

Klausur
Strömungsmaschinen I
Wintersemester 2015/16
8. März 2016, Beginn 14:00 Uhr

Prüfungszeit: 90 Minuten

Zugelassene Hilfsmittel sind:

- Taschenrechner
- Geodreieck
- Zeichenmaterial
- gestellte Formelsammlung

Andere Hilfsmittel, insbesondere:

- alte Klausuren
- Übungsunterlagen, Skript, Folienumdruck, eigene Formelsammlung
- Handy, Laptop, Fachbücher

sind nicht zugelassen.

Anmerkungen zur Bearbeitung:

- Verwenden Sie dokumentenechte Stifte (**nicht rot, grün oder Bleistift!**).
- Rechen- und Lösungswege sind darzustellen.
- Annahmen sind kenntlich zu machen.
- Zwischen- und Endergebnisse sind **deutlich hervorzuheben**.

Aufgabe	Geschätzte Dauer	mögliche Punkte	erreichte Punkte
1. Verständnisfragen	40 min	42,5	
2. Axialturbine	30 min	29	
3. Cordier-Diagramm	15 min	13,5	
Gesamt	85 min	85	

Name, Vorname:

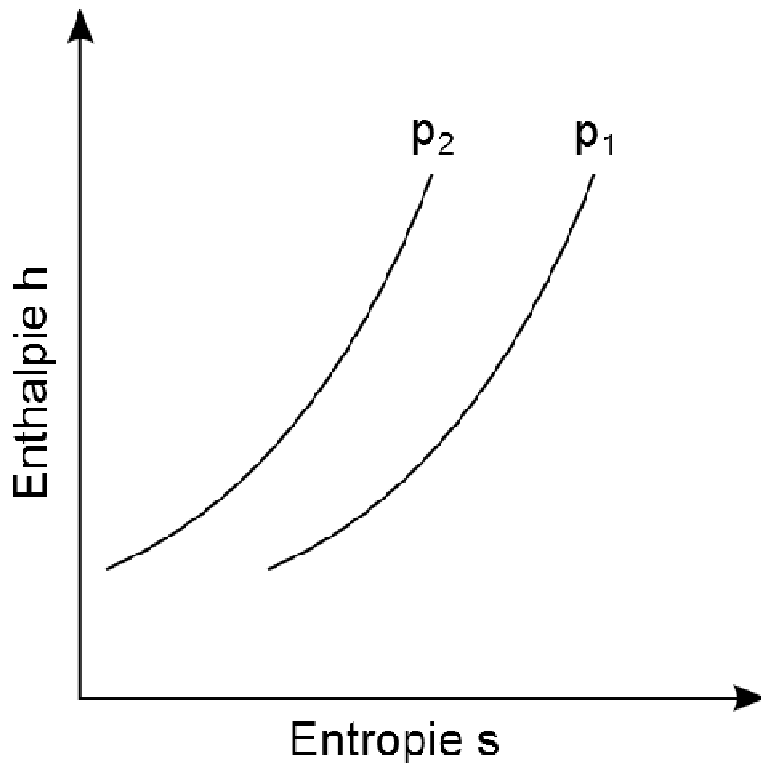
Matrikelnummer:

Wir wünschen Ihnen viel Erfolg!
Prof. Dr.-Ing. Jörg Seume
Dipl.-Ing. Felix Kauth
Sönke Teichel, M.Sc.

Aufgabe 1 – Verständnisfragen

- 1.1 Die Zustandsänderungen in einem Verdichterlaufrad sollen in dem unten gegebenen h-s Diagramm dargestellt werden. Tragen Sie die folgenden Größen in das Diagramm ein und kennzeichnen Sie die Zustandsänderungen! Definieren Sie den isentropen Verdichterwirkungsgrad! (10 Punkte)

$$\frac{c_2^2}{2}, h_1, \Delta h, h_2, \frac{c_1^2}{2}, h_{tot,2}, \Delta h_s, h_{tot,1}, \Delta h_{tot}$$

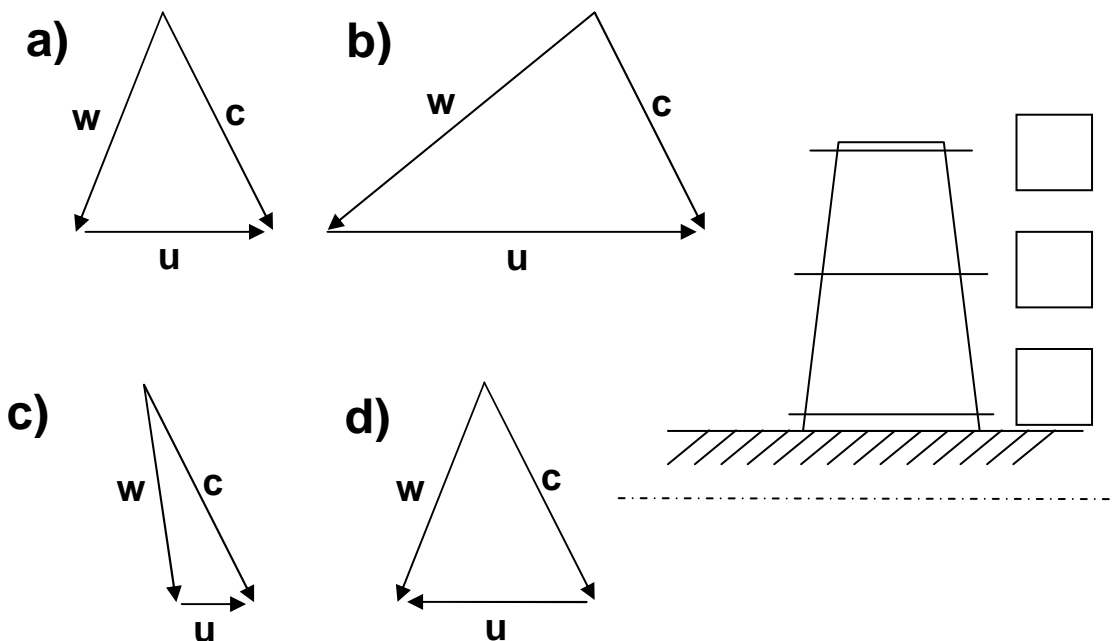


- 1.2 Welcher Wirkungsgrad ist das bessere Maß für die strömungstechnische Güte einer Strömungsmaschine – der isentrope oder der polytrope Wirkungsgrad? Welchen Nachteil hat die andere Wirkungsgraddefinition? (2 Punkte)

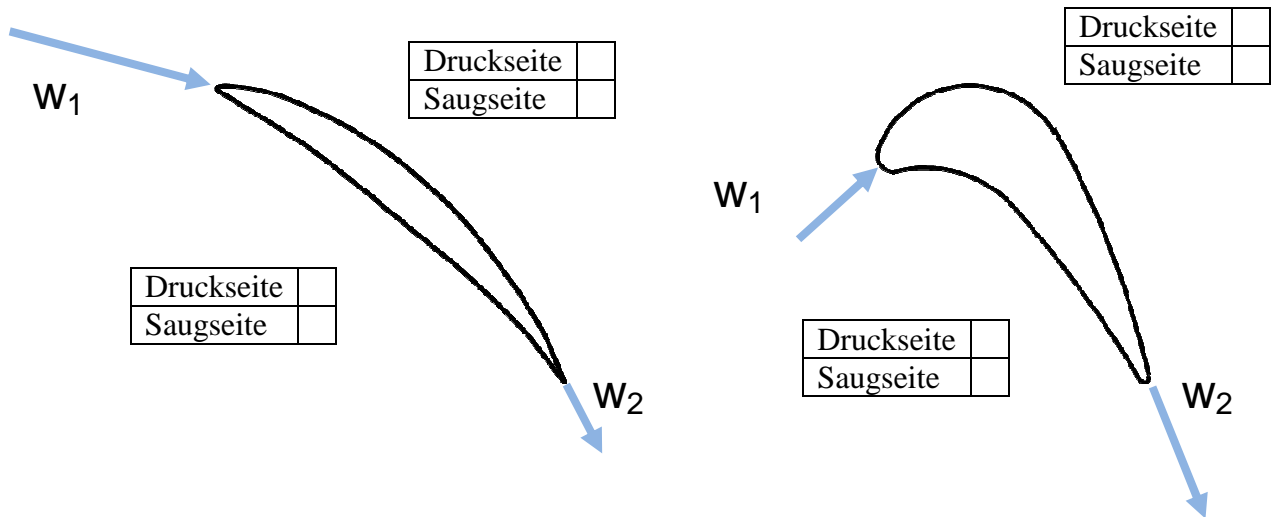
1.3 Geben Sie für jede der angegebenen Zustandsgrößen an, ob diese über die jeweilige Komponente (Laufrad / Leitrad) einer isentropen Reaktionsturbine steigt (↑), sinkt (↓) oder konstant (=) bleibt. (3,5 Punkte)

Zustandsgröße	Laufrad	Leitrad
Statische Enthalpie		
Totalenthalpie		
Rothalpie		
Entropie		

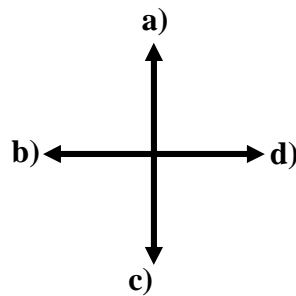
1.4 Ordnen Sie die drei richtigen Geschwindigkeitsdreiecke den entsprechenden Schnitten der Turbinenschaufel zu, indem Sie die Bezeichnungen in die vorgesehenen Felder eintragen. (3 Punkte)



1.5 Gegeben sind die Profile zweier Laufschaufelreihen. Begründen Sie mit Hilfe der jeweiligen An- und Abströmung im Relativsystem welches das Verdichter- und welches das Turbinenprofil ist. Wählen Sie aus den gegebenen Hauptachsenrichtungen a), b), c) und d) die Richtung der Umfangsgeschwindigkeit des jeweiligen Profils aus und zeichnen Sie diese ein. Markieren Sie jeweils die Druck- und Saugseite der Profile. (6 Punkte)



a)	
b)	
c)	
d)	



a)	
b)	
c)	
d)	

Verdichter	
Turbine	

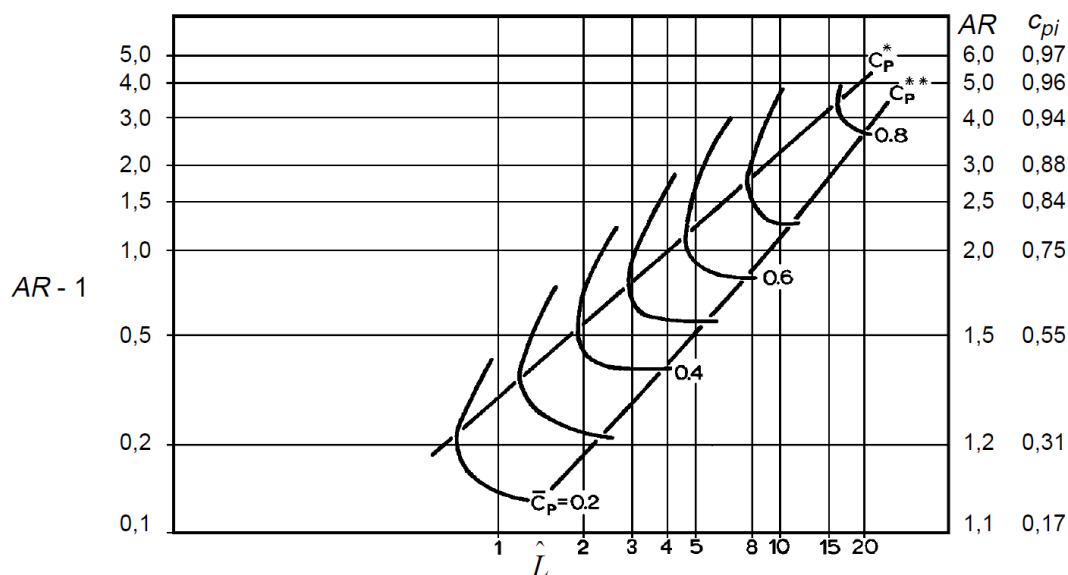
Begründung:

Verdichter	
Turbine	

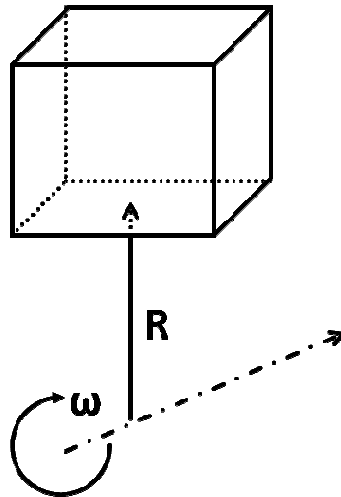
Begründung:

1.6 Das unten gezeigte Diffusordiagramm von Sovran und Klomp (1965) kann zur Auslegung konischer Diffusoren verwendet werden. Beantworten Sie die folgenden Fragen (6 Punkte):

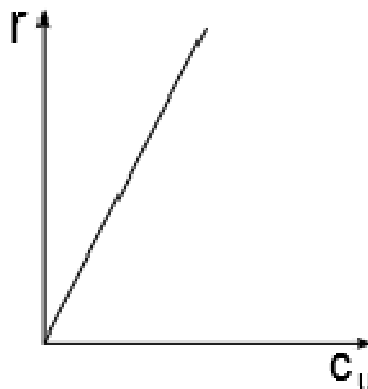
- Welche geometrischen Parameter setzt das Diagramm ins Verhältnis zueinander?
- Nennen Sie je eine thermodynamische Zustandsgröße und eine strömungsmechanische Größe, die sich über den Diffusor ändern. Geben Sie an, ob die jeweilige Größe steigt oder fällt.
- Wodurch wird dieser Vorgang in realen Diffusoren begrenzt?
- Markieren Sie in dem Diagramm einen Diffusor, der bei minimalem axialem Bauraum einen realen Druckbeiwert von 0,4 erreicht.



1.7 Welche Kräfte stehen beim Radialen Gleichgewicht im Gleichgewicht? Zeichnen Sie diese in die Skizze des Fluidelements ein! (3 Punkte)

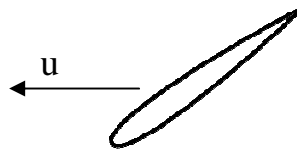


1.8 Für die Vorauslegung nach dem radialen Gleichgewicht werden häufig vereinfachte Drallverteilungen wie die unten gezeigte angenommen. Welcher Art von Wirbel entspricht diese Drallverteilung? Nennen Sie eine weitere üblicherweise verwendete Drallverteilung und geben Sie die dazugehörige Formel an. (3 Punkte)



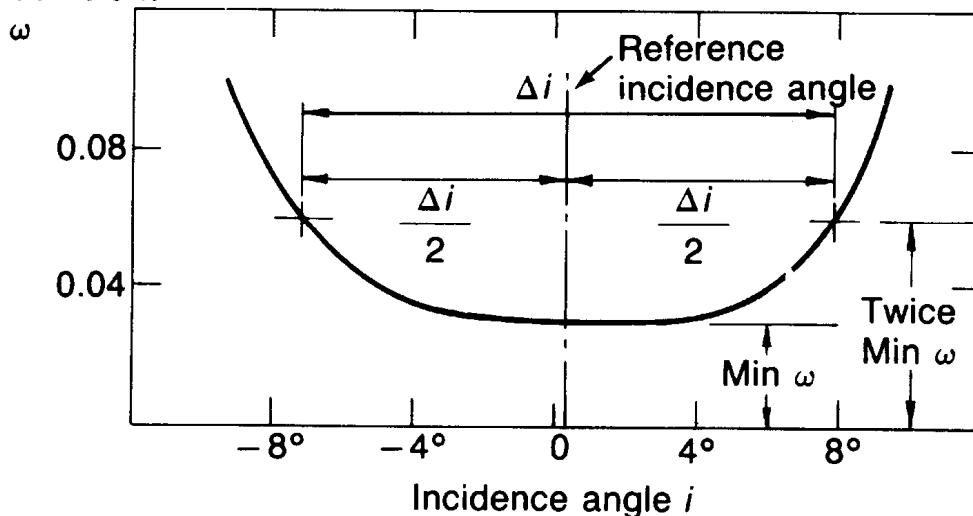
1.9 Die Profilverluste eines Verdichterprofils können wie unten dargestellt in Abhängigkeit vom Inzidenzwinkel aufgetragen werden. Beantworten Sie folgende Fragen (6 Punkte):

- Skizzieren Sie an dem gezeigten Verdichterprofil eine Anströmung mit saugseitiger Inzidenz.



- Geben Sie das Vorzeichen des Inzidenzwinkels für diesen Fall an.
- Welchen Einfluss hat eine geringfügige druckseitige Inzidenz auf den Druckaufbau im Verdichter? Wie verhält sich die Profilmströmung bei weiterer Erhöhung der Inzidenz? Welche Konsequenzen sind im Extremfall zu erwarten?
- Die dargestellte Kurve gehört zu einer bestimmten Anström-Mach-Zahl. Wie verhält sich Δi bei einer höheren Anström-Mach-Zahl?

Total pressure loss coefficient



Aufgabe 2 – Axialturbine

Für die Hochdruck-Turbinenstufe einer Gasturbine sollen die vollständigen Geschwindigkeitsdreiecke des Auslegungs-Betriebspunktes im Mittenschnitt bestimmt werden.

Die Turbinenstufe ist als Repetierstufe ausgelegt und wird im betrachteten Betriebspunkt rein axial angeströmt. Die Axialgeschwindigkeit und der mittlere Durchmesser sind über die Stufe konstant. Die Strömungswinkel sind in Referenz zur Maschinenachse zu definieren.

Die folgenden Größen sind gegeben:

Statischer Druck am Laufradeintritt p_1	311 kPa
Statische Temperatur am Laufradeintritt T_1	850°C
Stufenleistung P_{12}	-5 MW
Massenstrom \dot{m}	19 kg/s
Drehzahl n	30470 min ⁻¹
Nabenverhältnis am Rotoreintritt v_1	0,5162
Mittlerer Durchmesser (arithmetischer Mittenschnitt) D_m	0,3134 m
Spezifische Gastkonstante R_s	287 J/(kg·K)

Hinweis: $u = 2\pi \cdot r \cdot n$

Aufgaben

- 2.1) Bestimmen Sie den Innen- und Außendurchmesser (D_i und D_a) sowie die Schaufelhöhe h am Rotoreintritt. (4,5 Punkte)
- 2.2) Berechnen Sie die Axialgeschwindigkeit c_{ax} und die Umfangsgeschwindigkeit im Mittenschnitt u . (6 Punkte)
- 2.3) Bestimmen Sie sämtliche Geschwindigkeitskomponenten und Strömungswinkel an Ein- und Austritt des Laufrads und tragen Sie die Ergebnisse in die Tabelle ein. (14 Punkte)

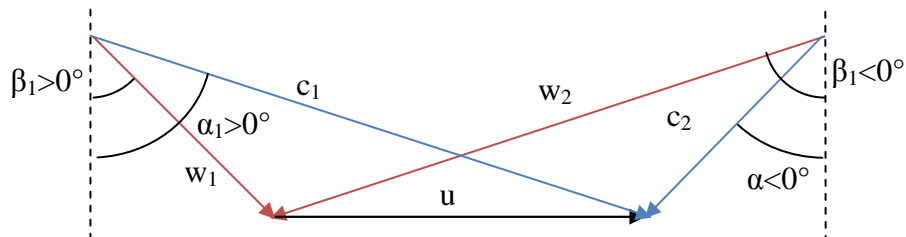
c_1		c_2	
w_1		w_2	
c_{u1}		c_{u2}	
w_{u1}		w_{u2}	
α_1		α_2	
β_1		β_2	

- 2.4) Zeichnen und beschriften Sie die vollständigen Geschwindigkeitsdreiecke an Ein- und Austritt des Laufrads. Verwenden Sie die richtigen Längenverhältnisse (Zeichentoleranz $\pm 10\%$). (4,5 Punkte)

Beispielhaftes Geschwindigkeitsdreieck (entspricht nicht der Lösung)

Winkel werden relativ zur Maschinenachse eingetragen:

- 0° entspricht rein axialer Strömung
- Strömungen mit Winkel $> 0^\circ$ haben eine positive Umfangskomponente
- Strömungen mit Winkel $< 0^\circ$ haben eine negative Umfangskomponente (entgegen der Umfangsgeschwindigkeit)



Aufgabe 3 – Cordier-Diagramm

Zur aktiven Strömungsbeeinflussung am Tragflügel eines Flugzeuges soll ein kompakter, einstufiger Verdichter ausgelegt werden. Die Vorauslegung soll mit Hilfe des Cordier-Diagramms erfolgen. Gegeben sind die maximalen Anforderungen an den Verdichter. Diese sollen zur Wahl des Maschinentyps sowie zur Abschätzung von Drehzahl und Leistung verwendet werden.

Hinweis: Falls Ihnen ein Zwischenergebnis fehlt, können Sie zur Bearbeitung der nachfolgenden Aufgabenteile sinnvolle Werte annehmen.

Folgende Auslegungsdaten sind gegeben:

Laufraddurchmesser D_B	125 mm
Massenstrom \dot{m}	1,1 kg/s
Eintrittsgeschwindigkeit c_1	100 m/s
Totaldruckverhältnis $p_{tot,2}/p_{tot,1}$	1,6
Eintrittsdruck p_1	1 bar
Eintrittstemperatur T_1	10 °C
Spezifische Gaskonstante R_s	287 J/(kg K)
Isentropenexponent κ	1,4
Isentroper Wirkungsgrad $\eta_{s,v}$	0,86

Aufgaben:

- 3.1) Berechnen Sie zunächst die Totaltemperatur und den Volumenstrom am Eintritt, anschließend die ideale spezifische Stufenarbeit y . Es soll eine isentrope Zustandsänderung angenommen werden. (6,5 Punkte)
- 3.2) Berechnen Sie den spezifischen Durchmesser und zeichnen Sie diesen in das Cordier-Diagramm (Abb. 2) ein. Entnehmen Sie die spezifische Drehzahl und den Maschinentyp aus dem Cordier-Diagramm und berechnen Sie die Drehzahl des Verdichters. (4 Punkte)
- 3.3) Der für den Antrieb des Verdichters vorgesehene Elektromotor hat bei der geforderten Drehzahl eine maximale Leistungsabgabe von $P_{Motor} = 48 \text{ kW}$. Ist diese ausreichend, wenn die aerodynamischen Verluste im Verdichter berücksichtigt werden? (3 Punkte)

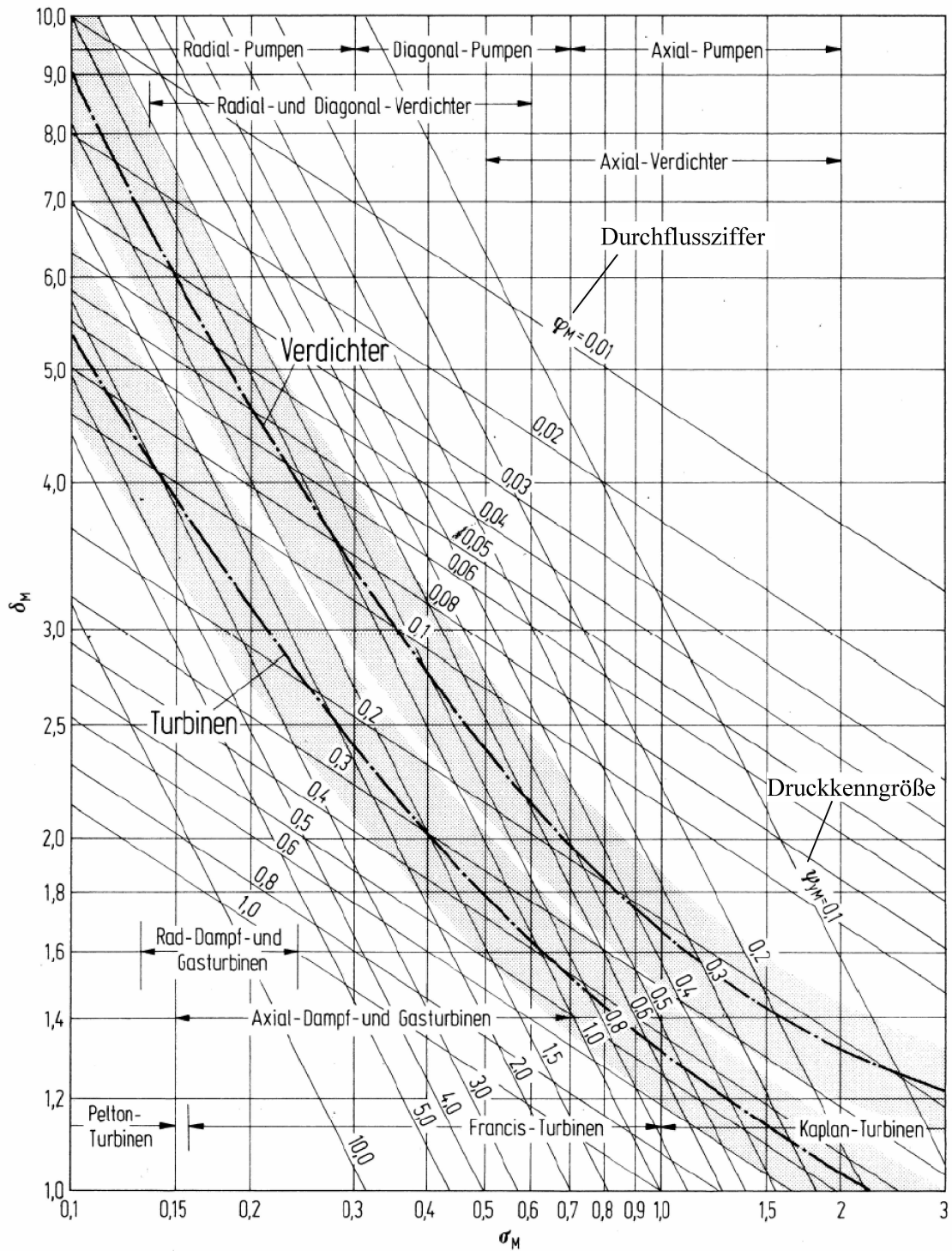


Abbildung 2: Cordier-Diagramm für einstufige Turbomaschinen (Dubbel, 2014)