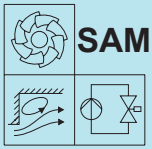
Technische Universität
Kaiserslautern

Lehrstuhl für
Strömungsmechanik und
Strömungsmaschinen - SAM



Hrsg. Prof. Dr.-Ing. M. Böhle

SAM - Fortschrittsberichte

Band 21

Thomas Reviol

A design process for propellers for the agitation of high viscous fluids based on the design analysis of wind turbine blades

A design process for propellers for the agitation of high viscous fluids based on the design analysis of wind turbine blades

Vom Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik
der Technischen Universität Kaiserslautern
zur Erlangung der venia legendi für das Fach

Fluid mechanics and energy technology

genehmigte Habilitationsschrift

von
Herrn
Dr.-Ing. Thomas Reviol
aus Saarbrücken

D386

Dekan: Prof. Dr.-Ing. Tilmann Beck
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Martin Böhle
Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Janoske

Tag der Einreichung: 06.10.2020
Tag des Habilitationsvortrags: 29.06.2021

SAM-Fortschrittsberichte

Band 21

Thomas Reviol

A design process for propellers for the agitation of high viscous fluids based on the design analysis of wind turbine blades

D 386 (Habil.-Schr. Technische Universität Kaiserslautern)

Shaker Verlag
Düren 2021

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at http://dnb.d-nb.de.

Zugl.: Kaiserslautern, TU, Habil.-Schr.,

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8188-6
ISSN 2191-8031

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9
Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

to my father

Acknowledgements

An undertaking such as this can never be accomplished without the help and support of others. In recent years, I have enjoyed the support of many friends and colleagues in the completion of this work. It is not possible to thank everyone who supported me here. I would like to thank everyone who has supported me and I would like to pay special tribute to a select few who played a significant or special part in the completion of this work:

First of all, I would like to thank Prof. Dr.-Ing. Martin Böhle for his many years of support and for our numerous professional and critical discussions. In addition to Prof. Dr.-Ing. Martin Böhle, I also want to thank Prof. Dr.-Ing. Uwe Janoske for preparing the expert reports. I would also like to express my thanks to the members of the Habilitation Commission: Prof. Dr.-Ing. Martin Böhle, Prof. Dr. Nicolas Gauger, Prof. Dr.-Ing. Erik von Harbou, Prof. Dr.-Ing. Alois Schlarb, Dr.-Ing. Kai Nikolaus and Janik Röckel.

I would also like to thank all my colleagues who I have worked with at the Institute over the years for their good cooperation and mutual support. In particular, Stefan Kluck and Peng Wang, with whom I had the opportunity to conduct some joint research.

Over the years, some colleagues became friends. To name a few of them: Rebecca Schäfer, Marco Schönwald and Anika Theis. They were always prepared to lend me a sympathetic ear. Especially the many supportive discussions with Anika Theis gave me further motivation, particularly towards the final stages of my thesis, which helped me to complete the thesis.

Most of all, I would like to thank my family: my wife Rebecca and my three children Lillie, Nora and Erik. Over the years, my family have experienced many highs and lows and has always accepted these in a wonderful way. They supported and motivated me every step of the way. Without them, this thesis would never have been possible. Thank you so much!

Obersülzen, July 2021, Thomas Reviol

Abstract

The subject of this thesis is the design of axial flow machines. The type of turbomachine under examination is used to supply energy for high viscous fluid flow, as used in mixing and stirring tasks. The high viscous media treated in these tasks usually have non-Newtonian fluid properties. This kind of fluid flow is frequently associated with the field of energy and process engineering. In order to narrow down the problem described, the field of turbomachinery is restricted to the consideration of propellers. Propellers are used in a wide range of fluid mechanics tasks. In the form of wind turbines, propellers extract kinetic energy from a control room and thereby slow down the flow. Propeller stirrers, on the other hand, increase the energy level of a flow and accelerate it. Both machines are based on the same principle – only the direction of the energy flow is to be considered as the opposite direction.

The design of new agitators is usually based on experience. Often, agitators are, therefore, not flow-optimised, and cannot be optimally operated. In this thesis, it is investigated whether the design processes of modern wind turbines, which are considered to be mature, can be adapted in order to generate a flow-optimised geometry for this type of turbomachine as well.

This thesis will first examine the basics of wind turbine design processes. Special attention will be paid to the differences caused by the viscous fluid properties under consideration. The highly viscous behaviour of the fluids under consideration means that the theoretical fundamentals have to be extended as a result. Such extensions are identified and supplement the theoretical basis. The thesis will then present and examine an analytically based design process for flow-optimised propeller mixers. The procedure is based on *blade element momentum theory*.

Application of *blade element momentum theory* requires detailed knowledge of the aerodynamic behaviour of the profiles used. This behaviour is usually only known for low viscosity and high-Re applications, as is usually the case for wind turbines or propeller engines. Comprehensive profile characteristics are not available for highly viscous and low-Re applications. In this thesis, these basics are generated using numerical methods.

In the next step, the newly introduced design method is combined with the results of the investigations of profile aerodynamics for high viscous low-Re fluid flow. This combination is done using a calculation process which produces the flow-optimised geometry of a propeller mixer. The theoretical principles of the methods are implemented in an algorithm in such a way that the resultant turbomachine can be designed for a previously selected operating point, the design point. In contrast to classical turbomachinery, the design point additionally requires the specification of viscous fluid properties.
However, in practical use, the final selected operating point of a turbomachine is often not the design point. The algorithm is examined for its suitability for inverse power calculation as well in order to compute the complete characteristic curve for a previously generated propeller mixer already in the design process.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit stellt einen Beitrag zur Auslegung axial fördernder Strömungsmaschinen dar. Der untersuchte Typ einer Strömungsmaschine dient der Energiezufuhr in Strömungen hochviskoser Medien, wie diese z.B. für Misch- und Rühraufgaben eingesetzt werden. Die dort behandelten hochviskosen Medien verfügen meist über nichtnewtonsche Fluideigenschaften und treten häufig im Bereich der Energie- und Verfahrenstechnik auf.
Um das beschriebene Problem einzugrenzen, steht als Strömungsmaschine der Propeller im Fokus der Arbeit. Propeller werden in vielfältigen strömungsmechanischen Fragestellungen eingesetzt. In Form von Windenergieanalagen entziehen Propeller einem Kontrollraum kinetische Energie, und verzögern auf diese Art die Strömung. Propellerrührer hingegen erhöhen das Energieniveau einer Strömung und beschleunigen diese. Beide Maschinen basieren auf denselben Grundlagen – lediglich die Richtung des Energieflusses ist entgegengesetzt zu betrachten.
Der Entwurf neuer Rührorgane basiert in der Regel auf Erfahrung. Oft verfügen Rührorgane deswegen nicht über eine strömungsoptimierte Form und können nicht optimal betrieben werden. In dieser Arbeit wird untersucht, ob die als ausgereift geltende Auslegungsprozedur moderner Windenergieanalagen auf Propellerrührer adaptiert werden kann, um eine strömungsoptimierte Geometrie auch für diese Art Strömungsmaschine zu generieren.
Zunächst werden in dieser Arbeit die Grundlagen der Auslegungsprozeduren von Windenergieanalagen analysiert. Insbesondere die Unterschiede infolge des betrachten Fluides werden hierbei berücksichtigt. Durch das hochviskose Verhalten der betrachteten Fluide ergeben sich notwendige Erweiterungen der theoretischen Grundlagen. Diese werden identifiziert und die theoretische Basis wird um diese notwendigen Erweiterungen ergänzt. Daran anschließend wird eine analytisch basierte Auslegungsprozedur für strömungsoptimierte Propellermischer eingeführt und untersucht. Diese basiert auf der Verwendung der *Blattelement-Momenten-Methode*.
Die Verwendung der *Blattelement-Momenten-Methode* erfordert das detaillierte Wissen über das aerodynamische Verhalten der eingesetzten Profile.

Dieses Verhalten ist bislang meist nur für niedrigviskose high-Re Anwendungsfälle bekannt, wie dies üblicherweise bei Windenergieanalagen oder bei Propellertriebwerken der Fall ist. Für hochviskose low-Re Anwendungen sind umfassende Profilcharakteristika nicht vorhanden. Diese Grundlagen werden im Rahmen dieser Arbeit mit numerischen Methoden generiert.
Die neu eingeführte Auslegungsprozedur wird im letzten Schritt der Arbeit mit der Profilaerodynamik für hochviskose low-Re Strömungen kombiniert. Die Kombination erfolgt in einer numerischen Prozedur, deren Resultat die strömungsoptimierte Geometrie eines Propellerrührers ist. Die theoretischen Grundlagen der Methoden werden derart in einem Algorithmus umgesetzt, dass die resultierende Strömungsmaschine für einen zuvor gewählten Auslegungspunkt zur Verfügung gestellt werden kann. Im Gegensatz zum klassischen Strömungsmaschinenbau erfordert der Auslegungspunkt zusätzlich die Angabe der viskosen Fluideigenschaften.
Kenntnisse über den im Betrieb anfallenden Leistungsbedarf einer Strömungsmaschine sind wesentlich zur Einsparung von Ressourcen. Häufig ist der gewählte Betriebspunkt einer Strömungsmaschine allerdings nicht der Auslegungspunkt. Es wird daher weiterhin untersucht, inwiefern der verwendete Algorithmus invers ausgeführt werden kann, um das Leistungskennfeld a priori für zuvor generierte Propeller zu berechnen.

Contents

List of Figures

List of Tables

Nomenclature

Latin symbols

Symbol	Description	Unit
$\mathbf{1}$	Unit tensor	$-$
a	Factor of interference, approximation factor	$-$
A	Area	m^2
b	Width	m
c	Absolute velocity	m/s
$\mathfrak{c}$	Concentration	$wt.\%$
C	Coefficient	$-$
D	Diameter	m
$\mathbf{D}$	Rate of deformation tensor	s^{-1}
De	Deborah number	$-$
E	Energy	J
f	Function	$-$
F	Force	N
$\mathcal{F}$	Antiderivative of a function	$-$
g	Gravity constant	$m\,s^{-2}$
G	Shear modulus	MPa
H	Height	m
i	Control variable	$-$
I	Momentum	$N\,s$
j	Control variable	$-$
k	Control variable	$-$
$\mathfrak{k}$	Consistency	$Pa\,s^{\mathfrak{m}}$
l	Chord length	m
L	Length	m
$\mathbf{L}$	Velocity gradient tensor	s^{-1}
m	Mass	kg
$\mathfrak{m}$	Flow index	$-$

Symbol	Description	Unit
$\dot{m}$	Mass flow rate	$kg\,s^{-1}$
$\vec{n}$	Normal vector	m
n	Shaft speed	min^{-1}
n_{z}	Amount of an entity	$-$
Ne	Newton number	$-$
p	Pressure	Pa
P	Power	W
R	Radius	m
r	Coordinate, radial direction	m
Re	Reynolds number	$-$
$\mathbf{S}$	Cauchy stress tensor	Pa
t	Time	s
T	Torque	Nm
$\mathbf{T}$	Extra stress tensor	Pa
$\mathcal{T}$	Mixing time	s
u	Circumferential velocity	m/s
v	Velocity magnitude	m/s
v_{x}	Velocity component in x-direction	m/s
v_{y}	Velocity component in y-direction	m/s
v_{z}	Velocity component in z-direction	m/s
V	Volume	m^3
$\dot{V}$	Volume flow rate	$l\,s^{-1}$
w	Relative velocity	m/s
x	Coordinate, x-direction	m
$\mathfrak{X}$	Arbitrary entity	$[\ldots]$
$\underline{\mathfrak{X}}$	Matrix with arbitrary entities	$[\ldots]$
y	Coordinate, y-direction	m
z	Coordinate, z-direction	m

Greek symbols

Symbol	Description	Unit
α	Flow angle	$^\circ$
γ	Shear strain	$-$
$\dot{\gamma}$	Rate of shear strain	s^{-1}
Γ	Circulation	$m^2\,s^{-1}$
δ	Glide angle	$^\circ$
ε	Longitudinal strain	$-$
ϵ	Lift-to-drag ratio	$-$
$\dot{\varepsilon}$	Rate of longitudinal strain	s^{-1}
ζ	Angle of jet divergence	$^\circ$
η	Efficiency	$-$
θ	Temperature	K
ϑ	Coordinate, angular direction	$^\circ$
Θ	Relative angle	$^\circ$
λ	Relaxation time	s
Λ	Tip speed ratio	$-$
μ	Dynamic viscosity	$Pa\,s$
μ_0	Dynamic zero-shear-rate-viscosity	$Pa\,s$
μ_∞	Dynamic infinity-shear-rate-viscosity	$Pa\,s$
ν	Kinematic viscosity	$m^2\,s^{-1}$
π	Dimensionless entity, Archimedes' constant	$-$
ρ	Density	$kg\,m^{-3}$
σ	Normal stress	Pa
ς	Standard deviation	$[...]$
τ	Shear stress	Pa
τ_0	Yield stress	Pa
Υ	Auxiliary function	$[\ldots]$
φ	Mounting angle	$^\circ$
χ	Scalar-valued function	$[\ldots]$
ψ	Normal stress coefficient	$Pa\,s^2$
ω	Frequency	s^{-1}

Subscripts

Symbol	Description
0	Point upstream from propeller
1	Point in propeller plane
2	Point downstream from propeller
$-\infty$	Unaffected position, upstream from propeller
$+\infty$	Unaffected position, downstream from propeller
∞	Ambient condition
C	Circumferential
CA	Profile camber
Co	Entity of core or initial region of jets
D	Drag
Dev	Entity of fully developed flow of jets
Des	Design point
Eff	Effective value
En	Entrainment
L	Lift
Hub	Hub
Ind	Induced
Jet	Jet
LE	Leading edge
m	Meridional component
max	Maximum value
mean	Mean value
n	Normal component of an entity
OP	Operating point
P	Quantity related to propeller
PP	Quantity related to the propulsion
R	Resulting
t	Tangential component of an entity
T	Thrust
TE	Trailing edge

Symbol	Description
TH	Profile thickness
u	Swirl component

Superscripts

Symbol	Description
$\mathcal{X}^*$	Hypothetical value
$\vec{\mathcal{X}}$	Vectorial formulation of an entity
$\overline{\mathcal{X}}$	Mean value
$\hat{\mathcal{X}}$	Arbitrary spatial position
$\check{\mathcal{X}}$	Reaction force
$\widetilde{\mathcal{X}}$	Simplified value
$\mathcal{X}'$	Space derivative
$\dot{\mathcal{X}}$	Time derivative
$\mathcal{X}^+$	Dimensionless distance in space
$\mathcal{X}_{\mathcal{P}-}$	Entity infinitesimal upstream from point $\mathcal{P}$
$\mathcal{X}_{\mathcal{P}+}$	Entity infinitesimal downstream from point $\mathcal{P}$

Abbreviations

Symbol	Description
BEM	Blade element momentum theory
CAD	Computer aided design
CMC	Carboxymethyl cellulose
CFD	Computational fluid dynamics
GG	Guar gum
LBM	Lattice-Boltzmann method
LES	Large eddy simulation
LVE	Linear viscoelastic regime
$NLVE$	Non-linear viscoelastic regime
PAA	Polyacrylamide
$RANS$	Reynolds-averaged Navier-Stokes equations
UDA	Ultrasonic Doppler anemometry
XG	Xanthan gum