

Universität der Bundeswehr München

Institut für Wasserwesen

Hydromechanik und Wasserbau

Mitteilungen

Heft 125 / 2016

Die Steffturbine

**Experimentelle und theoretische Untersuchungen zu
einer Kleinwasserkraftanlage mit Bindegliedfunktion
zwischen ober- und unterschlächtiger Wirkungsweise**

Dr.-Ing. Ivo Baselt

Neubiberg 2016

Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar

Mitteilungen / Institut für Wasserwesen; Heft 125

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Malcherek
Hydromechanik und Wasserbau

Institut für Wasserwesen
Universität der Bundeswehr München
Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg
Tel: +49 (0)89/6004-3876 (Prof. Maöcherek)
Fax: +49 (0)89/6004-3858
<http://www.unibw.de/ifw>

Satz: Institut für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr München
85577 Neubiberg

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

Printed in Germany
Druck gefördert aus Haushaltsmitteln der Universität der Bundeswehr München

ISBN 978-3-8440-4387-7

Shaker Verlag GmbH * Postfach 101818 * 52018 Aachen
Telefon : 02407 / 9596-0 * Telefax 02407 / 9596-9
Internet: www.shaker.de * E-Mail: info@shaker.de

Vollständiger Abdruck der an der Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften der Universität der Bundeswehr München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Gutachter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Malcherek

Universität der Bundeswehr München
Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften
Institut für Wasserwesen

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stephan Theobald

Universität Kassel
Institut für Wasser, Abfall, Umwelt
Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Stamm

Technische Universität Dresden
Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Wasserbau und THM

Die Dissertation wurde am 08.06.2015 bei der Universität der Bundeswehr München eingereicht und durch die Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften am 03.12.2015 angenommen. Die mündliche Prüfung fand am 19.01.2016 statt.

Vorwort

2010 wandte sich die Walter-Reist-Holding (WRH) mit einer Anfrage an mich, eine Wasserkraftanlage zu untersuchen, in der das Triebwasser ein über zwei Laufräder gespanntes Förderband antreibt. Da die WRH ein hohes Know How in der Herstellung reibungsarmer Förderbänder mitbrachte, entwickelte sich aus diesem Erstauftrag eine langjährige Kooperation zur Entwicklung der später als Steffturbine bezeichneten Turbine.

Nach ersten vielversprechenden Untersuchungen der Steffturbine in unserem Labor stieg Hauptmann Ivo Baselt in dieses Projekt ein, mit dem Auftrag, die Laborergebnisse durch eine möglichst umfassende Theorie zur Steffturbine zu begleiten, um in der Folge optimale Steuerungsalgorithmen für den Betrieb der Turbine und weitere konstruktive Verbesserungen zu explorieren.

Die vorliegende Dissertationsschrift zeigt, dass es durchaus möglich ist, die Wirkungsweise, d.h. die Leistungs- und die Wirkungsgradkennlinien einer solchen Turbine sehr genau und ab initio mit einem hydraulisch-mechanischen Modell zu beschreiben. Damit wird auch mit dieser Arbeit gezeigt, dass die klassische Koeffizientenhydraulik auch im Energiewasserbau durch physikalisch komplexere, aber immer noch algebraisch lösbare Modelle weitgehend verbessert werden kann.

München, im März 2016

Prof. Dr.-Ing. Andreas Malcherek

Danksagung

Diese Dissertation entstand hauptsächlich während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr München. Wann immer sich neben der Forschung etwas freie Zeit für Sport gefunden hat, habe ich mich auf mein Rennrad geschwungen. Ich habe im Nachhinein viele Parallelen zwischen meiner Doktorandenzeit und einem Eintagesrennen im Rennradsport festgestellt. Nach dem Start gibt es eine kurze neutralisierte Phase zum lockeren Einrollen. Man kann noch etwas die Atmosphäre schnuppern, bevor der scharfe Rennstart erfolgt. Ab jetzt weiß man, dass es ernst wird. Doch in einem Rennstall fährt man nicht allein. Verschiedene Menschen begleiten einen über die ganze Zeit oder auch nur abschnittsweise.

Meinen Dank gilt zuallererst Prof. Dr.-Ing. Andreas Malcherek, der die Funktionen Teamchef, Trainer, Rennorganisator, Rennkommissar und Dopingkontrolleur in sich vereint. Als Teamchef hat er mich als jungen Nachwuchsfahrer aus der Amateurmansschaft in den Profizirkus geholt. Als Trainer hat er mich auf schöne Vorbereitungsetappen geschickt aber auch so manchen gemeinen Berg erklimmen lassen, wo es richtig weh tat und mühselig war. Aber er wusste, dass man oben am Gipfel mit einer grandiosen Aussicht belohnt wird.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Stephan Theobald und Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Stamm bin ich sehr dankbar, dass Sie sich als zweite Rennkommissare zur Verfügung gestellt haben. Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Thienel danke ich sehr für sein Engagement als Vorsitzender des Promotionsausschusses.

Meinen Radmonteuren und Technikern im Labor bin ich sehr für Ihren unermüdlichen Einsatz und Einfallsreichtum verbunden, mir jeden Morgen immer eine perfekte Rennmaschine bereitzustellen. Der Walter Reist Holding AG als mein Projektpartner danke ich recht herzlich für die sehr angenehme Zusammenarbeit und das technische Sponsoring. Vor allem möchte ich noch meinen Teamkollegen Christian, Stefan, Bert, Eric, Oliver, Gustavo und natürlich Helmut als „capitaine de route“ danken. Jeder musste sicherlich immer wieder mal für sich ein Einzelzeitfahren bestreiten aber dann konnten wir uns am nächsten Renntag im Belgischen Kreisel abwechseln. Meinen Studenten danke ich für Ihr Engagement und dass sie mich bei manchen Rennen aus dem U23-Team heraus unterstützten. Einen großen Dank geht an Karina für die Unterstützung bei den Zeichnungen. Meinem guten Freund Matthias „Matze“ Seel bin ich sehr für die gemeinsame Doktorandenzeit und so manches Spinning-Training verbunden.

Einen besonderen Dank gilt meiner Familie und meinen Freunden, die an der Strecke standen, mir zujubelten und mich anfeuerten. Lieber Hauskreis wie wichtig waren mir doch Eure Gebete? Sehr dankbar bin ich Jürgen Horzella für sein gewissenhaftes Gegenlesen der gesamten Arbeit. Meinen Kameraden des Ausbildungszentrum Pioniere in Ingolstadt danke ich für ihren Flankenschutz.

Ich weiß nicht so recht wie ich mich je bei Tanja adäquat bedanken könnte. Sie hat mich motiviert, wenn ich mal keinen Antrieb hatte mich aufs Rad zu setzen. Sie baute mich auf, wenn es Rückschläge gab. Vor allem freute Sie sich meistens mehr als ich, wenn nach einem Schritt zurück zwei Schritte nach vorne folgten. Und Sie hat mich immer daran erinnert, dass Rennradfahren nicht alles im Leben ist.

Und da steht man nun im Ziel vor der jubelnden Menge auf dem Siegerpodest. Da erkenne ich ganz hinten im Schatten jemanden, der gar nicht auffallen will und nur zufrieden lächelt. Es ist derjenige dem ich alles zu verdanken habe. Danke Jesus!

Ich widme diese Arbeit meinem am 01. November 2015 leider viel zu früh verstorbenen Laborleiter Dr. Helmut Kulisch.

Gilching, im März 2016

Dr.-Ing. Ivo Baselt

Kurzfassung und Aufbau der Arbeit

In den letzten beiden Jahrzehnten hat sich durch die veröffentlichten Energieszenarien und Potentialstudien, sowie durch politische und gesellschaftliche Forderungen eine rasante Veränderung im Bereich der erneuerbaren Energien vollzogen. Mit **Kapitel 1** wird zunächst die vorliegende Arbeit in die Thematik der erneuerbaren Energien eingeordnet. Die Betrachtung der Energiewandlungskette zeigt wie die Überführung einer Rohstoffressource in nutzbare Energie stets mit Verlusten behaftet ist. Die Wasserkraft zeichnet sich in diesem Kontext mit Einordnung in die Primärenergie durch eine vergleichsweise hohe Effizienz aus. Die Gegenüberstellung von zentraler und dezentraler Energieversorgung untermauert das Erfordernis, die Wasserkraft im Bereich der erneuerbaren Energien zu nutzen.

Besonders der erhöhte Bedarf an dezentraler Energiebereitstellung förderte die Entwicklung von ökologisch verträglichen Kleinwasserkraftanlagen. Viele Besitzer modernisierter bereits in die Jahre gekommenen Konstruktionen. Weitere bisher ungenutzte Standorte konnten erst durch die Einführung der Einspeisevergütung rentabel erschlossen werden. Da unterschiedliche Definitionen für den Bereich der Kleinwasserkraft vorherrschen, wird in **Kapitel 2** dieser Begriff zunächst größenordnungsmäßig abgegrenzt. Die nachfolgende Betrachtung des Bestandes und der Wasserkraftpotentiale sowohl auf nationaler wie internationaler Ebene zeigt die Notwendigkeit der wissenschaftlichen Thematisierung. Dass die Kleinwasserkraft einen wesentlichen Beitrag zur Versorgungssicherheit leisten kann, zeigen nicht nur entsprechende Potentialstudien, sondern auch die Vielzahl an neu entwickelten Turbinenkonstruktionen. Diese werden im Unterkapitel zum aktuellen Stand der Wissenschaft und der Technik vorgestellt. Im Schwerpunkt stehen die sich auf dem Markt befindlichen Typen von Kleinwasserkraftturbinen. Besonders moderne oberflächliche Wasserräder und Wasserkraftschnecken sind in ihrer Konstruktion bereits sehr ausgereift und durch vielfachen Einsatz praktisch erprobt. Sie erreichen hohe Wirkungsgrade und überzeugen durch robustes und betriebsfreundliches Verhalten. Die Steffturbine steht in direkter Marktkonkurrenz zu diesen Turbinentypen. Als eine neuartige Turbine im Bereich der Kleinwasserkraft wird sie durch diese Arbeit erstmalig umfassend wissenschaftlich untersucht und beschrieben.

Um auf dem hart umkämpften Markt der erneuerbaren Energien bestehen zu können, ist ein messtechnischer Leistungsnachweis mit anschließender wissenschaftlicher Veröffentlichung durch ein neutrales und qualifiziertes Institut unverzichtbar geworden.

Die Walter Reist Holding AG trat diesbezüglich als Hersteller der Steffturbine an das Institut für Wasserwesen heran. Unter Laborbedingungen galt es die Leistungsfähigkeit der Steffturbine experimentell nachzuweisen. In **Kapitel 3** werden sowohl die verschiedenen Messaufbauten beschrieben, als auch die Messergebnisse erläutert und beurteilt. Die ermittelten Daten zeigen ein breites Leistungsspektrum bis 11 kW bei einem Durchfluss von 400 l/s und 4 m Fallhöhe. Der Turbinenwirkungsgrad kann dabei einen Wert bis 90% annehmen. Mit einer zusätzlichen experimentellen Untersuchung wird der Teilfüllungsgrad für unterschiedliche hydraulische Ausgangssituationen berechnet. Weiterhin zeigt sich mit einem Trockenlauf, dass die mechanischen Verluste proportional zur Drehzahl steigen und zusätzlich in Abhängigkeit der Turbinenneigung stehen.

Zur Vertiefung der Kenntnisse zum Funktionsprinzip der Steffturbine und für die Weiterentwicklung der Konstruktion, wurde eine theoretische Beschreibung notwendig. Die experimentellen Untersuchungen im Labor bilden das Kalibrierungsfundament für die sich in **Kapitel 4** anschließende theoretische Modellbildung. Zunächst wird dazu ein Fortschrittsschema entwickelt, welches zur strukturierten Erweiterung des Turbinenwirkungsgrades dient. Den Ausgangspunkt bildet dabei die antreibende Wirkung des Wassers auf die Turbinenschaufeln. Die Theorie wird durch Berücksichtigung von Auftriebswirkung, Spritzwasser, Spaltströmungen, Reibungseffekten sowie mechanischen und strömungsdynamischen Verlusten schrittweise verbessert. Schlussendlich wird erstmalig eine geschlossene theoretische Beschreibung zum Turbinenwirkungsgrad der Steffturbine präsentiert.

Eine Evaluation der experimentellen und theoretischen Betrachtungen erfolgt in **Kapitel 5**. Zunächst werden die Messergebnisse mit dem theoretischen Ansatz verglichen und die Modellgüte errechnet. Es zeigt sich, dass die erarbeitete Theorie die experimentellen Messpunkte mit sehr guter Übereinstimmung wiedergeben kann. Nachfolgend bieten konstruktive Anmerkungen die Basis für zukünftige konstruktive Optimierungsmöglichkeiten. Sie dienen vor allem der Weiterentwicklung der Steffturbine. Daneben wird auf verschiedene Einflussgrößen eingegangen, welche den Betrieb der Turbine positiv wie negativ beeinflussen können. Entsprechende Handlungsempfehlungen werden vorgestellt. Die anschließende Einordnung in die leistungstechnische Vergleichsgruppe positioniert die Steffturbine auf dem Markt der Kleinwasserkraftanlagen. Gegenüber den Wasserrädern und der Wasserkraftschnecke zeigt sich ein ähnliches Wirkungsgradverhalten. Eine Vergrößerung des hydraulischen Einsatzspektrums kann durch den modularen Betrieb der Steffturbine erreicht werden.

Die Zusammenfassung gibt in **Kapitel 6** eine Übersicht der wesentlichen Ergebnisse und Schlussfolgerungen der vorangegangenen Kapitel. Mit einem Ausblick auf mögliche weiterführende Forschungsarbeiten schließt diese Arbeit.

Abstract and structure

In the last two decades several energy scenarios and potential studies have been published. Political and social demands have led to a rapid change in the renewable energy sector. **Chapter 1** classifies this thesis into the topic of renewable energy. The analysis of the energy conversion chain shows how the transfer of a primary product into a usable energy potential is always combined with losses. In this context, hydropower is characterized by a relatively high efficiency. The comparison of central and decentralized energy supply underlines the need to use hydropower in the field of renewable energy.

Especially the increased demand for decentralized energy supply encouraged the development of ecologically sustainable small hydropower plants. Many owners upgraded their old constructions. Other previously unexploited sites could only profitably be operated by the introducing a feed-in tariff. Since there are different definitions of small hydropower, **Chapter 2** shows and delimits the order of magnitude. The following review of the existing hydropower sites and the hydropower potentials at both national and international level highlights the need for scientific research.

The potential studies as well as the large number of newly developed turbine designs demonstrate the significant contribution of small hydropower for supply guarantee. Chapter 2 also presents the current state-of-the-art of small hydropower turbines, which are currently on the market. Especially the construction of modern overshot water wheels and hydrodynamic screws are already quite sophisticated and frequently tested in practice. They reach high efficiencies and convince with robust and operationally friendly behaviour. Thus the Steffturbine is in direct competition on the market with these types of turbines.

With this work, this new turbine is thoroughly investigated and scientifically described in the field of small hydropower for the first time.

To succeed in the fiercely competitive market of renewable energies, a performance test followed by a scientific publication carried out by an independent and qualified institution has become indispensable. The Walter Reist Holding AG, manufacturer of the Steffturbine approached the Department of Hydro Science concerning this case. It was requested to prove the performance of the Steffturbine under laboratory conditions.

In **Chapter 3**, the different measurement configurations are described and the test results are illustrated and evaluated. The data obtained show a wide power spectrum up to 11 kW at a flow rate of 400 l/s and a head of 4 m. The turbine efficiencies can assume

values up to 90%. With an additional experimental study the filling degree for different hydraulic conditions is calculated. It is also found that the mechanical losses increase proportionally to the rotational speed and, in addition, are a function of the turbine inclination.

To consolidate the knowledge on the functional principle of the Steffturbine and for the further development of the machine a physical description was necessary. The experimental investigations form the calibration foundation for the subsequent theoretical modelling in **Chapter 4**. Therefore a progress scheme is developed which serves for the theoretical extension of the turbine efficiency. The starting point is the driving effect of water onto the turbine blades. The theory is gradually improved considering buoyancy effects, splash water, gap flows and frictional effects as well as mechanical and fluid-dynamic losses. Finally, for the first time a closed theoretical approach is presented for turbine efficiency of the Steffturbine.

An evaluation of experimental and theoretical studies is carried out in **Chapter 5**. First, the measurement results are compared with the theoretical approach. Furthermore, the model accuracy is calculated. It turns out that the elaborated theory can reflect the experimental data points with very good accordance.

The following constructional comments provide the basis for further design optimization. They are primarily aimed to advance the development of the Steffturbine.

In addition, different influencing variables are identified. These may affect the operation of the turbine positively and negatively. Corresponding recommendations for action are presented.

The subsequent assignment to the comparison group positions the Steffturbine on the market of small hydropower plants. Compared with water wheels and the hydrodynamic screw the Steffturbine shows a similar efficiency performance. An increase in the use of hydraulic power can be achieved by the modular operation of the Steffturbine.

A summary in **Chapter 6** gives an overview of the main results and conclusions of the previous Chapters. The thesis concludes with an outlook on further research.

Verzeichnis der verwendeten Symbole

A_{fuell}	$[\text{m}^2]$	seitliche Füllfläche zwischen zwei Schaufeln
A_k	$[\text{m}^2]$	durchströmte Fläche des Kropfgerinnes bei Vollfüllung
A_s	$[\text{m}^2]$	Schaufelfläche in Anströmrichtung
A_z	$[\text{m}^2]$	Querschnittsfläche der Schaufelzelle
b_k	$[\text{m}]$	Kropfgerinnebreite
b_s	$[\text{m}]$	Schaufelbreite
C_ϵ	$[1]$	Korrekturfaktor des Teilfüllungsgrades
c_s	$[1]$	Rückschlagbeiwert
d_{hyd}	$[\text{m}]$	hydraulischer Durchmesser
E_{nutz}	$[\text{J}]$	Regelarbeitsvermögen
F_A	$[\text{N}]$	Auftriebskraft
F_G	$[\text{N}]$	Gewichtskraft
F_r	$[\text{N}]$	Reibungskraft
F_z	$[\text{N}]$	Kettenzugkraft
$g = 9.81$	$[\text{m}/\text{s}^2]$	Erdbeschleunigung
h	$[\text{m}]$	Wasserstand im Zulaufkanal
h_{01}	$[\text{m}]$	Dicke Schaufelboden bis Mitte eines Kettengliedes
h_d	$[\text{m}]$	Druckhöhe
h_e	$[\text{m}]$	Energiehöhe
h_f	$[\text{m}]$	Fallhöhe
h_{spalt}	$[\text{m}]$	Spalthöhe
h_z	$[\text{m}]$	Höhe einer Schaufelzelle
i_{KG}	$[1]$	Anzahl der Kettenglieder
I	$[\text{A}]$	elektrische Stromstärke
k_s	$[\text{m}]$	äquivalente Rauheit im Kropfgerinne
L	$[\text{m}]$	Achsabstand der Antriebsräder
L_{KG}	$[\text{m}]$	Länge eines Kettengliedes
L_z	$[\text{m}]$	lichte Länge einer Schaufelzelle
m_{KG}	$[\text{kg}]$	Masse eines Kettengliedes inkl. Schaufel
m_r	$[\text{kg}]$	Masse der oberen Antriebsräder inkl. Welle und Übersetzungsrad
M_{loss}	$[\text{Nm}]$	Verlustmoment
$M_{\text{loss,dyn}}$	$[\text{Nm}]$	strömungsdynamisches Verlustmoment
$M_{\text{loss,k}}$	$[\text{Nm}]$	Verlustmoment durch Kropfgerinnereibung
$M_{\text{loss,mech}}$	$[\text{Nm}]$	mechanisches Verlustmoment
M_{trieb}	$[\text{Nm}]$	Triebmoment
M_{turb}	$[\text{Nm}]$	Turbinenmoment
n_{rad}	$[\text{U}/\text{min}]$	Drehzahl des Antriebrades
P_{anl}	$[\text{W}]$	Anlagenleistung

P_{el}	[W]	elektrische Leistung
P_f	[W]	tatsächlich gewandelte (factual) Leistung
P_{hyd}	[W]	hydraulische Leistung
P_{ini}	[W]	Initialeistung
P_{turb}	[W]	Turbinenleistung
Q	[m ³ /s]	Durchfluss
Q_{eff}	[m ³ /s]	effektiver Durchfluss
Q_{spalt}	[m ³ /s]	Spaltverlust
r	[1]	Korrelationskoeffizient
r_b	[m]	Radius der Gleitlagerbuchse
r_w	[m]	Radius des Kugellagers der Antriebswelle
R	[m]	Abstand Achsmittle Antriebswelle zu Kettenrollen
R_a	[m]	Abstand Achsmittle Antriebswelle zu Drehpunkt der Turbine
t_d	[s]	Durchlaufzeit
t_s	[m]	Dicke des Schaufelbleches
t_{nutz}	[s]	Jahresnutzungsdauer
u	[m/s]	Bahngeschwindigkeit der Kette
U	[V]	elektrische Spannung
U_{ben}	[m]	benetzer Umfang
v_{aus}	[m/s]	Ausströmgeschwindigkeit
v_{ein}	[m/s]	Einströmgeschwindigkeit
$W_{a,tat}$	[Wh]	tatsächlich geleistete Jahresarbeit
z_{ein}	[m]	geodät. Höhe des Einlaufgerinnes gegenüber Turbinendrehpunkt
z_r	[1]	Zähnezahl des Antriebsrades
Z_{rad}	[1]	Zähnezahl des Übersetzungsrades der Antriebswelle
Z_{gen}	[1]	Zähnezahl des Übersetzungsrades der Generatorwelle
α	[°]	Turbinenneigung
α'	[°]	Neigung der Planschütze
δ_r	[°]	Drehwinkel des Kettengliedes
δ_{ernb}	[1]	Versorgungsgrad für erneuerbare Energien
$\delta\Phi$	[%]	relative Unsicherheit einer Messgröße Φ
Δh_f	[m]	Differenz aus Fallhöhe und Vertikalkomponente der Turbinenlänge
γ	[°]	Einströmwinkel
ϵ	[1]	Teilfüllungsgrad
$\epsilon\Phi$	[Φ]	absolute Unsicherheit einer Messgröße Φ
η_A	[1]	Wirkungsgrad aus Auftrieb
η_{ablauf}	[1]	Wirkungsgrad aus Verlusten im Ablauf
η_{anl}	[1]	Anlagenwirkungsgrad
η_b	[1]	Wirkungsgrad aus seitlichen Spaltverlusten
η_{dyn}	[1]	strömungsdynamischer Wirkungsgrad

η_{eig}	[1]	Wirkungsgrad auf Grund des elektrischen Eigenverbrauches
η_{gen}	[1]	Wirkungsgrad des Generators
η_{getr}	[1]	Wirkungsgrad des Getriebes
η_{hr}	[1]	Wirkungsgrad der Fallhöhe
η_{i}	[1]	innerer Wirkungsgrad der Turbine
η_{k}	[1]	Wirkungsgrad auf Grund der Kropfgerinnenrauheit
η_{kette}	[1]	Wirkungsgrad der Übersetzungskette
η_{masch}	[1]	Wirkungsgrad des Maschinensatzes
η_{mech}	[1]	mechanischer Wirkungsgrad
η_{Q}	[1]	volumetrischer Wirkungsgrad
η_{regel}	[1]	Wirkungsgrad der elektronischen Regelungseinrichtungen
η_{spalt}	[1]	Wirkungsgrad aus vertikalen Spaltverlusten
η_{trafo}	[1]	Wirkungsgrad der Umspanneinrichtungen und Transformatoren
η_{turb}	[1]	Turbinenwirkungsgrad
η_{zulauf}	[1]	Wirkungsgrad der Zulaufstrecke
κ_{p}	[1]	Kapazitätsfaktor
λ	[1]	Widerstandsbeiwert
μ_{A}	[1]	Ausflussbeiwert
μ_{g}	[1]	Gleitreibungszahl
μ_{r}	[1]	Rollreibungszahl
ρ	[kg/m ³]	Dichte, $\rho = 998.2$ [kg/m ³] für Wasser bei 20°C [62]
τ	[°]	Teilungswinkel am Antriebsrad
τ_{w}	[N/m ²]	Wandschubspannung
ω_{gen}	[rad/s]	Winkelgeschwindigkeit der Generatorwelle
ω_{rad}	[rad/s]	Winkelgeschwindigkeit des Antriebrades
ζ	[1]	Nutzungsgrad
ζ_{str}	[1]	lokaler Strömungswiderstand

Inhaltsverzeichnis

1. Positionierung der Arbeit im Spektrum der erneuerbaren Energien	1
1.1. Die Energiewandlungskette	1
1.2. Zentrale und dezentrale Energieversorgung	4
1.3. Energieszenarien und Entwicklungstrends für Deutschland	6
2. Stromerzeugung mit Kleinwasserkraft	11
2.1. Abgrenzung hinsichtlich des Leistungsvermögens	12
2.2. Bestand und Potentiale	13
2.3. Aktueller Stand der Wissenschaft für Turbinen im Einsatzbereich der Kleinwasserkraft	18
2.4. Der Prototyp der Steffturbine	24
3. Experimentelle Untersuchungen zur 10 kW - Steffturbine	29
3.1. Funktion und Messaufbau der Turbine im Labor	29
3.2. Messgrößen und deren Abweichungen	33
3.3. Kennlinienaufnahme zu Leistung und Wirkungsgrad	35
3.3.1. Messeinrichtungen	36
3.3.2. Versuchsablauf	38
3.3.3. Auswertung der Messungen	39
3.3.4. Unsicherheitsbetrachtung	44
3.3.5. Bewertung der Ergebnisse	46
3.4. Bestimmung des Teilfüllungsgrades	47
3.4.1. Ermittlung des Füllstandes in einer Schaufelzelle	48
3.4.2. Messeinrichtung und Versuchsablauf	52
3.4.3. Auswertung der Messungen	52
3.4.4. Unsicherheitsbetrachtung	55
3.4.5. Bewertung der Ergebnisse	56
3.5. Bestimmung der mechanischen Verluste	58
3.5.1. Messeinrichtung und Messablauf	59
3.5.2. Auswertung der Messungen	61
3.5.3. Unsicherheitsbetrachtung	63
3.5.4. Bewertung der Ergebnisse	64

4. Theoretische Beschreibung der Steffturbine	65
4.1. Die hydraulische Leistung eines Gerinnes	68
4.2. Die antreibende Wirkung des Fluides	70
4.3. Teilfüllungsgrad und volumetrischer Wirkungsgrad	74
4.4. Verluste durch Auftrieb der Schaufeln	79
4.5. Spaltverluste	81
4.6. Verluste durch Reibung am Kropfgerinne	87
4.7. Mechanische Verluste	90
4.7.1. Coulomb'sche Effekte	92
4.7.2. Viskose Effekte	95
4.7.3. Gesamtheitliche Wirkung der mechanischen Verluste	97
4.8. Strömungsdynamische Verluste	100
4.8.1. Untersuchung im unbelasteten Betrieb	101
4.8.2. Untersuchung im belasteten Betrieb	102
4.8.3. Erweiterung des Wirkungsgrades um strömungsdynamische Effekte	108
4.9. Ansatz für einen stetigen volumetrischen Verlauf	109
4.10. Zusammenfassung des theoretischen Ansatzes	111
5. Evaluation der Untersuchungen	113
5.1. Güte des theoretischen Ansatzes	113
5.2. Folgerungen für die Konstruktion und den Betrieb der Turbine	116
5.3. Einordnung in die Vergleichsgruppe	122
6. Zusammenfassung und Ausblick	125
A. Abmessungen untersuchte 10 kW - Steffturbine	131
B. Messprotokoll zur Kennfeldbestimmung der Steffturbine	133
C. Genauigkeiten der Messgeräte	137
Abbildungsverzeichnis	141
Tabellenverzeichnis	145
Literaturverzeichnis	147