

BASISWISSEN

STATIONÄRE STRÖMUNG KOMPRESSIBLER FLUIDE

STRÖMUNG MIT ÄNDERUNG DES VOLUMENS

Bei Gasen unterscheidet man die Strömung mit konstantem Volumen (inkompressibel) und die mit Änderung des Volumens (kompressibel). Bei der inkompressiblen Strömung von Gasen werden die Strömungsvorgänge wie bei der Strömung einer Flüssigkeit betrachtet.

Bei größeren Druck- und Temperaturänderungen des gasförmigen Fluids dürfen die gesetzmäßigen Zusammenhänge zwischen Druck, Temperatur und Volumen nicht mehr vernachlässigt werden. Diese Strömung wird als kompressibel bezeichnet. Hier gilt bei idealen Gasen die Beziehung

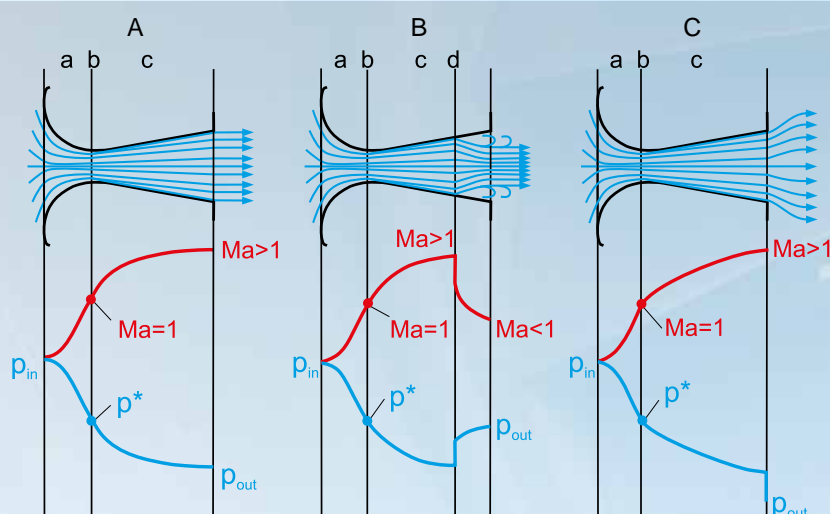
$$p \cdot V = m \cdot R \cdot T$$

In diesem Zusammenhang wird oft der Begriff „kompressible Strömung“ benutzt, wobei hier das Fluid kompressibel ist, nicht die Strömung.

Wenn die Geschwindigkeit einer Gasströmung größer als $Ma\ 0,3$ ist, muss sie als kompressibel betrachtet werden. Bei Luft entspricht dies etwa 100m/s bei 1 bar und 0°C. Die hier auftretenden dynamischen Drücke in der Strömung entsprechen max. 60mbar.

Unterhalb dieser Grenzwerte kann eine Gasströmung mit guter Näherung als inkompressibles Fluid betrachtet werden. Die Strömung in einem Gebläse oder die Umströmung eines PKW beispielsweise kann als inkompressibel angesehen werden. Bei Turboverdichtern, Gas- und Dampfturbinen, Düsen, schnellen Flugzeugen oder Raketen hingegen muss die Strömung als kompressibel betrachtet werden.

KOMPRESSIBLE STRÖMUNG IN DER TECHNIK



Strömungen durch eine konvergent-divergente Düse (Laval-Düse) bei verschiedenen Gegendrücken

A „angepasste“ Düse mit optimalem Druckverhältnis.

Am Düsenaustritt herrscht Überschallgeschwindigkeit.

B Verdichtungsstoß erfolgt im divergenten Bereich der Düse, danach stellt sich Unterschallgeschwindigkeit ein. Es kommt zu Strömungsverlusten infolge von Strömungsablösung.

C Nachexpansion mit Strahlausbreitung hinter dem Düsenaustritt. Es kommt zu Strömungsverlusten.

a konvergenter Bereich, **b** engster Querschnitt,

c divergenter Bereich, **d** Verdichtungsstoß,

p* kritischer Druck, **Ma** Machzahl,

rot Geschwindigkeitsverlauf, **blau** Druckverlauf

Kompressible Strömungen spielen bei der Umwandlung von Wärmegefälle in kinetische Energie bei thermischen Strömungsmaschinen eine große Rolle. Die Umwandlung erfolgt durch die Ausströmung eines Gases in Leitapparaten oder Düsen. Bei hohen Druckdifferenzen kann die Strömung Schallgeschwindigkeit erreichen oder sogar überschreiten.

Zur Erzeugung von Überschallgeschwindigkeiten werden so genannte Lavaldüsen verwendet.

Im ersten, konvergenten Teil wird die Strömung auf Schallgeschwindigkeit gebracht, im zweiten, divergenten Teil wird die Strömung durch weitere Entspannung auf Überschall beschleunigt. Dabei wird der Durchfluss durch die Düse durch die Schallgeschwindigkeit im engsten Querschnitt bestimmt. Für den konvergenten Teil der Düse gilt: im engsten Querschnitt der Düse erreicht die Geschwindigkeit des Fluids die Schallgeschwindigkeit. Das Druckverhältnis an diesem Punkt wird als kritisch bezeichnet. Beim Einsetzen des kritischen Druckverhältnisses wird der maximale Massenstrom erreicht.

Bei zu hohen Gegendrücken kann im divergenten Teil der Düse ein Verdichtungsstoß entstehen, so dass der Rest der Düse als Unterschalldiffusor arbeitet und der Druck wieder ansteigt.

ÜBERSCHALLSTRÖMUNG

Überschallströmungen verhalten sich in vielerlei Hinsicht anders als Strömungen mit Unterschallgeschwindigkeit und zeigen daher besonders interessante Phänomene.

Während Unterschallströmungen durch eine Verringerung des Querschnitts beschleunigt und bei Erweiterung des Querschnitts verzögert werden, ist es bei Überschallströmungen genau entgegengesetzt.

Bei Überschallströmungen kann es bei Querschnittsänderungen leicht zu Verdichtungsstößen kommen, während bei Unterschallströmungen Strömungsablösungen eine Gefahr darstellen.

Grundsätzlich geschieht die Verzögerung der Überschallgeschwindigkeit durch Verdichtungsstöße. In einem Verdichtungsstoß wird die Geschwindigkeit schlagartig reduziert, dabei steigen Druck und Temperatur schlagartig an. Man unterscheidet bei Verdichtungsstößen zwischen schrägen und geraden Stößen. Ein schräger Stoß reduziert schlagartig die Geschwindigkeit führt aber nicht zu Unterschallgeschwindigkeit. Dagegen herrscht nach einem geraden Verdichtungsstoß immer Unterschall.

Um die Verluste in Überschalldiffusoren klein zu halten, wird eine Kombination aus mehreren schrägen Stößen und einem abschließenden geraden Stoß verwendet.

Schallgeschwindigkeit in Gasen

$$c = \sqrt{\kappa R T}$$

c Schallgeschwindigkeit, **κ** Adiabatenexponent, **R** Gaskonstante, **T** Temperatur

Machzahl als Maß für die Geschwindigkeit

$$Ma = \frac{v}{c}$$

Ma Machzahl, **v** Geschwindigkeit des Fluids, **c** Schallgeschwindigkeit

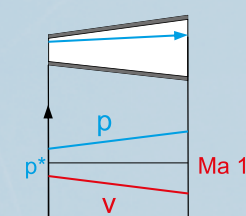
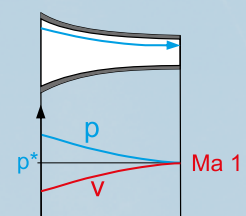
DÜSE

Strömung wird beschleunigt, Druck fällt

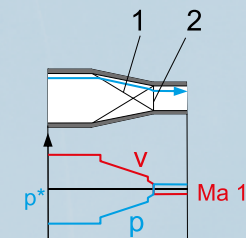
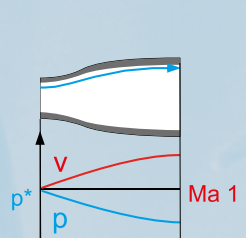
DIFFUSOR

Strömung wird verzögert, Druck steigt

Unter-schall
 $Ma < 1$



Über-schall
 $Ma > 1$



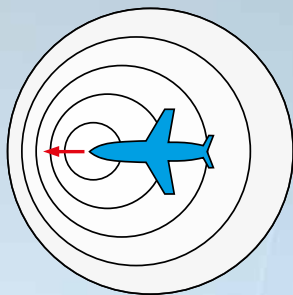
Druck- und Geschwindigkeitsverlauf

v Geschwindigkeit,
p Druck,
p* kritisches Druckverhältnis,
1 schräger Verdichtungsstoß,
2 gerader Verdichtungsstoß

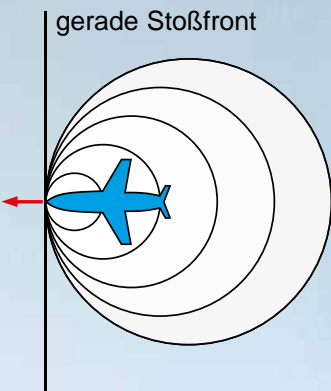
STATIONÄRE STRÖMUNG KOMPRESSIBLER FLUIDE

UMSTRÖMUNG UND BEWEGUNG MIT ÜBERSCHALLGESCHWINDIGKEIT

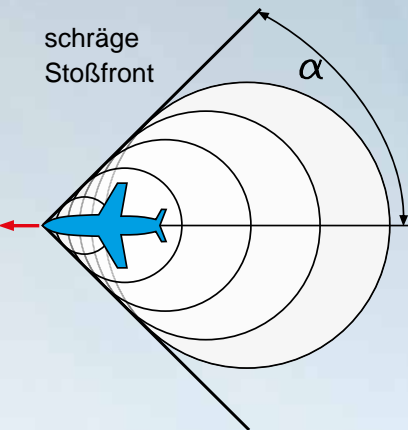
Während bei Unterschallgeschwindigkeit der vom Körper ausgesendete Schall sich auch nach vorne ausbreitet, ist dies bei Überschall nicht so. Hier bilden alle Schallwellen eine gemeinsame Front in Kegelform, den sogenannten Mach'schen Kegel. Der Öffnungswinkel des Kegels ist ein Maß für die Machzahl.



Unterschall
Ma < 1



Schall-
geschwindigkeit
Ma = 1



Überschall
Ma > 1

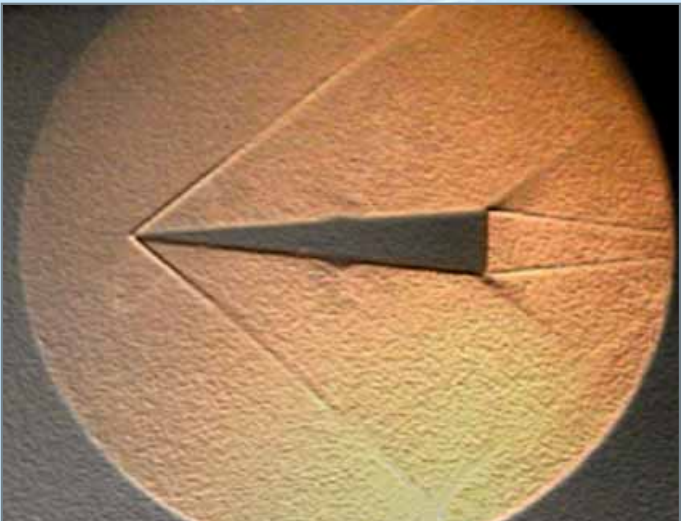
Ausbreitung von Schallwellen bei unterschiedlicher Geschwindigkeit der Schallquelle im Medium

Winkel des Mach'schen Kegels

$\sin \alpha = \frac{1}{Ma}$

Ma Machzahl, sin α Mach'scher Winkel

Ein typisches Beispiel für eine Stoßfront ist der „Überschallknall“ eines Flugzeugs, das mit Überschallgeschwindigkeit fliegt. Hierbei trifft den Beobachter die Stoßfront mit seiner schlagartigen Druckänderung und wird als Knall wahrgenommen.



Schräge Stoßfronten (Mach'scher Kegel) an einem keilförmigen Widerstandskörper bei Ma = 1,59

Die Tabelle zeigt den Auszug eines an Hochschulen üblichen Curriculums. GUNT-Geräte decken diese Inhalte weitestgehend ab.

LERNINHALTE FÜR DEN BEREICH STATIONÄRE STRÖMUNG KOMPRESSIBLER FLUIDE	GUNT PRODUKTE
Druck- und Geschwindigkeitsverlauf bei Rohrströmung	HM 230
Energiegleichung der gasförmigen Fluide	HM 230
Ausströmungen aus Mündungen kritisches Druckverhältnis kritische Geschwindigkeit	HM 260, HM 261
Schallgeschwindigkeit	HM 261, HM 230, HM 172
maximal ausströmende Masse	HM 261, HM 230, HM 260
Ausströmung aus erweiterten Düsen Verhalten Lavaldüse mit veränderlichem Gegendruck	HM 260, HM 261
Bewegung mit Schallgeschwindigkeit	HM 172
Strömung durch Spalte und Labyrinth	

Mit GUNT-Geräten können Sie die wichtigsten Themen der stationären Strömung kompressibler Fluide in Ihrem Labor für Strömungsmechanik ausführlich behandeln. Herausragende Möglichkeiten auch in der Visualisierung von Überschallströmungen bietet der kompakte Überschallwindkanal HM 172.