

# Minderung des strömungsinduzierten Schalls bei axialen Kleinwindturbinen – Methoden und experimentelle Validierung

Kevin Volkmer



# **Minderung des strömungsinduzierten Schalls bei axialen Kleinwindturbinen - Methoden und experimentelle Validierung**

DISSERTATION

zur Erlangung des Grades eines Doktors  
der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von

Kevin Volkmer, M.Sc.

geb. am 19.05.1988 in Siegen

eingereicht bei der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät  
der Universität Siegen  
Siegen 2019

Betreuer und erster Gutachter  
Prof. Dr.-Ing. Thomas Carolus  
Universität Siegen

Zweiter Gutachter  
Prof. Dr.-Ing. Holger Foyss  
Universität Siegen

Tag der mündlichen Prüfung  
13.02.2020

Berichte aus der Strömungstechnik

**Kevin Volkmer**

**Minderung des strömungsinduzierten Schalls  
bei axialen Kleinwindturbinen –  
Methoden und experimentelle Validierung**

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.: Siegen, 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 978-3-8440-7314-0

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](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

---

## Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit hat zum Ziel, verschiedene Maßnahmen zur Reduktion des strömungsinduzierten Schalls von *sehr kleinen*, horizontalachsigen Windturbinen mit Nennleistungen im maximal zweistelligen Kilowattbereich zu untersuchen. Das Besondere an diesen Maschinen ist, dass sie zwar im Vergleich zu großen Turbinen mit hoher Drehzahl betrieben werden, aber die charakteristische Reynoldszahl der Blattformströmung trotzdem in der Größenordnung von nur  $10^5$  liegt. Dies verursacht in der Regel auf den Blättern ausgedehnte Gebiete mit einer laminaren Grenzschichtströmung und laminare Ablöseblasen mit begleitenden Schallphänomenen.

Drei konstruktive Schallminderungsmaßnahmen wurden ausgewählt und untersucht:

- Grenzschichttripping mit einem dünnen aufgeklebten Zackenband, mit dem die laminar-turbulente Transition nahe an der Vorderkante des Profils erzwungen wird
- Hinterkantenzacken als Zusatzbauteil zur Reduktion des Hinterkantenschalls
- Einsatz eines akustisch optimierten Blattprofils, ebenfalls mit dem Ziel, den Hinterkantenschall zu reduzieren.

Im Ergebnis konnte mit allen untersuchten Maßnahmen das Geräusch einer Referenzturbinen mit vergleichsweise dickem Blattprofil teilweise deutlich unterboten werden. Insgesamt erscheinen dicke Profile nicht nur aus aerodynamischer, sondern auch akustischer Perspektive ungünstiger als dünne. Bei dicken Profilen kann Tripping zwar den strömungsinduzierten Schall signifikant reduzieren, führt aber letztendlich zu Einbußen bei der Turbinenleistung. Hinterkantenzacken reduzieren den Schall in geringerem Umfang als Tripping, jedoch sind auch die Leistungseinbußen geringer. Bei einem dünnen Profil erscheinen Hinterkantenzacken vorteilhafter als Tripping zu sein.

Die angewendeten semi-empirischen Modelle zur Schallvorhersage - wichtige Grundlage bei der akustischen Profilloptimierung - zeigten deutliche Schwächen. Es wäre daher sinnvoll, künftig numerische Methoden der Computational Aeroacoustic wie z.B. die Lattice-Boltzmann-Methode zur Optimierung zu benutzen.

## Abstract

The objective of this work was to examine several measures for the reduction of the flow-induced noise of *small*, horizontal axis wind turbines with a maximal power rating in the two-digit kilowatt range. The unique attribute of these machines is that although they are working with a high rotational speed compared to large wind turbines, the characteristic Reynolds number of the blade flow still lies in the order of only  $10^5$ . This generally causes extended regions with laminar boundary layer flow and laminar separation bubbles on the turbine blades and associated noise phenomena.

Three noise reduction measures have been chosen and examined:

- Boundary layer tripping through a thin zigzag tape, which forces the laminar to turbulent transition close to the leading edge of the profile
- Trailing edge serrations as an add-on at the trailing edge of the blade, for the reduction of trailing edge noise
- Application of an acoustically optimized blade profile to reduce the trailing edge noise

As a result, it was possible to reduce the noise of a reference turbine with a relatively thick blade profile with all of the measures examined - partly even significantly. In total, a thicker profile, not only from aerodynamic but also from an acoustical perspective, seems less favorable than thin profiles. Applied to thicker profiles, tripping can significantly reduce the flow-induced noise but also reduces the turbine performance. Trailing edge serrations reduce the noise to a lesser extent compared to tripping; the decrease of turbine performance, however, is also lower. For a thin profile trailing edge serrations seem to be more favorable than tripping.

The applied semi-empirical models for noise prediction - an essential basis for acoustic profile optimization - showed significant deficiencies. Hence, it would make sense to utilize numerical methods of Computational Aeroacoustics, such as the Lattice-Boltzmann-method, for future investigations.

---

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Strömungstechnik und Strömungsmaschinen des Instituts für Fluid- und Thermodynamik (IFT) der Universität Siegen entstanden.

Zuallererst und am nachdrücklichsten möchte ich meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Thomas Carolus für die vielen fachlich und methodisch sehr wertvollen Gespräche und Anregungen, Ratschläge im wissenschaftlichen Arbeiten und Dokumentieren und die aufgebrachte Geduld bei allen Schritten dieses Promotionsprojektes danken. Außerdem schätzte ich sein großes Engagement zur Erschaffung und Aufrechterhaltung einer angenehmen und konstruktiven Atmosphäre gegenseitiger Unterstützung im Lehrstuhlteam, welche ebenfalls zum Gelingen dieser Arbeit beitrug.

Prof. Dr.-Ing. Holger Foysi möchte ich sehr für die Erstellung des Zweitgutachtens danken sowie Prof. Dr.-Ing. Oliver Nelles und Prof. Dr.-Ing. Peter Kraemer für die Vervollständigung der Prüfungskommission.

Weiterhin danke ich meinen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl für den tollen Teamgeist und den privaten und fachlich-konstruktiven Austausch. Dazu zählen Dr.-Ing. Konrad Bamberger, M.Sc. Farhan Manegar, M.Sc. Kathrin Stahl, M.Sc. Leonard Mackowski, Dr.-Ing. Carolin Feldmann, Dr.-Ing. Christoph Moisel, Dr.-Ing. Tao Zhu, Dr.-Ing. Ralf Starzmann und Dr.-Ing. Michael Kohlhaas. Bei Dr.-Ing. Tom Gerhard und Dr.-Ing. Michael Sturm bedanke ich mich zudem für die Vorarbeiten an der Kleinwindturbine der Universität Siegen auf die ich bei dieser Arbeit aufbauen konnte sowie bei Dr.-Ing. Nicholas Kaufmann für den Austausch bezüglich Optimierung und der aerodynamischen Vorhersage von Turbinen. Besonderer Dank geht auch an Dipl.-Ing. Bernd Homrighausen für die Unterstützung besonders in allen experimentellen und fertigungstechnischen Angelegenheiten sowie an Christine Krause für die wertvolle, organisatorische Unterstützung.

Zeitweise zum Team gehörten auch einige Studenten, die zum Projekt beigetragen haben, sei es als Hilfskräfte oder durch ihre studentischen Projektarbeiten. Auch diesen sei Dank.

Allen Mitarbeitern der elektrischen und der mechanischen Werkstätten des Paul-Bonatz-Campus der Universität gebührt ebenfalls mein großer Dank für die guten Absprachen, Teilefertigung und -überarbeitung, welche viele der Experimente erst ermöglichten. Für die detailverliebte Fertigung der Windturbinenblätter möchte ich ebenfalls Herrn Josef Graf ganz herzlich danken.

Zu guter Letzt danke ich meinem familiären und nahen privaten Umfeld für den Rückhalt und die Unterstützung in allen Bereichen, welche wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Nomenklatur</b>	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation .....	1
1.2 Zielsetzung .....	2
1.3 Gliederung .....	3
<b>2 Stand der Forschung</b>	<b>5</b>
2.1 Funktionsweise horizontalachsiger Windturbinen .....	5
2.2 Schallentstehungsmechanismen .....	7
2.3 Schallminderungsmaßnahmen.....	10
2.3.1 Ausblasen und Absaugen.....	11
2.3.2 Hinterkantenzacken und -bürsten.....	11
2.3.3 Grenzschichttripping .....	12
2.3.4 Modifikation der zweidimensionalen Tragflügelprofilgeometrie.....	13
2.3.5 Optimierung des dreidimensionalen Blattaufbaus .....	14
2.3.6 Drehzahlreduktion.....	15
2.4 Modelle und Verfahren zur Schallprognose und -minderung .....	16
2.4.1 Einfache empirische und analytische Schallprognosemodelle .....	16
2.4.2 Komplexere Schallprognosemodelle.....	17
2.4.3 Optimierungsverfahren.....	18
2.5 Schlussfolgerungen .....	20
<b>3 Referenzturbinen und Turbinentestfeld</b>	<b>23</b>
3.1 Referenzturbinen .....	23
3.1.1 Geometrie .....	23
3.1.2 Turbinenregelung .....	24
3.2 Turbinentestfeld.....	25
3.3 Messdatenerfassung und -verarbeitung.....	27
3.3.1 Nicht-akustische Parameter .....	29
3.3.2 Akustische Parameter .....	34
3.3.3 Stand der Technik: Performance der Referenzturbinen .....	41
<b>4 Aerodynamische Kenngrößen für ein Tragflügelsegment und ein Turbinenblatt</b>	<b>43</b>
4.1 Grundlegende Kenngrößen .....	43
4.2 Verfahren zur Berechnung der aerodynamischen Kenngrößen .....	46

4.2.1 2D-Panelsimulationsprogramm XFOIL .....	47
4.2.2 2D-RANS-Simulationsprogramm EDDYBL .....	47
4.3 Rotierendes Turbinenblatt: BEM-Programm pTide .....	48
<b>5 Einfache Schallminderungsmaßnahmen</b> .....	<b>49</b>
5.1 Grenzschichttripping .....	49
5.2 Hinterkantenzacken .....	50
<b>6 Schallminderung durch neue Profilgeometrie</b> .....	<b>53</b>
6.1 Allgemeine Vorgehensweise .....	53
6.2 Polaren- und Hinterkantenschallvorhersage .....	54
6.2.1 Modellierung der Wanddruckspektren .....	55
6.2.1.1 TNO-Modell nach LAU .....	55
6.2.1.2 Modell nach KAMRUZZAMAN .....	56
6.2.2 AMIETs erweitertes Fernfeldschallmodell .....	57
6.3 Definition der Zielgröße „Hinterkantenschalldruckpegel“ .....	60
6.4 Optimierungsparameter .....	61
6.5 Evolutionärer Optimierungsalgorithmus .....	62
6.6 Zielfunktionen .....	62
<b>7 Tragflügelsegment: Optimierungsergebnis und experimentelle Überprüfung im Windkanal</b> .....	<b>65</b>
7.1 Optimierungsergebnisse .....	65
7.1.1 Profilkontur .....	65
7.1.2 Statische Druckverteilung (XFOIL) .....	66
7.1.3 Aerodynamische Polare (XFOIL) .....	67
7.1.4 Akustische Polaren und Schalldruckspektren (Modellvorhersage) .....	67
7.2 Experimentelle Überprüfung im Windkanal .....	68
7.2.1 Statische Druckverteilung .....	69
7.2.2 Akustische Polaren und Schalldruckspektren .....	70
7.3 Diskussion und Schlussfolgerungen .....	71
<b>8 Anwendung der Schallminderungsmaßnahmen auf die Turbine</b> .....	<b>79</b>
8.1 Umsetzungsschritte .....	79
8.1.1 Grenzschichttripping .....	79
8.1.2 Hinterkantenzacken .....	80
8.1.3 Turbinenblatt mit dem optimierten Profil KV200 .....	81

---

8.2 Ergebnisse .....	85
8.2.1 Grenzschnitttripping .....	85
8.2.2 Hinterkantenzacken .....	86
8.2.3 Blattprofil.....	87
8.2.4 Kombinationen von Maßnahmen.....	89
8.3 Detailuntersuchungen .....	91
8.4 Vorläufiges Fazit .....	94
<b>9 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen</b>	<b>97</b>
<b>Anhang A: Details zu den Turbinenmessungen</b>	<b>101</b>
A.1 Verwendete Messhardware .....	101
A.2 Unsicherheitsbetrachtung der Windturbinentests .....	102
A.3 Messung der Wellenleistung .....	106
A.4 Messung der Schalleistung.....	112
A.5 Umfang der gemessenen Datensätze .....	114
A.6 Windrichtung und Ausrichtung der Turbine .....	114
A.7 Hintergrundgeräusch und Hintergrundgeräuschabstand.....	114
A.8 Methode: Schallquellenortung mit einem Mikrofonarray.....	118
<b>Anhang B: Tragflügelsegmentvermessungen</b>	<b>121</b>
<b>Anhang C: Koordinaten der optimierten Profile</b>	<b>125</b>