Über den Einfluss der freien Oberfläche auf die Leistungsausbeute von Wasserkraft bei kleiner Fallhöhe

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

genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Manuel Metzler

aus Bad Kreuznach

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Peter F. Pelz
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Frank-Hendrik Wurm
Tag der Einreichung:	18.04.2016
Tag der mündlichen Prüfung:	28.06.2016

Darmstadt 2016

D 17

Forschungsberichte zur Fluidsystemtechnik

Band 12

Manuel Metzler

Über den Einfluss der freien Oberfläche auf die Leistungsausbeute von Wasserkraft bei kleiner Fallhöhe

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2016

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., 2016

Copyright Shaker Verlag 2016
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4759-2
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

Sowohl bei zukünftigen Gezeitenkraftwerken, d.h. Turbinenfeldern im Gezeitenstrom, als auch bei bestehenden Flusskraftwerken, insbesondere bei Kaskaden von Flusskraftwerken, ist der Einfluss der freien Wasseroberfläche auf die Energiewandlung nicht zu vernachlässigen. Dennoch ist es bis heute üblich, hydrokinetische Wasserturbinen wie Windturbinen zu behandeln und den Einfluss der freien Oberfläche zu ignorieren. Aus mathematischer Sicht wird ein eigentlich hyperbolisches System mit mehrdeutigen Lösungen elliptisch behandelt, indem die Zahl der Veränderlichen unzulässig reduziert wird. Der analoge Fehler in der Gasdynamik ist die Beschreibung einer kompressiblen Strömung als inkompressibel. Die Ignoranz dieses physikalischen Kerns der Energiewandlung führt zu dem scheinbaren Widerspruch, dass das für Windkraft wohlbekannte Betzsche Gesetz bei Fluss- und Gezeitenkraft scheinbar verletzt wird.

Auf dieses Problem habe ich im Jahr 2011 hingewiesen und aus dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik unter Berücksichtigung der freien Oberfläche eine maximal mögliche Obergrenze für die Energiewandlung: Maximal 50% der verfügbaren Leistung einer Strömung mit freier Oberfläche können in mechanische Wellenleistung gewandelt werden, aufgezeigt. Dies wird durch den Erntefaktor $C_\mathrm{P} < 50\%$ ausgedrückt. Dies gilt, (i) wenn die Turbine ideal (Turbinenwirkungsgrad $\eta_\mathrm{T} = 100\%$) ist, (ii) der Betriebspunkt optimal (Turbinengefälle ist gleich 2/5 der effektiven Höhe, $\overline{H}_\mathrm{T} = H_\mathrm{T}/(\eta_\mathrm{T} H_\mathrm{eff}) = 2/5,$) ist sowie die kritische Abströmung gemessen in Vielfachen der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit ($Fr_2 = u_2/\sqrt{gh_2} = 1$) und (iii) der gesamte Volumenstrom zur Energiewandlung genutzt werden können.

Offensichtlich ist gerade der letzte Punkt (iii) bei Turbinenfeldern im Gezeitenstrom nicht erfüllt, da nur der Anteil σ des Strömungsquerschnitts für die Energiewandlung zur Verfügung steht. Ist $\sigma < 1$, spaltet sich der Gesamtvolumenstrom in einen Turbinen- und einen Bypass-Volumenstrom auf. Dies hat aus energetischer Sicht zwei Konsequenzen: Erstens ist die volumetrische Effizienz kleiner als Eins, zweitens kommt es im Nachstrom zu Verlusten, wenn sich die beiden Ströme vermischen. Als Konsequenz ist der

Erntefaktor in jedem Fall kleiner als der theoretisch mögliche Erntefaktor: $C_\mathrm{P}(\sigma, \overline{H}_\mathrm{T}, Fr_2) < 50\%$.

Forschungsfrage

Vom funktionellen Zusammenhang $C_\mathrm{P}(\sigma, \overline{H}_\mathrm{T}, Fr_2)$ war am Anfang der Arbeit von Herrn Metzler nur die Obergrenze, nämlich 1/2, bekannt. Weiterhin war ein Ansatz formuliert, der die Bestimmung von $C_\mathrm{P}(\sigma, \overline{H}_\mathrm{T}, Fr_2)$ versprach. Herr Metzler stellt sich daher der Aufgabe die Funktionen $C_\mathrm{P}(\sigma, \overline{H}_\mathrm{T}, Fr_2)$, $\varepsilon(\sigma, \overline{H}_\mathrm{T}, Fr_2)$, $\beta_+(\sigma, \overline{H}_\mathrm{T}, Fr_2)$ sowohl theoretisch als auch experimentell zu bestimmen. ε bemisst dimensionslos den Vermischungsverlust im Nachstrom. β_+ ist das Verhältnis von Turbinenvolumenstrom zu Gesamtvolumenstrom. Es ist damit die volumetrische Effizienz der Turbine.

Methode

Herr Metzler bildete die Strömung durch eine generische Turbine eines Turbinenfeldes ab. Dabei wird das Gesamtsystem aus fünf Stromröhren abgebildet. Für jede Stromröhre werden die Energiegleichung, der Impulssatz und die Kontinuitätsgleichung in integraler Form formuliert. In der Konsequenz ergibt sich ein algebraisches, nichtlineares Gleichungssystem, welches mehrdeutige Lösungen hat. Herr Metzler entwickelt zur Lösung dieses Gleichungssystems einen, dem Problem angepassten, Gleichungslöser. Durch die problemspezifische Herangehensweise gelingt es Herrn Metzler die Lösungen sehr genau zu gewinnen und zu bewerten.

Als Randbedingungen dienen die effektive Höhe im Oberwasser H_1 und die Froude-Zahl im Unterwasser Fr_2. Unabhängiger Betriebsparameter ist das verallgemeinerte Turbinengefälle $\overline{H}_\mathrm{T}$. Unabhängiger geometrischer Paramater ist der Versperrungsgrad σ.

Parallel zu dem numerischen Gleichungslöser konzeptionierte und konstruierte Herr Metzler einen Gerinnekanal. Mit dessen Hilfe konnten die analytisch gewonnen Ergebnisse validiert werden.

Ergebnisse

Die Ergebnisse des Gleichungslösers, nämlich Erntefaktor $C_\mathrm{P}(\sigma, \overline{H}_\mathrm{T}, Fr_2)$, Dissipationsfunktion für die Nachlaufverluste $\varepsilon(\sigma, \overline{H}_\mathrm{T}, Fr_2)$ und volumetrische Effizienz $\beta_+(\sigma, \overline{H}_\mathrm{T}, Fr_2)$ konnten experimentell validiert werden. Ein aus meiner Sicht besonders schönes Ergebnis ergibt sich aus Folgendem:

Nicht jede Kombination $(\sigma, \overline{H}_{\mathrm{T}}, Fr_2)$ an unabhängigen Parametern führt zu einer stationären Lösung des Problems. Für ein gegebenes σ und $\overline{H}_{\mathrm{T}}$ gibt es einen Bereich $Fr_{2\min}(\sigma, \overline{H}_{\mathrm{T}}) < Fr_2 < Fr_{2\max}(\overline{H}_{\mathrm{T}})$, in welchem ein instationärer Schwall entsteht. Sehr überzeugend gelingt es Herrn Metzler sowohl experimentell als auch analytisch dieses Phänomen zu ergründen. Die Ergebnisse von Herrn Metzler dienen als Grundlage dazu, Turbinenfelder energetisch zu bewerten und optimal zu Regeln.

Darmstadt, im Sommer 2016
Prof. Dr.-Ing. Peter Pelz

Vorwort

Diese Dissertation entstand auf Basis der Forschungsergebnisse, die ich während meiner vierjährigen Anstellung als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fluidsystemtechnik der technischen Universität Darmstadt erarbeitete. Jede wissenschaftliche Arbeit beginnt mit dem Stellen der richtigen Forschungsfragen. In diesem Zusammenhang gilt mein erster Dank dem Institutsleiter Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Pelz, der mit seiner grundlegenden Arbeit im Kontext der Wasserkraft in offenen Gerinneströmungen ein ganzes Feld interessanter Forschungsfragen erschloss. Während der vier Jahre der Zusammenarbeit, stand Prof. Pelz mir jederzeit als Diskussionspartner und Kritiker zur Verfügung. Mit seinen fachlichen Impulsen trug er zum Gelingen meiner Arbeit bei.
Ebenso gilt mein Dank der KSB-Stiftung, die das Forschungsprojekt, in dessen Rahmen die vorliegende Dissertation entstand, förderte.
Hannah Arendt wird der Ausspruch „Wahrheit gibt es nur zu Zweien“ zugesprochen. In diesem Sinne möchte ich mich bei meinen Kollegen bedanken, die sich bei vielen Gelegenheiten bereitwillig darauf einließen, meine Arbeit mit mir zu diskutieren. Ihre unvoreingenommene Sicht als Außenstehende bewahrte mich davor, gedanklich in eingefahrene Gleise zu geraten und regte an, sich immer neu zu hinterfragen.
Stellvertretend für die Mitarbeiter der Institutswerkstatt möchte ich Herrn Udo Trometer danken. Sein hohes Engagement trug dazu bei, dass innerhalb kurzer Zeit ein Gerinneprüfstand im Labor des Institutes für Fluidsystemtechnik aufgebaut werden konnte. Ich danke weiterhin den Studenten, die mit Begeisterung und Sorgfalt beim Aufbau, der Inbetriebnahme und im Messbetrieb des Gerinneprüfstandes mitwirkten.
Der letzte und wichtigste Dank gilt meiner Frau Vanessa Metzler und insbesondere meinen Eltern Hiltrud und Manfred Metzler, denen diese Arbeit gewidmet ist.

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

Gebroth, im Februar 2016
Manuel Metzler

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**

1.1 Historie anhand des Cordierdiagramms 2
1.2 Zukunftsperspektiven der Wasserkraft 6
1.3 Motivation, Zielsetzung und Vorgehensweise 9

2 Modellbildung **14**

2.1 Grundgleichungen für Gerinneströmungen 14
2.1.1 Grundlegende Annahmen 14
2.1.2 Energiegleichung 15
2.1.3 Kontinuitätsgleichung 17
2.1.4 Impulssatz 17
2.2 Begriffsdefinition der kleinen Fallhöhe 18
2.3 Turbinenmodell 19
2.4 Verlustmechanismen und Kenngrößen 23
2.4.1 Verlustmechanismen 23
2.4.2 Volumetrische Effizienz 24
2.4.3 Mischungsineffizienz 24
2.4.4 Gesamtwirkungsgrad 25
2.4.5 Erntefaktor C_{P} 25
2.5 Analogie zu kompressiblen Gasströmungen 28
2.5.1 Stationäres Ausströmen aus einem Becken 28
2.5.2 Mehrdeutigkeit des Turbinenmodells 34
2.5.3 Schwall und hydraulischer Sprung 37
2.6 Gezeitenmodell 39
2.6.1 Gezeitenströmung im leeren Kanal $\sigma = 0$ 43
2.6.2 Gezeitenströmung mit Damm $\sigma = 1$ 44
2.6.3 Abschätzung der Phasenverschiebung Δt 45
2.7 Lösungsverfahren 46

3 Ergebnisse **49**
3.1 Optimaler Betrieb 50
3.1.1 Freies Ausströmen 50
3.1.2 Vorgegebene Unterwassertiefe 56
3.2 Auftreten von Schwallwellen 62
3.3 Teillastbetrieb 64
3.3.1 Erntefaktor 64
3.3.2 Volumetrische Effizienz 67
3.3.3 Mischungsineffizienz 67
3.4 Turbinenkaskaden 69
3.4.1 Kaskadenauslegung als geometrische Reihe 72
3.4.2 Anzahl der Turbinen und Restglied 74
3.5 Validierung 75
3.5.1 Versuchsaufbau 75
3.5.2 Messverfahren 78
3.5.3 Überprüfung der Modellannahmen 80
3.5.4 Fehlerabschätzung 84
3.5.5 Messergebnisse 85

Zusammenfassung **92**

A Galerie **97**
A.1 Momentaufnahme einer Schwallwelle 97
A.2 Prüfstandsansichten 98
A.3 Rechengitter 99
A.4 Fehlerrechnung 100
A.5 Hüllkurve der Vermischungslänge 101
A.6 Analoge Größen, Gerinnehydraulik - Gasdynamik 101