



CFD-gestützte Auslegung und Konstruktion einer Labor-Francis-Turbine

vorgelegt von

Sebastian Härtel

EDV.Nr.: 778190

dem Fachbereich VIII – Maschinenbau, Veranstaltungstechnik, Verfahrenstechnik –
der Beuth Hochschule für Technik Berlin vorgelegte Bachelorarbeit
zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Engineering (B.Eng.)
im Studiengang
Maschinenbau – Erneuerbare Energien

Tag der Abgabe 27. August 2014

Gutachter

Prof. Dr.-Ing. J. Hornig Beuth Hochschule für Technik Berlin
Prof. Dr.-Ing. P. Bartsch Beuth Hochschule für Technik Berlin

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Motivation	1
1.2. Aktueller Stand des Projektes	1
1.3. Ziele der Arbeit	1
1.4. Aufbau der Arbeit	1
2. Grundlagen	2
2.1. Wasserturbinen	2
2.2. Die Francis-Turbine	4
2.3. Laufrad-Auslegung	6
2.3.1. spezifische Drehzahl n_q und Turbinendrehzahl n	7
2.3.2. Kontur und Dimensionierung des Laufrades	8
2.3.3. Schaufelgeometrie des Laufrades	8
2.4. Numerische Berechnungen	10
2.4.1. Erhaltungsgleichungen	10
2.4.2. Randbedingungen	12
2.4.3. Turbulenzmodelle	14
2.4.4. Diskretisierung	14
2.4.5. Rechenetze	14
2.4.6. Interface Modelle	15
3. Optimierung der Laufradgeometrie	16
3.1. Vorgehen und Ziele	16
3.2. Analytisches Modell für die Optimierung	16
3.3. Numerisches Modell für die Optimierung	19
3.3.1. Erzeugung des Rechengebiets	20
3.3.2. Erzeugung des Rechnetzes	23
3.3.3. Vorbereitung der Strömungsberechnung	28
3.3.4. Strömungsberechnung	31
3.3.5. Auswertung	32
3.4. Optimierungen	32
3.4.1. Erstauslegung	32
3.4.2. Optimierung 1	35
3.4.3. Optimierung 2	37
3.4.4. Optimierung 3	39
3.5. Zwischenfazit	48
4. Konstruktive Überarbeitung der Turbine	49
4.1. Vorgehen und Ziele	49
4.2. Analyse und Lösungsansätze	49
4.3. Auslegung	50
4.3.1. Gehäusedeckel	50
4.3.2. Schraubenverbindung Gehäusedeckel	52
4.3.3. Getriebestange	54
4.3.4. Bolzen der Getriebestange	62
4.3.5. Überprüfung des Getriebes	64
4.3.6. Schraubenverbindung Laufrad/Turbinenwelle	65
4.3.7. Turbinenwelle	69
4.4. Zwischenfazit	70

5. Zusammenfassung und Gesamtfazit	72
A. Anhang	I
A.1. Abmaße CFD-Modell	I
A.2. Kennlinien	III
A.2.1. Pumpenkennlinie	III
A.2.2. Kennlinien der Francis-Turbine	IV
A.3. Festigkeitsnachweis	VI
A.3.1. Schraubenverbindung Gehäusedeckel	VI
A.3.2. Turbinenwelle	XIV
A.4. Technische Zeichnungen - Einzelteilzeichnungen	XXXI
A.4.1. Gehäusedeckel Saugrohr	XXXI
A.4.2. Plexiglasring	XXXII
A.4.3. Gehäusedeckel Welle	XXXIII
A.4.4. Gleitring	XXXIV
A.4.5. Gleitringscheibe	XXXV
A.4.6. Stellring	XXXVI
A.4.7. Lasche	XXXVII
A.4.8. Regulierstange	XXXVIII
A.4.9. Regulierhebel	XXXIX
A.4.10. Messingring	XL
A.4.11. Getriebescheibe	XLI
A.4.12. Distanzhülse	XLII
A.4.13. Deckel Welle	XLIII
A.4.14. Getriebestange	XLIV
A.4.15. Unterlegscheibe	XLV
A.4.16. Stützring A	XLVI
A.4.17. Stützring B	XLVII
A.4.18. Wellengehäuse	XLVIII
A.4.19. Lagergehäuse	XLIX
A.4.20. Passscheibe	L
A.4.21. Turbinenwelle	LI
A.4.22. Anschlag	LII
A.4.23. Plexiglasrohr	LIII
A.4.24. Leitschaufel	LIV
A.4.25. Laufrad	LV
A.4.26. Spiralgehäuse	LVI
A.5. Technische Zeichnungen - Zusammenbauzeichnung	LVII
A.6. Stückliste	LVIII
A.7. Schneckengetriebe Datenblatt	LX
A.8. PMMA Lieferant	LXIII
Literatur- und Quellenverzeichnis	LXV

5. Zusammenfassung und Gesamtfazit

Das Hauptziel der Bachelorarbeit war es, aus vorangegangenen Entwürfen einen endgültigen Konstruktionsentwurf einer Francis-Turbine für Lehrzwecke zu erarbeiten. Die damit verbundenen Anforderungen beinhalteten die numerische Optimierung der Laufradgeometrie sowie das Sichtbarmachen der Funktionsweise und der physikalischen Effekte in der Francis-Turbine. Zusätzlich galt es, die Fertigungskosten gering zu halten sowie vorhandene Stör- bzw. Fehlerquellen zu beseitigen.

Die Bearbeitung der Ziele erfolgte in drei Abschnitten. Im ersten Abschnitt wurde das Laufrad ausgelegt und optimiert. Da es einige Probleme bei der Anpassung des vorhandenen CFD-Modells an die veränderte Geometrie gab, wurde das CFD-Modell neu aufgebaut. Dabei wurden die Randbedingungen sowie die Geometrie des Spiralgehäuses und des Leitrads korrigiert. Es folgten die analytische Vorauslegung und die numerische Optimierung der Laufradgeometrie. In einem ersten Optimierungsschritt wurde der sich einstellende Massenstrom durch eine Vergrößerung des Leitschaufelwinkels dem Sollmassenstrom angepasst. In einem zweiten Optimierungsschritt wurde der vorhandene Drall in der Abströmung durch die Einführung eines Korrekturfaktors reduziert. Da die Korrektur der Abströmwinkel wiederum Einfluss auf den sich einstellenden Massenstrom hat, wurde dieser in einem dritten und letzten Optimierungsschritt durch eine erneute Vergrößerung des Leitschaufelwinkels an den Sollmassenstrom angepasst. Im Anschluss an die Optimierung erfolgte außerdem die Berechnung relevanter Turbinenkennlinien.

Im zweiten Abschnitt wurde der vorhandene Entwurf der Francis-Turbine überarbeitet. Die hohe Anzahl an Gussteilen im vorhandenen Entwurf wurde durch einfacher zu fertigende Teile aus Halbzeugen ersetzt. Als Konstruktionswerkstoff wurde überwiegend eine Aluminiumlegierung gewählt. Sie ist korrosionsbeständig, leicht zu bearbeiten und weist eine geringe Dichte auf. Durch die Integration eines Plexiglasrings in den neu konstruierten Gehäusedeckel, werden die Leitschaufeln sowie der Einlauf des Laufrads im Betrieb von außen sichtbar. Dafür wurde das Leitwerk von der Saugrohrseite auf die Wellenseite versetzt. In diesem Zuge wurde das Leitwerk auf seine Festigkeit hin überprüft und komplett überarbeitet. Vorhandene Schwachstellen wurden auf diese Weise beseitigt. Das Ergebnis der Leitwerkauslegung führte zur Wahl eines größeren Schneckengetriebes, welches für die Verstellung der Leitschaufeln zuständig ist. Zusätzlich wurde die Schraubenverbindung am Gehäusedeckel neu ausgelegt. Anschließend wurden die Schraubenverbindung zwischen Laufrad und Turbinenwelle sowie die Turbinenwelle selbst auf ihre Festigkeit hin überprüft. Schließlich konnte die Wellenabdichtung zwischen dem Arbeitsmedium Wasser und der Wellenlagerung durch eine Neukonzeption wesentlich verbessert werden. Die Störanfälligkeit der Abdichtung wird dadurch erheblich reduziert.

In dritten Abschnitt wurden aus dem überarbeiteten CAD-Entwurf alle Einzelteilzeichnungen abgeleitet sowie die Zusammenbauzeichnung und die Stückliste erstellt. Sie sind dem Anhang A.4 auf Seite XXXI beigelegt.

Die Bearbeitung der drei Abschnitte führt somit zu folgendem Gesamtergebnis: Durch die Auslegung und Optimierung des Laufrads konnte erstens der Turbinenwirkungsgrad, im Vergleich zur Erstausslegung, um 7,88 Prozent auf 85,31 Prozent verbessert werden. Dies entspricht einer theoretischen Wellenleistung von 5,486 kW. Die Überarbeitung des Entwurfs der Francis-Turbine führte zweitens durch die Verwendung eines Plexiglasrings zur gewünschten Sichtbarkeit der inneren Abläufe. Zudem konnten vorhandene Schwachstellen beseitigt und niedrigere Fertigungskosten erzielt werden. Schließlich konnten drittens alle für die Fertigung erforderlichen Unterlagen erstellt werden. Die Arbeit erfüllt somit die eingangs formulierten Ziele. Das bedeutet, dass das Projekt "Francis-Turbine" mit der Fertigung im nächsten Schritt abgeschlossen werden kann.