Universität Rostock

Traditio et Innovatio

# Sommersemester 2011

## Strömungsmaschinen II

Thermische Strömungsmaschinen

Prof. Dr. Hendrik Wurm
Lehrstuhl für Strömungsmaschinen

# Inhalt der Vorlesung Strömungsmaschinen II

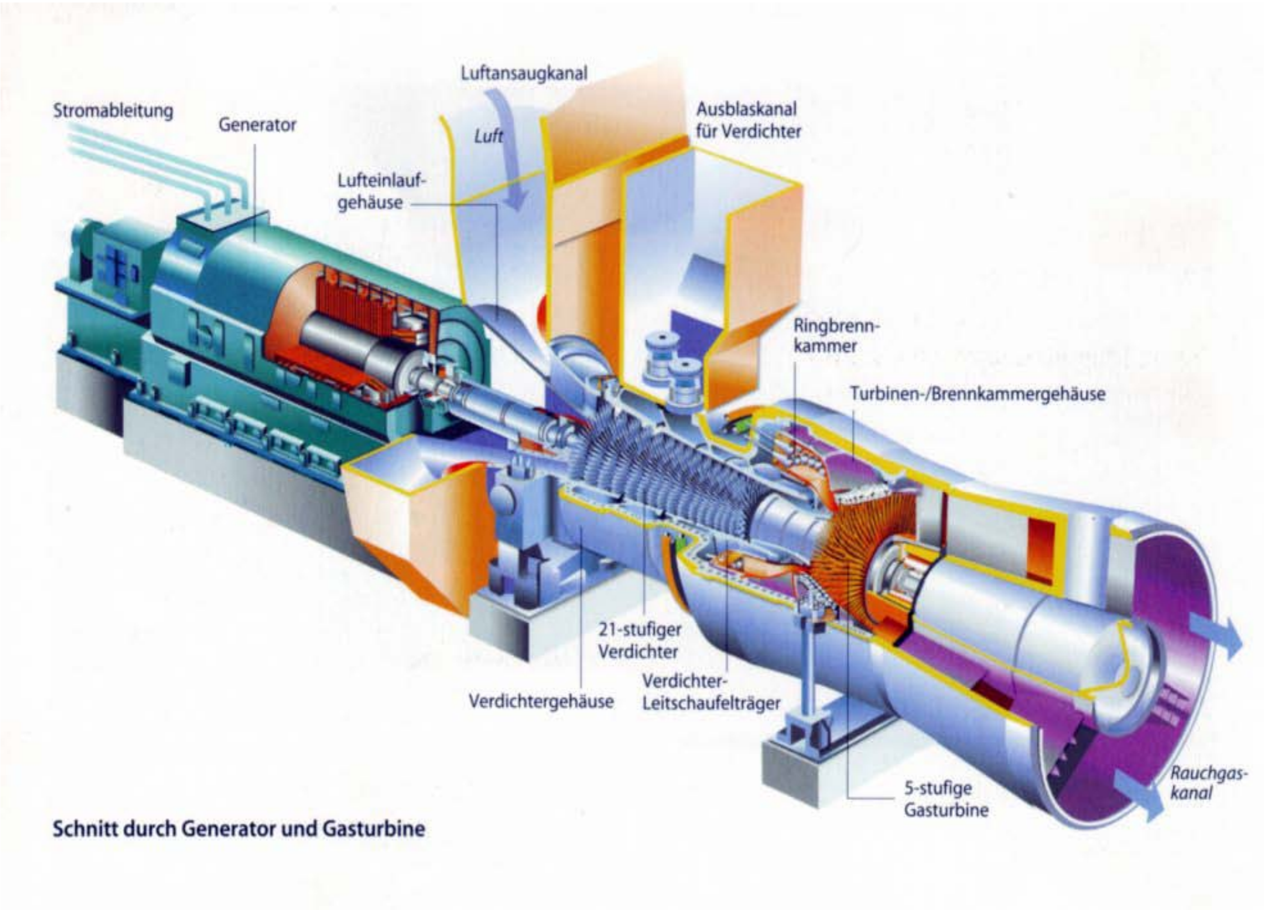
Universität Rostock Traditio et Innovatio

- Einführung / industrieller Hintergrund
- Thermodynamische und **strömungstechnische Grundlagen**
  - Zustandsänderungen, Kreisprozesse
  - Navier-Stokes-Gleichungen, Kontinuitätsgleichung
  - Überschallströmungen
- Aufbau, Entwurf und Anwendung von Gasturbinen
- Aufbau und Wirkungsweise von Flugtriebwerken
- Einführung in die Akustik
- Aufbau, Entwurf, Anwendung und Regelung von Dampfturbinen (Dr. Strenziok)
- Dynamik – Berechnung von Eigenfrequenzen

# Prinzipieller Aufbau einer Gasturbine

Universität Rostock

Traditio et Innovatio




Quelle: www.hagelstein-consult.de

# Hauptkomponenten der GT

Universität Rostock
Traditio et Innovatio

- Turbine – Erzeugung der mechanischen Leistung
- Verdichter --- Druckerhöhung der angesaugten Luft vor der Turbine
- Brennkammer --- Temperaturerhöhung des resultierenden Verbrennungsgases

  oder

- Erhitzer

# Gasdynamik

Universität Rostock Traditio et Innovatio

- Euler-Gleichung
- Bernoulli-Gleichung
- Kontinuitätsgleichung
- Schallgeschwindigkeit und Schallausbreitung
- Düsen- und Diffusorenform für Unter- und Überschall

# Euler-Gleichung

Universität Rostock

Traditio et Innovatio

$$(\rho \cdot A \cdot ds) \cdot \left(\frac{dc}{dt}\right) = -\frac{dp}{ds}\,A\,ds - g \cdot \rho \cdot A\frac{dh}{ds}ds \qquad (1)$$

für stationäre Strömungen

$$c\,dc = -\frac{dp}{\rho} - g\,dh \qquad (2)$$

Integration für r=const → Bernoulli-Gleichung

$$\frac{\rho\,c^2}{2} + p + g\rho h = const \qquad (3)$$

- Einführung des Ruhezustandes 0 bei c=0 m/s

- für isentrope Vorgänge gilt:

$$\frac{T}{T_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{\kappa-1}$$

mit $\mathrm{p} = \rho \cdot R \cdot T$

wird $$\frac{p}{p_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{\kappa} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \qquad (4)$$

Integration der Eulergleichung und Einsetzen von (4) liefert die Bernoulli-Gleichung der Gasdynamik

$$\frac{c^2}{2} + \int \frac{\partial c}{\partial t} ds + \frac{\kappa}{\kappa - 1} \frac{p_0}{\rho_0} \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = e$$

und für stationäre Strömungen

$$\frac{c^2}{2} + \frac{\kappa}{\kappa - 1} \frac{p_0}{\rho_0} \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = e$$

Ausströmgeschwindigkeit aus einem Kessel (c=0 im Kessel)

$$c^2 = \frac{2\,\kappa}{\kappa - 1}\,\frac{p_0}{\rho_0}\left[1 - \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right]$$

$$c^2{}_{max} = \frac{2\,\kappa}{\kappa - 1}\frac{p_0}{\rho_0}$$

Ausströmung in Vakuum

# Kontinuitätsgleichung



$$c_1\,\rho_1\,A_1 = c_2\,\rho_2\,A_2 = \dot{m} = \text{const}$$

In der Vorlesung Strömungsmaschinen 1 Massebilanz am Volumenelement, es folgt

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho c_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho c_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho c_z)}{\partial z} = 0$$

# Fortpflanzungsgeschwindigkeit kleiner Druckstörungen



Schallgeschwindigkeit

$$a^2 = \frac{dp}{d\rho}$$

Für isentrope Zustandsänderungen mit Gl. (4)

$$\frac{dp}{d\rho} = \kappa \frac{p}{\rho}$$

$$a = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}} = \sqrt{\kappa \frac{p}{\rho}}$$

# Schallgeschwindigkeit



$$p = \rho \cdot R \cdot T$$

$$a = \sqrt{\kappa\, R\, T}$$

→ a wird mit kleiner werdender Temperatur kleiner

# Strömungsfälle in der Gasdynamik



1) subsonische Strömung $c < a$
2) transsonische Strömung $c \approx a$
3) supersonische Strömung $c > a$

- Kennzeichnung mit der Machzahl $Ma = \frac{c}{a}$ (örtliche Machzahl)

- Für $Ma < 0,4$ wird üblicherweise die Kompressibilität des Gases vernachlässigt

# Schallgeschwindigkeit bei 25°C

| Gas | Luft | $CO_2$ | $H_2$ |
|---|---|---|---|
| a[m/s] | 347 | 275 | 1320 |

zum Vergleich

$a_{Stahl} = 5100 m/s$
$a_{Wasser} = 1400 m/s$

Universität Rostock Traditio et Innovatio

## Verhalten der Schallgeschwindigkeit

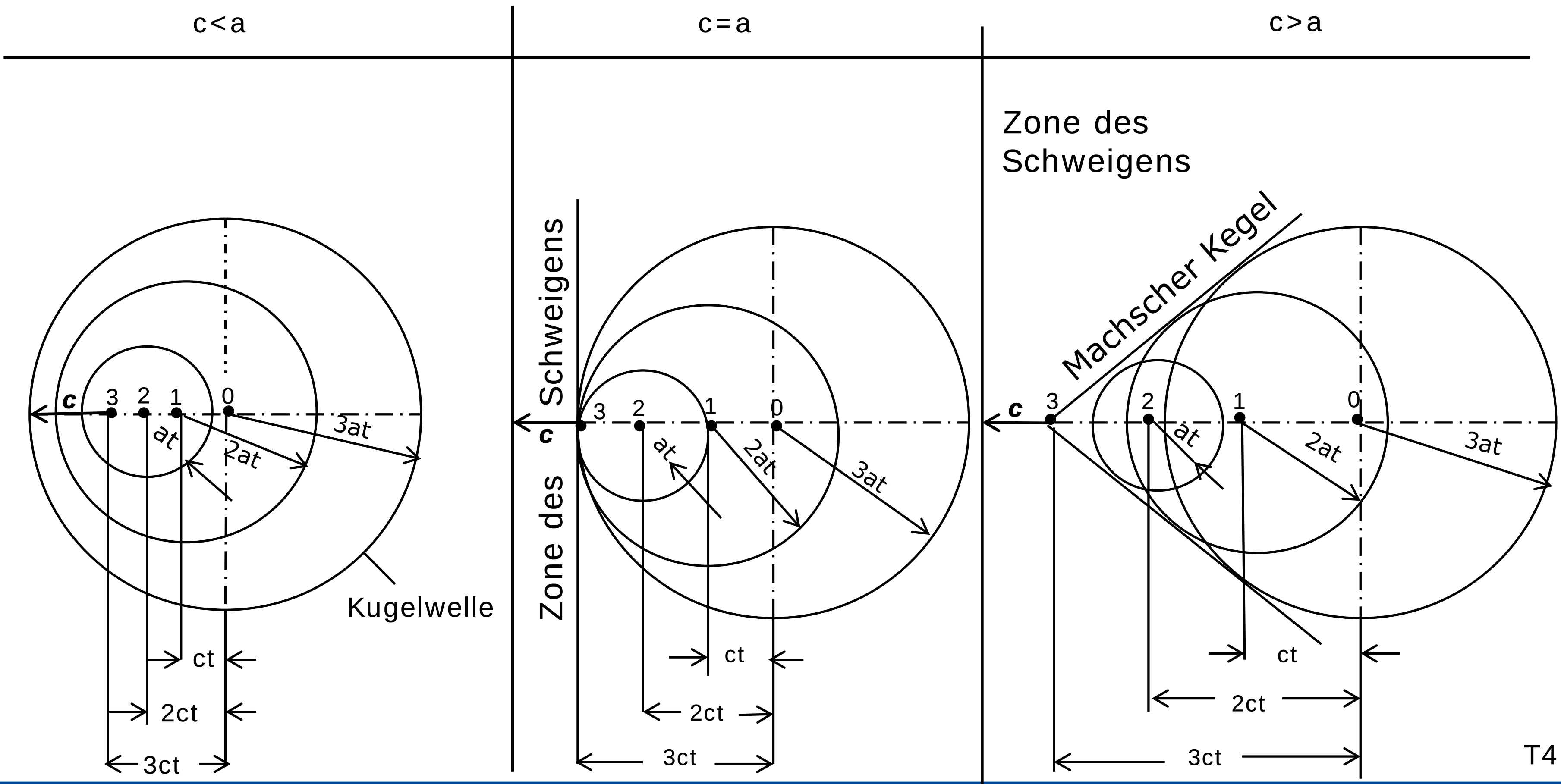
$$c = 0 \quad \rightarrow \quad a_0 = max$$

Für größer werdende Geschwindigkeit *c* wird *a* kleiner

$$a^2 = {a_0}^2 - \frac{\kappa - 1}{2}\, c^2$$

# Schallausbreitung

Universität Rostock
Traditio et Innovatio



# Schallausbreitung in supersonischen Strömungen

Universität Rostock

Traditio et Innovatio

Schallausbreitung in einem Gebiet, dass von den Machschen Linien begrenzt wird.

Je kleiner die Machzahl, desto größer der Machsche Winkel.

T4

# Zusammenfassung des bisherigen

Universität Rostock
Traditio et Innovatio

- Isentropenbeziehung

$$\frac{p}{p_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{\kappa} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \qquad (4)$$

- Bernoulligleichung

$$c^2 = \frac{2\kappa}{\kappa-1}\ \frac{p_R}{\rho_R}\left[1-\left(\frac{p}{p_R}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right] \qquad (7)$$

- Schallgeschwindigkeit

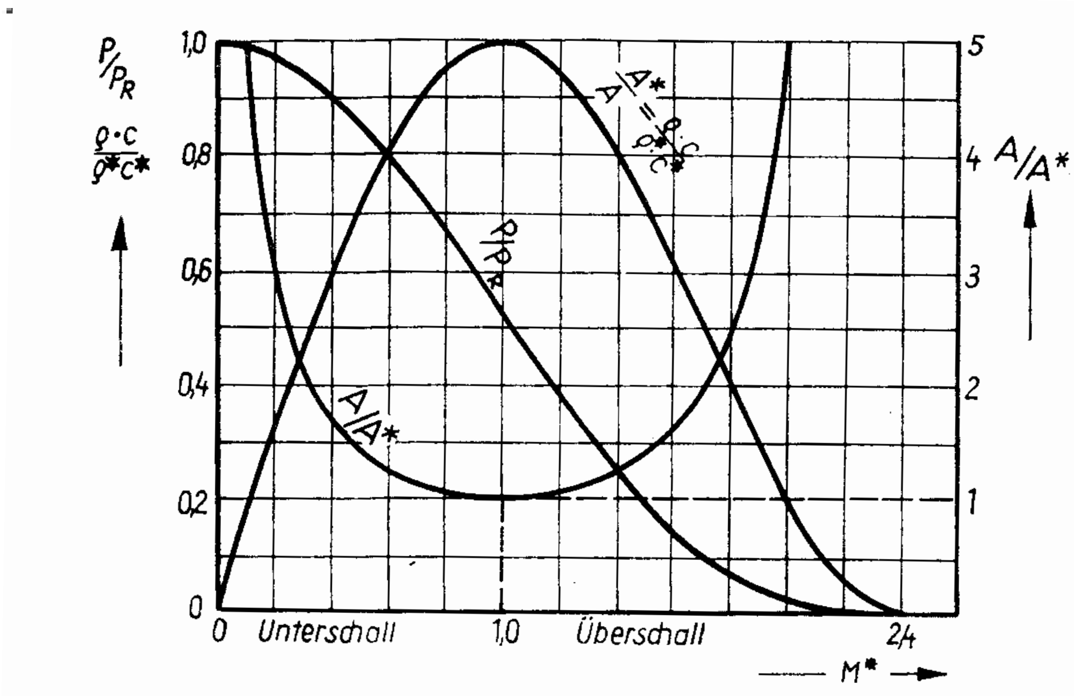
$$a^2 = \kappa\ \frac{p_R}{\rho_R}\left(\frac{p}{p_R}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \qquad (8a)$$

$$a^{*2} = \frac{2\kappa}{\kappa+1}\ \frac{p_R}{\rho_R} \qquad (8b)$$

# Stromdichte

Universität Rostock
Traditio et Innovatio

- $$\frac{T}{T_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{\kappa-1}$$



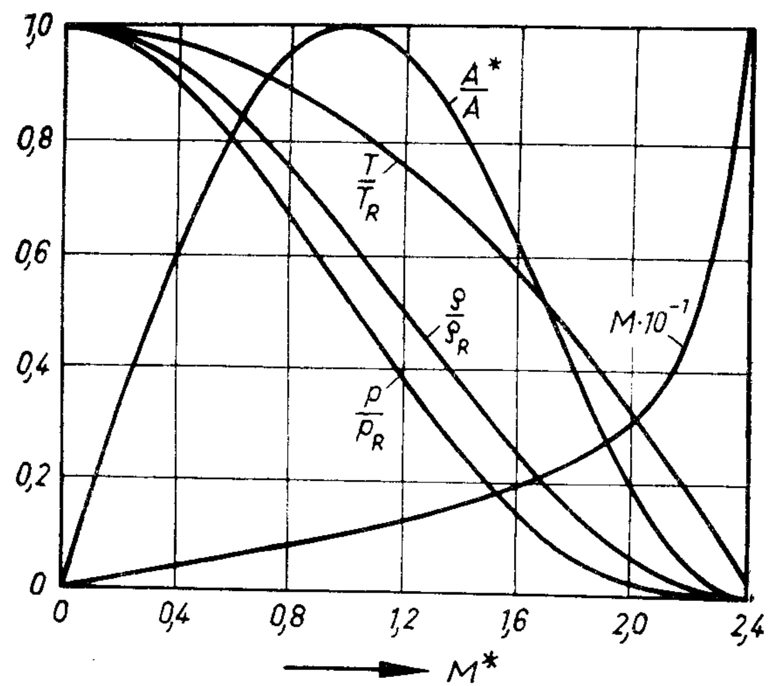
- Einsetzen von (8) in (7) und (6)
  liefert eine Beziehung für $(p/p_R) = f(c/a^*)$

→ Aussage für das Druckverhältnis bei dem Schallgeschwindigkeit erreicht wird

- Einsetzen von (8) in die Kontinuitätsgleichung liefert eine Beziehung
  für das Flächenverhältnis $A^*/A$

→ Aussage über den Flächenverlauf

$A^*/A = f(c/a^*)$



# Konsequenz für Düsen und Diffusoren

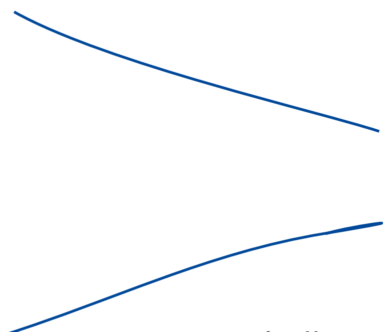
Universität Rostock

Traditio et Innovatio

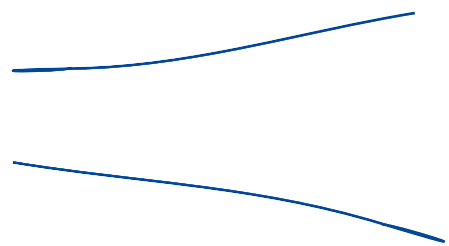
Aufgabe Düse: Beschleunigung und Druckabsenkung

Aufgabe Diffusor: Verzögerung und Druckerhöhung

## Düsen

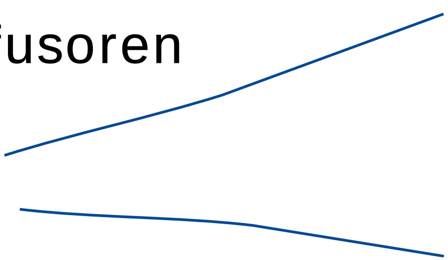


Unterschall

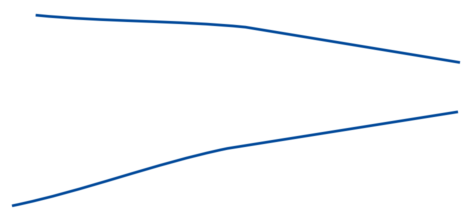


Überschall

## Diffusoren



Unterschall



Überschall