

Bestimmung des Erfassungsbereichs einer axialsymmetrischen Aaberg- Absaugung

Experimentelle und numerische Untersuchungen

Peter Hollenbeck



Bestimmung des Erfassungsbereichs einer axialsymmetrischen Aaberg-Absaugung

Experimentelle und numerische Untersuchungen

Der Fakultät für Ingenieurwissenschaften,
Abteilung Maschinenbau und Verfahrenstechnik der
Universität Duisburg-Essen

zur Erlangung des akademischen Grades
eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation
von

Peter Hollenbeck
aus
Lippstadt

Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus Görner
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Viktor Scherer

Tag der mündlichen Prüfung: 06. Juli 2020

Berichte aus der Strömungstechnik

Peter Hollenbeck

**Bestimmung des Erfassungsbereichs einer
axialsymmetrischen Aaberg-Absaugung**

Experimentelle und numerische Untersuchungen

Shaker Verlag
Düren 2020

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.: Duisburg-Essen, Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7711-7

ISSN 0945-2230

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

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

Zusammenfassung

Diese Arbeit befasst sich mit der Bestimmung des Erfassungsbereichs der axialsymmetrischen Aaberg-Absaugung. Im Fokus liegt die Beschreibung und Modellierung des Erfassungsbereiches dieser lokalen Absaugung, die eine Absaugung mit einem radialen Freistrahle kombiniert. Bisher wird die Erfassung der Aaberg-Absaugung in der Literatur mit der Erfassungsgeschwindigkeit oder der A-Kurve beschrieben. In der vorliegenden Arbeit werden diese strömungstechnischen Parameter kritisch hinterfragt und in ihrer anwendungsbezogenen Gültigkeit untersucht. Dazu werden die Strömungsfelder und Erfassungsbereiche verschiedener Betriebszustände einer Aaberg-Absaugung messtechnisch und numerisch analysiert.

Die Untersuchungen zeigen, dass die Parameter Erfassungsgeschwindigkeit und die A-Kurve in der beschriebenen Form nicht dazu geeignet sind, den Erfassungsgrad vorherzusagen. Aus der Betrachtung des instationären Verlaufs der A-Kurve wird aufgezeigt, dass alle A-Kurven den Bereich zwischen maximaler und minimaler Erfassung abdecken und so zur Beschreibung des Erfassungsbereichs genutzt werden können. Aus den Untersuchungen werden ebenfalls Auslegungskriterien für die Aaberg-Absaugung erarbeitet, die einen großen Erfassungsbereich gewährleisten und die Erfassungsreichweite auf der Absaugachse in Abhängigkeit vom Betriebspunkt und Erfassungsgrad bestimmen.

Industrielle Lüftung, lokale Absaugung, Aaberg, Reers, Erfassungsbereich

Abstract

This thesis deals with the determination of the capture area of the axially symmetrical Aaberg exhaust system. The focus is on the description and modelling of the capture area of this local exhaust system, which combines an exhaust with a radial jet. Up to now, the detection of the Aaberg exhaust has been described in the literature with the capture velocity or the A-curve. This thesis critically analyses these fluid dynamic parameters and examines their validity. For this purpose, the flow fields and capture areas of different operating points of an Aaberg exhaust system are analysed by measurements and numerical methods.

The studies show that the parameters capture velocity and the A-curve in the described form are not suitable for predicting the capture efficiency. Considering the unsteady characteristic of the A-curve, it is shown that all A-curves cover the range between maximum and minimum capture rate and can thus be used to describe the capture area. Based on the studies, design criteria for the Aaberg exhaust system are also defined which guarantee a large capture area and which determine the capture distance on the exhaust axis as a function of the operating point and capture efficiency.

Industrial Ventilation, local exhaust, Aaberg, Reezs, capture area

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation und Zielsetzung	1
1.2	Aufbau der Arbeit	3
2	Grundlagen	5
2.1	Lokale Lüftungssysteme	5
2.1.1	Auslegung von Erfassungseinrichtungen	7
2.1.2	Bewertungsgrößen von Erfassungseinrichtungen	10
2.2	Aaberg-Absaugung	12
2.2.1	Prinzip	13
2.2.2	Erfassungsbereich	16
2.3	Messtechnische Verfahren	19
2.3.1	Tracergasverfahren	20
2.3.2	Particle image velocimetry	22
2.4	Numerische Verfahren	29
2.4.1	Stokes'sche Stromfunktion	30
2.4.2	Strömungssimulation	35
3	Experimentelle Methoden	41
3.1	Versuchsstand	41
3.2	Strömungstechnische Parameter	45
3.3	Tracergasmessverfahren	48
3.4	PIV-Messverfahren	54
4	Numerische Methoden	61
4.1	Stokes'sche Stromfunktion	61
4.2	Strömungssimulationen	67
5	Untersuchung des Strömungsfelds	75
5.1	Reproduzierbarkeit der PIV-Messungen	75
5.2	Strömungsfeld der Aaberg-Absaugung	82
5.3	Validierung numerischer Modelle	85
5.4	Bestimmung der A-Kurve	89

6	Untersuchung des Erfassungsbereichs	95
6.1	Erfassungsbereich Absaugung ohne Freistrahle	95
6.2	Erfassungsbereich Aaberg-Absaugung	97
6.3	Erfassungsreichweite	101
6.4	Zeitliche A-Kurve und Erfassungsgrad	105
7	Diskussion und Ausblick	109
7.1	Erfassungsgeschwindigkeit	109
7.2	A-Kurve	112
7.2.1	Bewertung der Verfahren zur Bestimmung der A-Kurve	112
7.2.2	Die A-Kurve als Grenze des Erfassungsbereichs	113
7.3	Erfassungsbereich	115
7.3.1	Kurzschlussströmung	116
7.3.2	Erfassungsbereich Aaberg-Absaugung	118
7.3.3	Messverfahren	121
7.4	Auslegung Aaberg-Absaugung	122
7.4.1	Auslegung Betriebspunkt	123
7.4.2	Energetischer Aufwand	124
7.4.3	Randbedingungen	125
8	Zusammenfassung	127
A	Stokes'sche Stromfunktion	131
B	Boxplots	135
C	Approximation Erfassungsbereich	137

Symbolverzeichnis

a	Radius des Austritts des radialen Freistrahls
b	Spaltbreite des Austritts des radialen Freistrahls
c	Schadstoffkonzentration
c_f	Differenz von Flansch- und Absaugradius einer Absaugung mit Flansch
s	Standardabweichung
s	Radius der Absaugöffnung der Aaberg-Absaugung
$s(m, n)$	Partikelverschiebung auf der Bildebene
u	Luftgeschwindigkeit
u_{erf}	Erfassungsgeschwindigkeit
u_{AB}	mittlere Geschwindigkeit der Absaugöffnung
u_{ZU}	mittlere Geschwindigkeit des Freistrahlaustritts
x	kartesische Koordinate, Achse vom Zentrum der Absaugung entlang der Absaugachse
x_{erf}	Erfassungsreichweite
y	kartesische Koordinate, Achse vom Zentrum der Absaugung senkrecht zur Absaugachse
I	Impulsstromverhältnis
I_{kr}	kritisches Impulsstromverhältnis
M	Abbildungsmaßstab der Bildebene
$\dot{V}_{\text{AB}}$	Abluftvolumenstrom
$\dot{V}_{\text{ZU}}$	Zuluftvolumenstrom
X	dimensionslose kartesische Koordinate x/a
Y	dimensionslose kartesische Koordinate y/a
α	Austrittswinkel des Freistrahls
γ	Winkel des Geschwindigkeitsvektors
Δp	Druckverlust
Δt	Zeitintervall zwischen den PIV-Aufnahmen
η_{S}	Erfassungsgrad von Schadstoffen
Θ	Winkel auf dem Umfang der Absaugung, Nullpunkt bei dem Zuluftstutzen der Aaberg-Absaugung

Abbildungsverzeichnis

1.1	Axialsymmetrische Aaberg-Absaugung	2
2.1	Lüftungszonen eines Industriegebäudes	5
2.2	Wirkprinzipien von lokalen Lüftungssystemen	6
2.3	Geschwindigkeitsprofil einer runden Saugöffnung ohne und mit Flansch	9
2.4	Stoff- und Wärmeströme von lokalen Lüftungssystemen	11
2.5	Rauchversuch einer Absaugung und einer Aaberg-Absaugung bei gleichem Abluftvolumenstrom	12
2.6	Konzeptzeichnungen der Aaberg-Absaugung aus den Patenten von Carl Peter Aaberg als globales und als lokales Lüftungssystem	13
2.7	Drei Konfigurationen einer Aaberg-Absaugung	14
2.8	Koordinatensystem und geometrische Parameter einer axialsymmetrischen Aaberg-Absaugung	15
2.9	Strömungsbereiche der Aaberg-Absaugung und Bestimmung der Position der A-Kurven mit dem Volumenstromintegral	17
2.10	Erfassungsgrade und A-Kurve einer zweidimensionalen Aaberg-Absaugung	18
2.11	Phasen des Tracergasverfahrens und zeitlicher Verlauf der Konzentration	20
2.12	Schematischer Aufbau eines PIV-Systems in einem Windkanal	22
2.13	Aufbau eines doppelgepulsten Nd:YAG Lasers	23
2.14	Synchronisation von einem doppelgepulsten Laser und einer PIV-Kamera mit „interline Transfer“	24
2.15	Bestimmung der Verschiebung zweier Bilder mit zufälligen Punktmustern	25
2.16	Ergebnis einer Kreuzkorrelation	25
2.17	Approximation des maximalen Kreuzkorelationskoeffizienten im Subpixel- bereich mit einer Gaußverteilung	26
2.18	Perspektivische Entzerrung mit Kalibriergitter	28
2.19	Histogramme der Verschiebungen $s(m, n)$ einer ausgewerteten Aufnahme mit und ohne „peak-locking“ Effekt	29
2.20	Fehler aufgrund von großem Δt	29
2.21	Berechnungsgebiet und Randbedingungen der Stokes'schen Stromfunktion	32
3.1	Zeichnung der eingesetzten Aaberg-Absaugung	42
3.2	Aufbau des Versuchstandes im Laborraum	44

3.3	Kritisches Impulsstromverhältnis der Versuchsanlage und das von Pederson und Nielsen angegebene kritische Impulsstromverhältnis	45
3.4	Messpunkte der Geschwindigkeitsmessung des radialen Freistrahls	46
3.5	Relative Abweichung der Geschwindigkeiten $u_{\Theta,y}$ zur jeweiligen mittleren Geschwindigkeit $\bar{u}_y$ eines Abstands zum Zentrum	47
3.6	Messwerte und approximierte Funktionen des Druckverlusts des Zu- und Abluftteils der Aaberg-Absaugung	47
3.7	Messpunktgitter der Injektionsstellen der Tracergasmessungen für eine Absaugung und eine Aaberg-Absaugung	49
3.8	Aufbau der Tracergasmessungen	49
3.9	Reihenfolge der Messpunkte bei den Tracergasmessungen	50
3.10	Zeitlicher Verlauf der gemessenen Konzentration und der Hintergrundkonzentration	51
3.11	Erfassungsgrad η_s und Standardabweichung s eines Betriebspunkts einer Absaugung ohne Freistrahls	52
3.12	Erfassungsgrad η_s und Standardabweichung s eines Betriebspunkts einer Aaberg-Absaugung	53
3.13	Aufbau der PIV-Messungen	54
3.14	Relative Änderung der Geschwindigkeiten aller Vektoren eines gemittelten Strömungsfelds in Abhängigkeit der Anzahl der gemittelten Vektorfelder	56
3.15	Anzahl der ermittelten Vektoren einer Messung mit dem PIV-System	57
3.16	Mit dem PIV-System gemessenes Strömungsfeld der Aaberg-Absaugung	58
3.17	Gemessenes Strömungsfeld des radialen Freistrahls	59
3.18	Geschwindigkeitsprofile des radialen Freistrahls und der nachströmenden Luft	59
4.1	Stützstelle $\Psi_{i,j}$ mit benachbarten Stützpunkten	61
4.2	Gitter des Berechnungsgebiets	64
4.3	Vergleich der Ergebnisse der Stromfunktion des Berechnungsmodells mit den Werten der Veröffentlichung von Hunt	65
4.4	Vergleich der Isotachen des Berechnungsmodells mit den Werten aus der Veröffentlichung und der Dissertation von Hunt	66
4.5	Parameter zur Beschreibung des Berechnungsgitters und Bezeichnung der Randbedingungen	67
4.6	Ausschnitt des Berechnungsgitters mit den Parametern für die Anzahl der Zellen im Zuluftaustritt und den Faktoren für das Zellenwachstum	68

4.7	Strömungsgebiet des radialen Freistrahls bei einem Zuluftvolumenstrom von $140\text{ m}^3/\text{h}$ und zwei unterschiedlichen Verhältnissen der Seitenlängen des Berechnungsgebiets	69
4.8	Geschwindigkeitsprofile des radialen Freistrahls und der nachströmenden Luft bei verschiedenen Seitenlängen des Berechnungsgebiets	70
4.9	Geschwindigkeitsprofile des radialen Freistrahls und der nachströmenden Luft bei verschiedenen Gitterfeinheiten	71
4.10	Geschwindigkeitsprofile des radialen Freistrahls und der nachströmenden Luft bei verschiedenen Turbulenzmodellen	72
4.11	Vergleich der Geschwindigkeitsprofile des radialen Freistrahls und der nachströmenden Luft von den Strömungssimulationen und PIV-Messungen . . .	73
4.12	Vergleich des Geschwindigkeitsprofils auf der Absaugachse der Absaugung ohne Freistrahls von den analytischen Berechnungsformeln, den Strömungssimulationen und der PIV-Messung	73
5.1	Definition des Winkels der Geschwindigkeitsvektoren	75
5.2	Geschwindigkeitsprofile von vier PIV-Messungen eines Betriebspunkts und dessen Standardabweichung	76
5.3	Maximale Standardabweichung der Geschwindigkeit aller Betriebspunkte .	77
5.4	Stromlinien zweier PIV-Messungen des gleichen Betriebspunkts	78
5.5	Der Winkel γ auf der Absaugachse von vier PIV-Messungen eines Betriebspunkts und dessen Mittelwert	78
5.6	Der Winkel γ am Ende des Messbereichs auf der Absaugachse für alle Betriebspunkte	80
5.7	Strömung im Raum ohne eingeschaltetes Absaugsystem	81
5.8	Zeitlicher Verlauf der Geschwindigkeit u_y auf der Absaugachse bei $3,5x/a$ der vier Messungen eines Betriebspunkts	81
5.9	Geschwindigkeitsprofile bei gleichen Abluftvolumenstrom und unterschiedlicher Zuluftvolumenströme	83
5.10	Geschwindigkeitsprofile bei gleichem Zuluftvolumenstrom und unterschiedlicher Abluftvolumenströme	84
5.11	Ermittelte Geschwindigkeitsfelder eines Betriebspunkts der Aaberg-Absaugung aus PIV-Messung, Strömungssimulation und Stromfunktion	85
5.12	Geschwindigkeitsprofile der PIV-Messung, der Strömungssimulation und der Stromfunktion eines Betriebspunkts	87

5.13	Maximaler Betrag der Differenz der Geschwindigkeiten der numerischen Verfahren und den PIV-Messungen für alle Betriebspunkte der Aaberg-Absaugung	88
5.14	A-Kurven aus der PIV-Messung, der Strömungssimulation und Stromfunktion für einen Betriebspunkt	90
5.15	Position der A-Kurve alle Betriebspunkte der experimentellen und numerischen Verfahren auf der Achse $x/a = 3,5$ über dem Impulsstromverhältnis	91
5.16	A-Kurven der beiden Verfahren für das Strömungsfeld zu einem Zeitpunkt und dem zeitlich gemittelten Strömungsfeld eines Betriebspunkts	91
5.17	A-Kurven aus Stromlinien für alle Einzelmessungen und deren Häufigkeitsverteilung als Boxplots für einen Betriebspunkt	92
5.18	A-Kurven aus dem Volumenstromintegral für alle Einzelmessungen und deren Häufigkeitsverteilung als Boxplots für einen Betriebspunkt	93
6.1	Erfassungsgradfeld aus den Tracergasmessungen und Erfassungsgeschwindigkeit aus dem Berechnungsmodell nach Hunt einer Absaugung ohne Freistrahler bei drei Abluftvolumenströmen	95
6.2	Abstände auf der Absaugachse der Erfassungsgrade und den Erfassungsgeschwindigkeiten für die Absaugung ohne Freistrahler	96
6.3	Erfassungsgradfeld aus den Tracergasmessungen mit der A-Kurve und Erfassungsgeschwindigkeit aus dem Berechnungsmodell nach Hunt von einem Abluftvolumenstrom und steigendem Zuluftvolumenstrom	97
6.4	Erfassungsgradfeld aus den Tracergasmessungen mit der A-Kurve und Erfassungsgeschwindigkeit aus dem Berechnungsmodell nach Hunt von einem Abluftvolumenstrom und drei Zuluftvolumenströmen	99
6.5	Erfassungsgradfeld aus den Tracergasmessungen mit der A-Kurve und Erfassungsgeschwindigkeit aus dem Berechnungsmodell nach Hunt von zwei Betriebspunkten mit ähnlichem Impulsstromverhältnis	100
6.6	Erfassungsreichweite der Betriebspunkte über dem Impulsstromverhältnis für die Erfassungsgrade $\eta_s = 0,9$ und $\eta_s = 0,8$	101
6.7	Approximierte Potenzfunktionen der Erfassungsreichweite für die Erfassungsgrade $\eta_s = 0,9$ und $\eta_s = 0,8$	103
6.8	Approximierte Potenzfunktion der Erfassungsreichweite mit dem Erfassungsgrad als Variable	104
6.9	Erfassungsgradfeld und zeitliche A-Kurven aus dem Stromlinienverfahren für zwei Betriebspunkte	105

6.10	Erfassungsgradfeld mit den zeitlichen A-Kurven und drei Perzentilen für zwei Betriebspunkte	106
6.11	Erfassungsgradfeld mit den zeitlichen A-Kurven und deren Häufigkeitsverteilung als Boxplots für zwei Betriebspunkte	107
7.1	Erfassungsgeschwindigkeit bei $\eta_s = 0,9$ über der Erfassungsweite und dem Impulsstromverhältnis	110
7.2	Zeitlicher Verlauf der Geschwindigkeit u_y auf der Absaugachse an der Position $\eta_s = 0,9$ bei gleichem Abluftvolumenstrom und vier Zuluftvolumenströmen	110
7.3	Boxplots der Geschwindigkeit u_y auf der Absaugachse bei gleichem Abluftvolumenstrom und vier Zuluftvolumenströmen an der Position $\eta_s = 0,9$	111
7.4	Vergleich der beiden Verfahren zur Bestimmung der A-Kurve in der Nähe des Absaugflansches	112
7.5	Umschlag von der Kurzschlussströmung in die Aaberg-Strömung durch Steigerung des Zuluftvolumenstroms bei den Strömungssimulationen	117
7.6	Kritische Zuluftvolumenströme und die sich ergebenden Impulsstromverhältnisse aus den Simulationen mit variierten geometrischen Parametern	117
7.7	Erfassungsreichweite der Absaugung und den Betriebspunkten der Aaberg-Absaugung abhängig vom Abluftvolumenstrom und Druckverlust	124
B.1	Größen und Bezeichnungen eines Boxplots	135
C.1	Approximation des Erfassungsgrads mit einer quadratischen Funktion und Ellipse für die Betriebspunkte des Abluftvolumenstroms $\dot{V}_{AB} = 200 \text{ m}^3/\text{h}$	139
C.2	Approximation des Erfassungsgrads mit einer quadratischen Funktion und Ellipse für die Betriebspunkte des Abluftvolumenstroms $\dot{V}_{AB} = 300 \text{ m}^3/\text{h}$	140
C.3	Approximation des Erfassungsgrads mit einer quadratischen Funktion und Ellipse für die Betriebspunkte des Abluftvolumenstroms $\dot{V}_{AB} = 350 \text{ m}^3/\text{h}$	141
C.4	Koeffizienten der quadratischen Funktionen der Betriebspunkte	142
C.5	Koeffizienten der Ellipsen der Betriebspunkte	142

Tabellenverzeichnis

2.1	Erforderliche Erfassungsgeschwindigkeiten für eine effektive Absaugung . . .	8
2.2	Berechnungsformeln für die Geschwindigkeit auf der Absaugachse einer runden Absaugöffnung mit Flansch	9
2.3	Konstanten des k - ε -Turbulenzmodells	38
2.4	Konstanten des <i>realizable</i> k - ε -Turbulenzmodells	39
3.1	Parameter für Geometrie und Betrieb der in der Literatur beschriebenen Versuchsanlagen von axialsymmetrischen Aaberg-Absaugungen	41
3.2	Impulsstromverhältnisse der mit dem Tracergasverfahren untersuchten Betriebspunkte	53
3.3	Impulsstromverhältnisse der mit dem PIV-System untersuchten Betriebspunkte	57
4.1	Randbedingungen der Strömungssimulationen	69
5.1	Geschwindigkeiten und Winkel für den Punkt mit dem Abstand $3,5x/a$ auf der Absaugachse der vier Messungen des Betriebspunkts $\dot{V}_{AB} = 250 \text{ m}^3/\text{h}$ und $\dot{V}_{ZU} = 120 \text{ m}^3/\text{h}$	79
7.1	Geometrische Parameter der Aaberg-Absaugungen von der Versuchsanlage und der Anlage von Pedersen	118