

# Tragflügelschall: Anwendung der Messungen von Brooks, Pope und Marcolini auf Ventilatorlärm

M. Schneider, M. Stremel, Th. Carolus  
 Universität-Gesamthochschule Siegen  
 Institut für Fluid- und Thermodynamik  
 Fachgebiet Strömungsmaschinen  
 57068 Siegen, Germany

## Zusammenfassung

Brooks, Pope und Marcolini [BR89] haben fünf Geräuschenstehungsmechanismen an einzelstehenden Tragflügelprofilen empirisch untersucht. Auf der Basis von NACA 0012-Profilen entwickelten sie aus umfangreichen Messungen Korrelationen zwischen Schallabstrahlung und Zuströmbedingung, Anstellwinkel und Reynoldszahl. In der vorliegenden Arbeit wird diskutiert, inwieweit diese Korrelationen für die Berechnung des Breitbandschalls von niedrigbelasteten Axialventilatoren genutzt werden können. Zunächst werden die Annahmen besprochen, unter denen die Brooks, Pope und Marcolini-Daten auf die Schallberechnung von Ventilatoren angewandt werden. Die Ergebnisse werden an einem Beispiel eigenen Messungen des Ventilatorgeräuschs gegenübergestellt.

## EINLEITUNG

Bei Ventilatoren ist neben den aerodynamischen Daten die Schalleistung eine wichtige Kenngröße. In der industriellen Praxis wird das Ventilatorgeräusch bislang mit einfachen Verfahren abgeschätzt. Ein „akustischer Entwurf“ eines Ventilators ist damit nicht möglich, weil die die Schallquellen charakterisierenden Größen nicht als Eingangsparameter auftreten.

In der Literatur findet man eine Vielzahl halbempirischer Modelle zur Schalleistungsberechnung, die detaillierte Eingangsparameter wie das Geschwindigkeitsfeld um die Schaufeln oder Grenzschichtparameter erfordern. Das auf sehr umfangreichen experimentellen Untersuchungen beruhende Modell von Brooks, Pope & Marcolini [BR89] soll im Folgenden dargestellt und auf einen Testventilator angewendet werden.

## BESCHREIBUNG DES MODELLS

In den Untersuchungen von Brooks, Pope & Marcolini [BR89] werden fünf als 'airfoil self-noise' (Schaufelumströmungslärm) bezeichnete Geräuschenstehungsmechanismen betrachtet. Das akustische Modell berücksichtigt die Schallquellen 'Interaktion der turbulenten Grenzschicht mit der Schaufelhinterkante', 'Laminare Grenzschicht in Verbindung mit Wirbelbildungen', 'stumpfe Schaufelhinterkante', 'Strömungsablösung/Abriß' und 'Schaufelspitze', jedoch nicht die Schallquelle 'Zuströmturbulenz'. Das Lärmvorhersageverfahren resultiert aus Messungen von Grenzschichtparametern und dem Fernfeldschalldruckpegel an einzelstehenden NACA 0012-Profilen (ungewölbt) bei Variation der Sehnenlänge  $l$ , der Anströmgeschwindigkeit  $w_1$ , der Turbulenz auf der Schaufeloberfläche und des Anstellwinkels  $\alpha$ . Die Profile sind in einer turbulenzarmen Strömung in einem reflexionsarmen Raum untersucht worden. Durch eine Anordnung von acht Mikrofonen konnten Schalldrücke den einzelnen Geräuschmechanismen zugeordnet werden. Anhand eines Rechenprogramms, in welchem die umfangreichen BPM-Korrelationen implementiert sind, können nun Berechnungen der spektralen Terzschalleistungspegel in Abhängigkeit der Eingangsparameter durchgeführt werden.

## BESCHREIBUNG DER EIGENEN MESSUNGEN

Die Messungen der Schalleistung des Testventilators für verschiedene Betriebspunkte werden an einem Aeroakustikprüfstand nach DIN EN 25136 mit reflexionsarmen Abschluß mittels eines druckseitig angebrachten Mikrofons durchgeführt. Die unbewerteten Schalleistungspegel werden mit den entsprechenden Korrekturwerten nach DIN EN 25136 für jedes Frequenzband ( $\Delta f = 3$  Hz) bestimmt und zum Vergleich mit den BPM-Daten in Terzbandpegel umgerechnet. Abb. 3 zeigt die von Stremel [ST99] gemessenen Gesamtschalleistungspegel in Abhängigkeit der Volumenzahl.

Der Testventilator ist ein Axialventilator mit sechs verwundenen und gewölbten Schaufeln (NACA 4509-Profil) und ist an vier Schnitten für den Nennbetriebspunkt (entsprechend einer Volumenzahl  $\varphi = 0,179$ ) ausgelegt (s. Tab. 1). Er weist einen Außenradius  $R_a = 0,150$  m bei einem Nabenverhältnis  $\nu = 0,45$  auf.

## VERGLEICH ZWISCHEN MODELL UND MESSUNG

Für den Vergleich werden drei Betriebspunkte gewählt. Neben dem Auslegungspunkt ( $\varphi = 0,179$ ) wird der Ventilator bei Teillast ( $\varphi = 0,122$ ) und bei Überlast ( $\varphi = 0,200$ ) betrachtet. Als Eingangsgrößen für die Berechnung mit dem BPM-Modell müssen für jeden Schaufelschnitt Sehnenlänge  $l$ , relative Anströmgeschwindigkeit  $w_1$  und Anstellwinkel  $\alpha$  bereitgestellt werden. Die entsprechenden Auslegungsdaten des Ventilators sowie umgerechnete Werte können Tab. 1 entnommen werden. Die BPM-Berechnungen unter Verwendung der an den Ventilatorschaufeln vorliegenden Anstellwinkeln ergeben die in den Abb. 4 bis 6 dargestellten Kurven (---, ohne Wölbung). Ein Vergleich zwischen BPM-Rechnung und Messung bei identischen Anstellwinkeln ist wegen der Verschiedenheit der Profilgeometrien jedoch nicht korrekt. Der durch die Wölbung des NACA 4509-Profils gegenüber dem ungewölbten NACA 0012-Profil bedingte höhere Auftrieb bei gleichem Anstellwinkel  $\alpha$  wird aus den Polaren (Abb. 1 und 2) deutlich. Man erkennt, daß die Auftriebsbeiwerte der Ventilatorauslegung ( $\varphi = 0,179$ ) vom 0012-Profil im auftretenden Reynoldszahlbereich nicht erreicht werden. Daher wird zur Ermittlung des Einflusses der Profilwölbung auf die Schalleistung zunächst der Überlastpunkt ( $\varphi = 0,200$ ) betrachtet. Die tatsächlichen Auftriebsbeiwerte  $c_A$  des 4509-Profils werden beim 0012-Profil durch die in Tab. 1 angegebenen Anstellwinkel  $\alpha_{BPM}$  erreicht. Die damit berechneten Schalleistungsspektren sind in Abb. 4 der Messung gegenübergestellt. Für die weiteren Vergleiche wird die Differenz der beiden berechneten Kurven als vom Betriebspunkt unabhängiger Profilwölbungseinfluß angesehen. Die sich daraus ergebenden Kurven sowie die gemessenen Schalleistungspegel für die Betriebspunkte  $\varphi = 0,179$  und  $\varphi = 0,122$  sind in Abb. 5 bzw. Abb. 6 dargestellt.

Sowohl aus dem Polarendiagramm des NACA 4509-Profils (Abb. 1) als auch aus dem deutlichen Schallpegelanstieg der gemessenen Gesamtschalleistungskurve (Abb. 3) ist zu erkennen, daß die Strömung im betrachteten Teillastpunkt ( $\varphi = 0,122$ ) abgelöst ist.

Schnitt	$r$ [mm]	$l$ [mm]	$\varphi = \varphi_0 = 0,179$				$\varphi = 0,122$			$\varphi = 0,200$				
			$w_1$ [m/s]	$Re/10^5$	$c_A$ (NACA 4509)	$\alpha$ [°]	$w_1$ [m/s]	$Re/10^5$	$\alpha$ [°]	$w_1$ [m/s]	$Re/10^5$	$\alpha$ [°]	$c_A$	$\alpha_{BPM}$ [°]
1	77,8	70,1	27,3	1,28	1,00	6,0	25,8	1,21	13,7	28,0	1,31	3,4	0,76	7,6
2	98,4	66,3	32,9	1,45	0,95	5,5	31,9	1,41	11,6	33,4	1,48	3,4	0,76	7,6
3	119,1	62,5	38,8	1,62	0,85	4,5	38,1	1,59	9,3	39,2	1,63	2,8	0,70	7,0
4	139,7	58,7	44,9	1,76	0,85	4,5	44,4	1,74	8,4	45,2	1,77	3,1	0,73	7,3

Tab. 1: Auslegungsdaten ( $\varphi = \varphi_0 = 0,179$ ) des Testventilators und umgerechnete Werte für zwei weitere Betriebspunkte an vier Schaufelschnitten

## SCHLUSSFOLGERUNG

Das BPM-Modell ist auf der Grundlage von Messungen an ungewölbten, ruhenden Einzelprofilen entwickelt worden. Außerdem wurden der Einfluß der Zuströmerturbulenz auf die Schallabstrahlung sowie tonale Geräuschkomponenten nicht berücksichtigt. Demgegenüber besitzt der Testventilator verwundene, gewölbte und rotierende Schaufelprofile. Trotz der großen prinzipiellen Abweichungen der Geometrien und Meßanordnungen zeigen die in den Abb. 4 bis 6 dargestellten BPM-Rechnungen im Vergleich zu den Messungen recht gute Übereinstimmungen der spektralen Schalleistungsverläufe. Die vor allem im Frequenzbereich bis 1000 Hz auftretenden Abweichungen sind vermutlich mit den unterschiedlichen Untersuchungsbedingungen sowie der Nichtberücksichtigung tonaler Schallquellen und der Zuströmerturbulenz im BPM-Modell zu erklären. Diese hat aber bei der Meßanordnung des Ventilators – im Gegensatz zur turbulenzarmen Strömung bei den BPM-Untersuchungen – einen nicht zu vernachlässigenden Einfluß auf die Schallabstrahlung [ST99]. Außerdem ist zu hinterfragen, ob die Profilwölbung bei jedem Betriebspunkt den gleichen Beitrag zum Gesamtschalleistungspegel liefert. Im tieffrequenten Bereich des Teillastbetriebspunkts ( $\varphi = 0,122$ ), bei

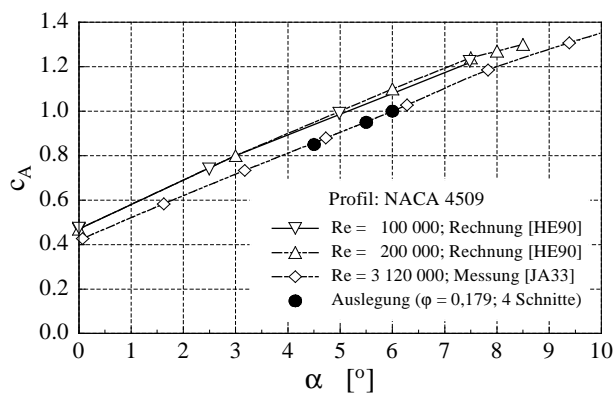


Abb. 1: Polare des NACA 4509 - Profils in Abhängigkeit der Reynoldszahl; Auslegung des Testventilators

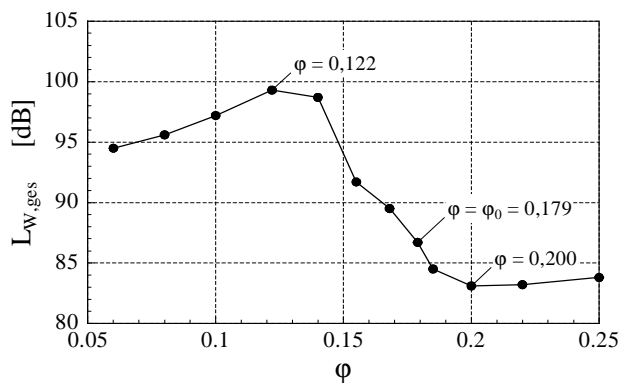


Abb. 3: Gemessene Gesamtschalleistungspegel des Testventilators in Abhängigkeit der Volumenzahl

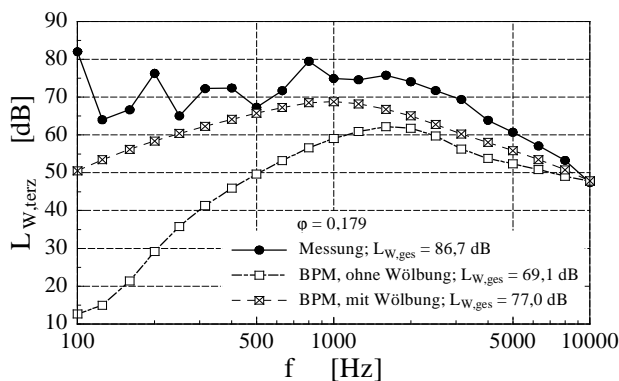


Abb. 5: Vergleich zwischen Messung und Rechnung (BPM-Modell) bei dem Betriebspunkt  $\varphi = 0,179$

dem die Strömung abgelöst ist, treten große Abweichungen der Schalleistungsverläufe zwischen Rechnung und Messung auf (Abb. 6). Diese sind vermutlich damit zu erklären, daß Abrißerscheinungen im Ventilator grundsätzlich andere Auswirkungen auf die Schallabstrahlung haben als am einzelstehenden Tragflügel.

## LITERATURVERZEICHNIS

- [BR89] Brooks, F. T., Pope, D. S., Marcolini, M. A.: Airfoil Self-Noise and Prediction, NASA RP-1218, Hampton, 1989
- [HE90] Hepperle M.: NACA-Profil, MTB-Fachschriftenreihe, Verlag für Technik und Handwerk, 4. Auflage, Baden-Baden, 1990
- [JA33] Jacobs, E. N., Ward, K. E., Pinkerton, R. M.: The Characteristics of 78 Related Airfoil Sections from Tests in the Variable-Density Wind Tunnel, NACA Report No. 460, Washington, 1933
- [ST99] Stremel, M., Carolus, Th.: Wechseldrucke auf der Oberfläche einer rotierenden Ventilatorschaukel: Messung des Einflusses der Zuströmerturbulenz und Modellbildung, Bericht Nr. F99 101 003 A an die Deutsche Forschungsgemeinschaft, Institut für Fluid- und Thermodynamik, Universität Siegen, 1999

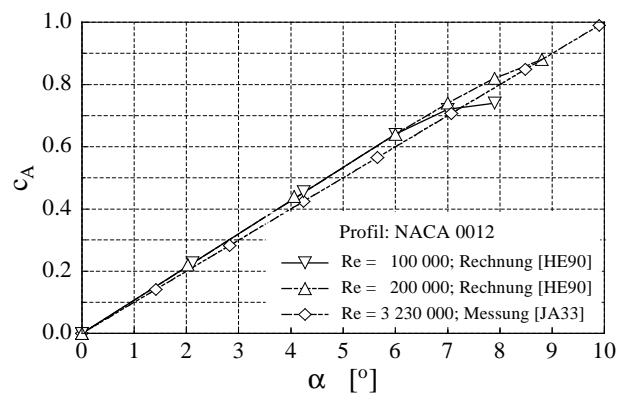


Abb. 2: Polare des NACA 0012 - Profils in Abhängigkeit der Reynoldszahl

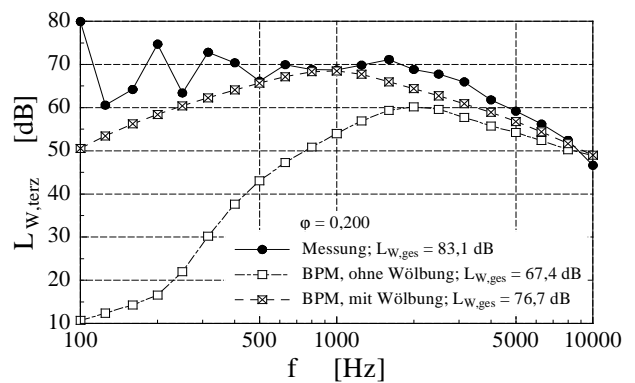


Abb. 4: Vergleich zwischen Messung und Rechnung (BPM-Modell) bei dem Betriebspunkt  $\varphi = 0,200$

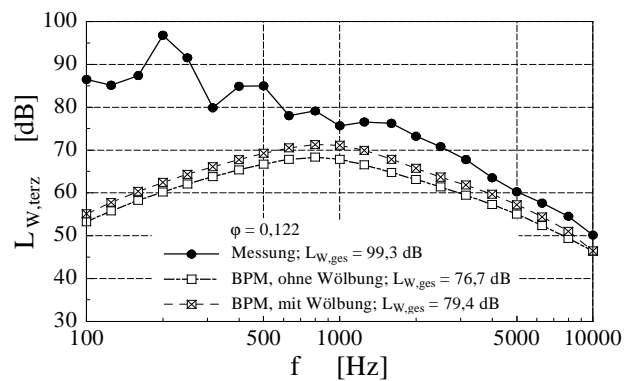


Abb. 6: Vergleich zwischen Messung und Rechnung (BPM-Modell) bei dem Betriebspunkt  $\varphi = 0,122$