strömung. Dazu muß zunächst die akustische Theorie hergeleitet werden. Abschließend werden mittels der analytischen Charakteristikentheorie typische Beispiele beim Auftreten schwacher instationärer Stöße behandelt. Die Berechnung allgemeiner flächenförmiger Wellenfronten in diesem Teil ist in der Buchliteratur wohl neu.

Die Darstellung wurde so gewählt, daß das Werk auch ohne mein Grundlagenbuch, [·13], verwendet werden kann. Auf S. 369 und 370 sind die erforderlichen Gleichungen aus [·13] zusammengestellt, die in ähnlicher Weise aber auch in den anderen Fachbüchern zu finden sind.

Nicht aufgenommen wurden die Vorgänge der Reibungsschichten und des Wärmeüberganges. Diese werden besser gemeinsam mit den entsprechenden eng verwandten Problemen der inkompressiblen Strömung in eigenen Lehrbüchern behandelt. Im Buchverzeichnis von [·13] sind einige dieser Fachbücher erwähnt: [·18], [·26], [·40], [·45]. Auch für das ausgedehnte Gebiet des Flügelflatterns sei auf Spezialwerke verwiesen, die unter Umständen auch die Fragen der Aeroelastizität mit umfassen, [·2], [·6], [·10], [·21]. Selbst im Themenkreis des vorliegenden Werkes war eine gewisse Umfangsbeschränkung erforderlich. Zur Ergänzung sind auf S. 371 — 373 weitere einschlägige Spezialwerke zitiert.

Es bedarf wohl kaum einer Erwähnung, daß ich verschiedene Teile des Buches erst nach intensiver Diskussion mit Mitarbeitern geschrieben habe. Dies kommt in entsprechender Namensnennung im Text zum Ausdruck. Vorweg habe ich aber dem Verlag und vor allem seinem Leiter, Direktor Dr. W. Schwabl, für das verständnisvolle Eingehen auf meine Wünsche und für die ausgezeichnete Ausstattung des Werkes zu danken. Von meinen ständigen Mitarbeitern möchte ich wie im vorangegangenen Werk vor allem jenen danken, die die verantwortungsvolle Aufgabe der Korrektur auf sich genommen haben, nämlich Dr. W. Koch, Dr. P. Niederdrenk, Dr. H. S. Schwarze und Dipl.-Math. R. Schwarzenberger.

Mein ganz besonderer Dank richtet sich aber wieder an meinen Wiener Mitarbeiter Dipl.-Ing. M. Horvat, der abermals die Redaktion in selbständiger Weise übernommen und mich in vielen Details beraten hat. Er hat zum erfolgreichen Abschluß der „Grundlagen“ wie der „Spezialgebiete“ der Gasdynamik einen entscheidenden Beitrag geliefert.

Wien, im Sommer 1977

KLAUS OSWATITSCH

# Inhaltsverzeichnis

<b>I. Stationäre, reibungsfreie, schallnahe Strömung</b> . . . . .	<b>1</b>
1. Vorbemerkung . . . . .	1
2. Überblick über das Umströmungsproblem, Einflüsse und Abhängigkeiten . . . . .	2
3. Entwicklungen in Schallnähe . . . . .	10
4. Die gasdynamische Gleichung für kleine Störungen . . . . .	18
5. Kleine Streckung in Schallnähe . . . . .	21
6. Darstellungen in Störvariablen . . . . .	22
7. Ähnlichkeitsgesetz für Profile und Flügel . . . . .	26
8. Widerstand, Entropie, höhere Näherungen . . . . .	31
9. Symmetrie-Eigenschaften der Lösungen . . . . .	35
10. Ähnlichkeitsgesetz für Rotationsrumpfe . . . . .	38
11. Schallnahe Überschallanströmung am Kreiskegel . . . . .	44
12. Exakte Lösungen . . . . .	48
13. Lösungen im Rheographen . . . . .	50
14. Lokales Überschallgebiet ohne und mit Stoß . . . . .	58
15. Profil bei Schallanströmung . . . . .	63
16. Die Stoßpolare in der Rheographenebene . . . . .	67
17. Profil bei geringer Überschallgeschwindigkeit . . . . .	69
18. Machzahlabhängigkeit des Widerstandes, Einfrieren . . . . .	75
19. Konvexe Ecken bei Unterschallanströmung . . . . .	78
20. Gabelstöße . . . . .	81
21. Abklingen im Raume bei Schallanströmung . . . . .	83
22. Aufsetzen des senkrechten Stoßes auf gekrümmter Wand . . . . .	84
23. Einflüsse auf Stöße durch stromabwärtsgelegene Störungen . . . . .	89
24. Machreflexion . . . . .	91
25. Düsenströmung . . . . .	94
26. Näherung durch die parabolische Differentialgleichung . . . . .	98
27. Integralgleichung für schallnahe Umströmung von Profilen . . . . .	105
28. Näherungsweise Lösung der Integralgleichung . . . . .	113
29. Numerisches Verfahren von Murman und Cole . . . . .	119
30. Verfahren von Garabedian und Korn . . . . .	122
31. Äquivalenzsatz . . . . .	124
32. Flächenregeln . . . . .	134
33. Ähnlichkeitsgesetze für Flügel kleiner Streckung . . . . .	140
Literatur . . . . .	144
<b>II. Hyperschallströmung</b> . . . . .	<b>147</b>
1. Vorbemerkung . . . . .	147
2. Eigenschaften der Hyperschallumströmung, kleine Richtungsstörungen . . . . .	151
3. Verträglichkeitsbedingungen und Neigungsbedingungen bei reiner hoher Hyperschallströmung . . . . .	155
4. Starke schiefe Verdichtungsstöße . . . . .	159
5. Machzahlunabhängigkeit im Hyperschall-Limes . . . . .	163
6. Ähnlichkeitsgesetze . . . . .	167

7. Analogie zur instationären Wellenausbreitung . . . . .	173
8. Prandtl-Meyer-Expansion, endlicher Keil in hoher Hyperschallströmung . . . . .	175
9. Profilkrümmung an der Vorderkante . . . . .	178
10. Charakteristikenverfahren für hohe Hyperschallströmung . . . . .	180
11. Näherungen durch analytische Charakteristiken-Theorie . . . . .	183
12. Newton-Näherung, Busemann-Korrektur . . . . .	185
13. Näherung von W. Schneider . . . . .	190
14. Hyperschall-Nachlauf . . . . .	197
15. Räumliche Hyperschallströmungen . . . . .	201
Literatur . . . . .	203
<b>III. Stationäre Strömung um Flügel endlicher Spannweite . . . . .</b>	<b>204</b>
1. Vorbemerkung . . . . .	204
2. Die Unterschallströmung an flachen symmetrischen Körpern . . . . .	204
3. Einige typische Beispiele zum Dickenproblem . . . . .	207
4. Wirbelband und Wirbelsätze . . . . .	212
5. Integralgleichung der tragenden Fläche in Unterschallströmung . . . . .	214
6. Auftrieb und induzierter Widerstand . . . . .	217
7. Flügel großer und kleiner Streckung . . . . .	220
8. Einflüsse und Abhängigkeiten bei Überschallströmung . . . . .	226
9. Überschallströmung an flachen Körpern ohne Kantenumströmung . . . . .	229
10. Umformung auf spezielle Machebenen . . . . .	233
11. Gleichungen für kegelige Strömung . . . . .	235
12. Nichtangestellte kegelige Körper mit Unterschallvorderkanten . . . . .	240
13. Tragendes Dreieck mit Unterschallkanten . . . . .	242
14. Flügel ohne Kantenumströmung . . . . .	246
15. Integralgleichung der tragenden Fläche in Überschallströmung . . . . .	253
16. Tragende Fläche mit teilweise umströmter Vorderkante . . . . .	255
17. Näherungen für Flügel mit Unterschallvorderkanten . . . . .	259
18. Verallgemeinerungen durch Transformation . . . . .	261
19. Verallgemeinerung durch Superposition . . . . .	264
Literatur . . . . .	265
<b>IV. Räumliche und zeitliche Wellenausbreitung . . . . .</b>	<b>267</b>
1. Vorbemerkung . . . . .	267
2. Stationäre Wellenfronten, allgemeine Gleichungen . . . . .	268
3. Akustische Wellenfronten . . . . .	275
4. Störtheorie stationärer Wellenfronten . . . . .	280
5. Fronten schwacher stationärer Stöße . . . . .	283
6. Differentialgleichungen in Störkoordinaten . . . . .	289
7. Schallkanten . . . . .	291
8. Übergang zu Überschallkanten . . . . .	300
9. Flügel mit Kantenumströmung . . . . .	310
10. Verallgemeinerte Prandtl-Meyer-Expansion . . . . .	312
11. Charakteristiken-Grenzfläche der ebenen Prandtl-Meyer-Expansion . . . . .	318
12. Nah- und Fernfeld eines Flügels, Überschallknall . . . . .	323
13. Potentialgleichungen für instationäre, räumliche Vorgänge . . . . .	329
14. Einige singuläre Lösungen . . . . .	331
15. Räumliche instationäre Strömungen in akustischer Näherung . . . . .	332
16. Randbedingungen, Integrationsgrenzen . . . . .	335
17. Ungleichförmig bewegte räumliche Quelle . . . . .	339
18. Allgemeine Gleichungen für instationäre Wellenfronten . . . . .	341
19. Akustische Wellenfronten, Beispiele . . . . .	343

20. Störtheorie instationärer Wellenfronten . . . . .	348
21. Fronten schwacher instationärer Stöße . . . . .	350
22. Überschallströmung an einer plötzlich angestellten Platte . . . . .	352
23. Ablösung der Kopfwelle bei verzögertem Überschallflug. . . . .	355
Literatur . . . . .	357
Tabellen . . . . .	359
Integrale und Integralsätze . . . . .	365
Gleichungen aus [·13], K. Oswatitsch, Grundlagen der Gasdynamik . . . . .	369
Bücher . . . . .	371
Monographieartikel, Symposiumsbände . . . . .	372
<b>Namen- und Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>374</b>