
Drallgrenzschicht und Strömungsablösung in koaxial rotierenden Diffusoren und Düsen

Ferdinand-Julius Cloos

Band 19



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

FLUID
SYSTEM
TECHNIK

Forschungsberichte zur Fluidsystemtechnik

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Peter F. Pelz

Drallgrenzschicht und Strömungsablösung in koaxial rotierenden Diffusoren und Düsen

Am Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs
(Dr.-Ing.)

genehmigte

D I S S E R T A T I O N

vorgelegt von

Ferdinand-Julius Cloos, M. Sc.

geboren in Gießen.

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Peter F. Pelz
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. habil. Bernhard Weigand
Tag der Einreichung:	13.11.2017
Tag der mündlichen Prüfung:	28.02.2018

Darmstadt 2017

D 17

Forschungsberichte zur Fluidsystemtechnik

Band 19

Ferdinand-Julius Cloos

**Drallgrenzschicht und Strömungsablösung
in koaxial rotierenden Diffusoren und Düsen**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2018

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5900-7

ISSN 2194-9565

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

Kontext

Der Übergang von einem stehenden Kreisrohr zu einem koaxial rotierenden Diffusor bzw. einer koaxial rotierenden Düse ist ein in der Technik häufig auftretende Situation. Dabei sind die wandnahen Transportvorgänge für Impuls, Energie und Stoff in der Nähe des Übergangs vom stehenden in den rotierenden Teil von besonderem Interesse: Kommt es zur Strömungsablösung an der Wand, steigt der Strömungswiderstand in axialer Richtung. Mit der Strömungsablösung einher steigt der Widerstand für Wärme- und Stofftransport normal zur Wand.

Bei Turbomaschinen ist der Übergang vom stehenden Kreisrohr zu einem koaxial rotierenden Diffusor bzw. einer koaxial rotierenden Düse stromauf des Schaufelgitters gegeben. Hier ist es von hohem Interesse, die Strömungsablösung an der Wand bei starker Teillast zu verstehen: Kommt es bei einem Verdichter zu dieser Art der Ablösung, kann es im Extremfall zu einer Zerstörung des Verdichters und ggf. weiteren, noch schwerwiegenden Folgen kommen.

In der Tat ist der Impulstransport an der Wand bei Verdichtern und Pumpen Motivation für die vorliegende Arbeit. Wie sich kürzlich in Forschungsarbeiten gezeigt hat, ist es sinnvoll die Strömungsablösung, je nach Natur, in kinematische oder dynamische Ablösung zu unterteilen.

Im ersten, dem kinematischen Fall, ist die Ablöselinie eine Staupunktlinie. Hier ist die Induktion des Spitzenwirbels stromauf betragsmäßig gleich der Anströmgeschwindigkeit. Dieses Phänomen, welches nach unserer Erwartung selbstinduziert und zyklisch ist, wird derzeit von Herrn Paul Taubert am Institut für Fluidsystemtechnik untersucht (Pelz, Taubert & Cloos: "Vortex structure and kinematics of encased axial turbomachines"; Proceedings of 17th ISROMAC, 2017). Die kinematische Strömungsablösung ist von Reibung und damit der Reynoldszahl sowie der relativen Wandrauheit unabhängig. Im Gegensatz dazu steht die dynamische Strömungsablösung. Sie ist durch Reibung verursacht und muss eine Funktion von Reynoldszahl und relativer Wandrauheit sein.

Die dynamische Strömungsablösung, auch Grenzschichtablösung genannt, ist Gegenstand der Untersuchung von Herrn Cloos. Herr Cloos untersucht im Speziellen den Einlaufbereich der rotierenden Kegeldüsen und Kegeldiffusoren. Er führt damit die Arbeit von Herrn Dr.-Ing. Stapp am Institut für Fluidsystemtechnik fort, der sich mit dem koaxial rotierenden Rohr beschäftigt hat. Die sehr schönen Ergebnisse von Herrn Stapp wurden

im Nachgang seiner Tätigkeit im Journal of Fluid Mechanics publiziert (Cloos, Stapp & Pelz: “Swirl boundary layer and flow separation at the inlet of a rotating pipe”, Journal of Fluid Mechanics, 811 pp. 350-371. ISSN 0022-1120, 2017).

Wissenschaftliche Fragestellung

Herr Cloos verallgemeinert in seiner Fragestellung die ursprüngliche Fragestellung von Herrn Stapp. Hierzu betrachtet er neben dem rotierenden Rohr (Öffnungswinkel Null) nunmehr auch Diffusoren (Öffnungswinkel größer Null) und Düsen (Öffnungswinkel kleiner Null). Dabei stellt sich die Frage, welchen Einfluss der Öffnungswinkel neben der relativen Rauheit, Reynoldszahl und Durchflusszahl auf die Interaktion von Drallgrenzschicht und Impulsgrenzschicht hat.

Von besonderem Interesse ist dabei die kritische Durchflusszahl als Funktion von Reynoldszahl, relativer Rauheit sowie Öffnungswinkel. Wird die kritische Durchflusszahl unterschritten, kommt es zur unerwünschten Strömungsablösung.

Methoden

Methodisch verbindet Herr Cloos Integralmethoden der Grenzschichttheorie mit experimenteller Validierung. Bei der Grenzschichttheorie entwickelt Herr Cloos die Methoden von Herrn Stapp weiter. Die Integralmethoden liefern dabei teilweise erstaunliche Einsichten in das komplexe Strömungsphänomen. So kann bei einer rotierenden Düse die Impulsgrenzschicht dicker sein als bei einem rotierenden Diffusor. Dies wird durch die dämpfenden bzw. anfachenden Terme der verallgemeinerten von Kármánschen Differentialgleichung (Gleichung 3.11) erklärt, deren Vorzeichen in Tabelle 3.1 diskutiert werden. Im Experiment nutzt Herr Cloos einen Laser-Doppler-Anemometer, um die Umfangsgeschwindigkeit der Strömung über dem Radius an unterschiedlichen axialen Schnitten aufzulösen.

Darmstadt, im Februar 2018

Prof. Dr.-Ing. Peter F. Pelz

Vorwort

Die vorliegende Dissertation basiert auf den Forschungsergebnissen die während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fluidsystemtechnik der Technischen Universität Darmstadt erarbeitet wurden. Die Arbeit wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) innerhalb des Projektes PE 1573/5-1 gefördert. Für diese Möglichkeit und das dabei entstandene Ergebnis gilt es zu danken.

Zuerst bedanke ich mich bei dem Institutsleiter und meinem Doktorvater Professor Dr.-Ing. Peter F. Pelz. Ihre Idee, die Teillastzirkulation und die Drallentwicklung an einem generischen Modell zu untersuchen und anhand der Integralmethode der Grenzschichttheorie zu beschreiben, ist das Fundament der vorliegenden Arbeit. Durch die Diskussionen und vor allem durch die erste Veröffentlichung im Journal of Fluid Mechanics des Institutes motivierten Sie mich besonders. Gleichzeitig offenbarten Sie mir Ihr Vertrauen und ermöglichten mir den Austausch mit internationalen Wissenschaftlern auf diversen Workshops und Konferenzen. *Danke!*

Als nächstes bedanke ich mich bei Professor Dr.-Ing. habil. Bernhard Weigand. Auch Sie legten einen Grundstein für die vorliegende Arbeit durch Ihre eigene Forschung über die Strömung und Wärmeübertragung in einem koaxial rotierenden Rohr. Für mich ist es deshalb eine besondere Ehre, dass Sie das Korreferat übernehmen. *Danke!*

Ausgiebig bedanke ich mich bei allen Kollegen und Mitarbeitern des Institutes für Fluidsystemtechnik während meiner Anstellung. Mit den täglichen Diskussionen und der konstruktiven Kritik habt Ihr mich motiviert und verbessert. Hervorheben möchte ich die geschaffene Grundlage durch meinen Vorgänger Dr.-Ing. Dennis Stapp, den Austausch mit Sebastian Lang und Paul Taubert, den Studenten Maximilian Karl und Lukas Zinßer sowie die Leistung der Werkstatt. *Danke!*

Abschließend bedanke ich mich von Herzen bei all meinen Freunden für die Versüßung der Zeit außerhalb der Arbeit. Dies gilt auch für meine Eltern, Karin und Peter Cloos, sowie meinen Geschwistern inklusive Kindern und meiner lieben Henrike. Ohne Eure Unterstützung wäre ich nicht dort, wo ich heute stehe. *Danke!*

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit, abgesehen von den in ihr ausdrücklich genannten Hilfen, selbständig verfasst habe.

Darmstadt, im November 2017

Ferdinand-Julius Cloos

*Die größte Energiequelle überhaupt
ist der eigene Geist und Körper.*

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Generisches Strömungsmodell	4
1.2	Forschungsfragen und Methodik	7
2	Stand der Forschung	11
2.1	Rohrreibungsverlust	12
2.2	Axiale Grenzschicht	12
2.3	Drallgrenzschicht	16
2.4	Strömungsablösung	19
2.5	Strömung in nicht-rotierenden Rohren	20
3	Modellbildung	23
3.1	Verallgemeinerte von Kármán Gleichung	24
3.2	Ansatzfunktionen	30
3.3	Kriterien zur Strömungsablösung	33
4	Versuchsaufbau	37
4.1	Versuchsanlage	39
4.1.1	Erzeugung der Strömung	39
4.1.2	Strömungskonditionierung	40
4.1.3	Rotationseinheit	44
4.1.4	Versuchskegel	45
4.2	Messtechnik	47
4.2.1	Messung der Umfangsgeschwindigkeit	47
4.2.2	Unsicherheit der Strömungsparameter	51
5	Ergebnisse	55
5.1	Hydraulisch glatte Wand	56
5.1.1	Drallgrenzschichtdicke	56
5.1.2	Axiale Grenzschichtdicke	64
5.1.3	Umfangsgeschwindigkeitsprofil	70

5.1.4	Turbulenzintensität der Umfangsgeschwindigkeit	73
5.1.5	Turbulentes Regime II der Drallgrenzschicht	76
5.2	Hydraulisch raue Wand	79
5.2.1	Drallgrenzschichtdicke	79
5.2.2	Umfangsgeschwindigkeitsprofil	83
5.2.3	Turbulenzintensität der Umfangsgeschwindigkeit	85
5.3	Grenzschichtablösung	87
5.3.1	Beginnende Strömungsablösung	88
5.3.2	Ausgebildete Strömungsablösung	94
Fazit und Ausblick		97
Anhang		
A	Größenordnungsabschätzung	109
B	Gleichungssystem	117
C	Sensitivitätsanalyse	119
D	Herleitung Stratford Kriterium	121
E	Technische Eigenschaften der Messsysteme	123
F	Validierung	125

Symbolverzeichnis

Die Symbole der ersten Spalte werden in der zweiten Spalte beschrieben. Die dritte Spalte, wenn vorhanden, gibt die Dimension als Monom mit den Basisgrößen Länge (L), Masse (M), Zeit (T) und Temperatur (θ).

Dimensionsbehaftete Größen:

Symbol	Beschreibung	Dimension
\tilde{K}	turbulente, kinetische Energie	ML^2T^{-2}
\tilde{n}	Drehzahl	T^{-1}
\tilde{R}	Radius	L
\tilde{R}_a	arithmetischer Rauheitswert	L
\tilde{R}_z	gemittelte Höhe des Rauheitsprofils	L
\tilde{r}	radiale Koordinate	L
\tilde{T}	Temperatur	θ
\tilde{t}	Zeit	T
\tilde{U}	querschnitts-gemittelte Geschwindigkeit	LT^{-1}
\tilde{y}	Wandkoordinate $\tilde{y} = \tilde{R} - \tilde{r}$	L
\tilde{z}	axiale Koordinate	L
$\tilde{\mu}$	dynamische Viskosität	$ML^{-1}T^{-1}$
$\tilde{\nu}$	kinematische Viskosität	L^2T^{-1}
$\tilde{\nu}_*$	Wandschubspannungsgeschwindigkeit	LT^{-1}
$\tilde{\rho}$	Dichte	ML^{-3}
$\tilde{\tau}$	Schubspannung	$ML^{-1}T^{-2}$
$\tilde{\Omega}$	Kreisfrequenz	T^{-1}

Dimensionslose Größen:

Längen sind entdimensioniert mit dem Rohrradius am Eintritt \tilde{R}_0 , Geschwindigkeiten mit der lokalen Wandgeschwindigkeit $\tilde{\Omega}\tilde{R}$ und Spannungen mit dem dynamischen Druck $\tilde{\rho}(\tilde{\Omega}\tilde{R})^2$. Radiale Größen, außer die Rauheit, werden auf den lokalen Radius \tilde{R} skaliert.

Symbol	Beschreibung
a	Kalibrationsparameter für $\tau_{y\phi,w}$
A	Term in verallgemeinerter v. Kármán Gleichung
A_0	Term in verallgemeinerter v. Kármán Gleichung
c	Kalibrationskonstante für $\tau_{yz,w}$
C_S	Kalibrationskonstante des Potenzgesetzes für δ_{S02}
\underline{E}	Deformationsgeschwindigkeitstensor
g	Kopplungseinfluss
G	Kopplungsterm
$H_{1,2}$	Formfaktor
k	Exponent des Umfangsgeschwindigkeitsprofils
K	turbulente, kinetische Energie
l	Mischungsweglänge
L	Länge des Kreiskegels
m	Exponent im Potenzgesetzes für δ_{S02}
n	Exponent des axialen Geschwindigkeitsprofils
N	Anzahl
p	Druck in der Drallgrenzschicht
p_+	gemittelter Druck
P	Druck in der Kernströmung
r	radiale Koordinate
R	lokaler Rohrradius
R_z	gemittelte Höhe des Rauheitsprofils
$Re := 2\tilde{\Omega}\tilde{R}_0^2/\tilde{\nu}$	Reynoldszahl
$Re_{ax} := 2\tilde{U}_z\tilde{R}_0/\tilde{\nu} = \varphi Re$	axiale Reynoldszahl
$St := \tilde{\tau}_p/\tilde{\tau}$	Stokes-Zahl
t	Student'scher Faktor
u	zeitlich-gemitteltetes Geschwindigkeitsprofil
u'_{rms}	Turbulenzintensität
U	zeitlich-gemittelte Geschwindigkeit
$y := 1 - r$	Wandkoordinate
z	axiale Koordinate
z_t	Eintrittslänge
$Z := \tilde{R}_0\tilde{\Omega}/\tilde{\nu}_*$	Parameter

Symbol	Beschreibung
α	Öffnungswinkel des Kreiskegels
β	Parameter im Stratford Kriterium
γ	Winkel zwischen den Laserstrahlen
δ_{ij}	Kronecker Delta
δ	axiale Grenzschichtdicke
δ_1	Verdrängungsdicke
δ_2	Impulsverlustdicke
$\delta_{99} := y(u = 0.99)$	axiale Grenzschichtdicke an $y(u_z = 0.99U_z)$
δ_S	Drallgrenzschichtdicke
$\delta_{S02} := y(u_\phi = 0.02)$	Drallgrenzschichtdicke an $y(u_\phi = 0.02)$
$\delta_{S07} := y(u_\phi = 0.07)$	Drallgrenzschichtdicke an $y(u_\phi = 0.07)$
Δ	Differenz
ζ	Verlustziffer
η	Wirkungsgrad
κ	von Kármán Konstante
$\varphi := \bar{U}_z / (\tilde{\Omega} \tilde{R}_0) = \bar{U}_z$	Durchflusszahl
$\sigma(X)$	Standardabweichung der Größe X
τ	Wandschubspannung
ϕ	Koordinate in Umfangsrichtung

Index	Beschreibung
0	Stelle $z = 0$
c	kritisch (engl. critical)
eff	effektiv
g	glatt
i	Laufvariable
in	beginnend (engl. incipient)
j	Laufvariable
m	Laufvariable
max	maximal
min	minimal
n	Laufvariable
p	Partikel
r	in r -Richtung
ra	rau
rms	quadratisches Mittel (engl. root mean square)
Re	Reynoldszahl
stat	statistisch
sys	systematisch
w	Wand
y	in y -Richtung
z	in z -Richtung
ϕ	in ϕ -Richtung
φ	Durchflusszahl

Abkürzungen	Beschreibung
BSA	Burst Spektrum Analyser
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
cf.	vergleiche (lt. confer)
etc.	et cetera
d. h.	das heißt
LDA	Laser-Doppler-Anemometrie
RANS	Reynolds-averaged Navier-Stokes
v. E.	vom Endwert
v. M.	vom Messwert
u. a.	unter anderem
vgl.	vergleiche
z. B.	zum Beispiel