

# **Numerische Simulation der Aerodynamik eines H-Rotors mit ANSYS CFX**

MASTERARBEIT

Zur Erlangung des akademischen Grades M.Eng. Verfahrenstechnik  
an der TFH Berlin

Dipl.-Ing. (FH) M. Siewert

01.November 2008

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. P. Bartsch (TFH Berlin)

Zweitgutachter: Dr. rer. nat. A. Spille-Kohoff (CFX Berlin Software GmbH)

# Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen und Formelzeichen .....	III
Tabellen und Abbildungen .....	IV
<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>Einführung .....</b>	<b>1</b>
<b>Motivation .....</b>	<b>1</b>
<b>Ziel der Arbeit.....</b>	<b>1</b>
<b>Aufbau der Arbeit .....</b>	<b>2</b>
<b>GRUNDLAGEN .....</b>	<b>3</b>
<b>1. Windenergieanlagen, ein Überblick.....</b>	<b>3</b>
1.1 Entwicklung und Stand der installierten Windanlagenleistung .....	3
1.2 Bauarten.....	6
1.3 VAWT.....	8
<b>2. Physikalische Grundlagen .....</b>	<b>16</b>
2.1 Impulstheorie nach Betz und weiterführende Modelle .....	16
2.2 Modelle für VAWTs .....	21
2.3 Kräfte an einem Blattelement.....	24
2.4 Grenzschichtentwicklung/Strömungsablösung.....	28
<b>3. Darrieus-Rotor .....</b>	<b>31</b>
3.1 Blattprofil.....	31
3.2 Abmaße und Funktionsprinzip des untersuchten H-Rotors .....	35
3.3 Startverhalten .....	39
3.4 Hochfahr- und Betriebsverhalten .....	40
<b>4. Numerische Strömungssimulation.....</b>	<b>44</b>
4.1 Transportgleichungen.....	44
4.2 Vereinfachungen.....	45
4.3 Diskretisierungsverfahren .....	46
4.4 Turbulenzmodellierung .....	47
4.5 Das Programmpaket ANSYS Workbench .....	51
<b>STRÖMUNGSSIMULATION .....</b>	<b>52</b>
<b>5. Grundlegende durchgeführte Messungen.....</b>	<b>52</b>
<b>6. Simulation der Profilmströmung.....</b>	<b>52</b>
6.1 Vernetzung und Strömungsgebiet .....	53
6.2 Gitterstudie.....	55
6.3 Gebietsstudie.....	58
6.4 Fazit.....	64
<b>7. Strömungssimulation des H-Rotors.....</b>	<b>65</b>
7.1 Startverhalten .....	65
7.1.1 Analytische Berechnung.....	66
7.1.2 Numerische Strömungssimulation.....	72
7.2 Hochlauf- und Betriebsverhalten.....	78
7.3 Akustische Auswertung.....	90
7.4 Fazit.....	93
<b>8. Zusammenfassung.....</b>	<b>94</b>
<b>9. Ausblick .....</b>	<b>96</b>
<b>Anhang .....</b>	<b>97</b>
<b>Literatur.....</b>	<b>108</b>

## 8. Zusammenfassung

Die in dieser Arbeit simulierten Profilbeiwerte sowie Momentenbeiwertverläufe des gesamten Rotorsystems im Start- und Hochlaufverhalten konnten den experimentell gemessenen Werten sehr gut angenähert werden. Dies konnte mit einer einfachen Quasi 2D-Simulation und mit physikalischen Vereinfachungen, wie der Inkompressibilität und Isothermie, erreicht werden.

Tab. 8-1 zeigt als Übersicht die bei der Simulation aufgetretenden Abweichungen bezogen auf den jeweils größten gemessenen Wert. Nur im Hochlauf beziehen sich die Abweichungen auf den an dieser Stelle zugehörigen gemessenen Wert.

Tab. 8-1: Abweichungen der durchgeführten Simulationen

	Mittlere Abweichung	Maximale Abweichung
<b>Profilumströmung</b>		
ca-Wert	-0,2%	24,1%
cw-Wert	4,6%	16,5%
<b>Startverhalten</b>		
cm-Wert	2,8%	25,7%
<b>Hochlaufverhalten</b>		
cm-Wert	-15,5%	-37,0%

Obwohl teilweise mit bis zu 40% noch hohe Abweichungen vorhanden sind, ist die mittlere Abweichung mit meist unter 10% sehr gut.

Beachtet werden muss hierbei, dass auch die Messwerte Schwankungen unterliegen. Die von DÜTTING angegebenen Messwerte sind Mittelwerte aus jeweils drei Messungen. Bei mehreren Messungen kann sich der Mittelwert bereits leicht verschieben, was vor allem bei den kleinen absoluten Messwerten zu großen relativen Änderungen führen kann. Zusätzlich ergeben sich geringe Abweichungen aus der hier durchgeführten Umwandlung, der von DÜTTING erzeugten Messwertdiagramme, in Koordinatenpunkte mittels der Software „Engauge“.

In Anbetracht einer gewissen Messwertfehlertoleranz, die für die Simulation verwendeten mathematischen Vereinfachungen und Modellierungen, sind die hier sich ergebenden Abweichungen eher gering.

Die geringsten Abweichungen bei der Profilumströmung und beim Rotorstartverhalten stellen sich bei sehr gut konvergierten stationären Lösungen ein. Um dies zu erreichen, musste ein großes Rechengebiet von  $320^*t$  erzeugt werden. Dagegen zeigten transiente Lösungen Abweichungen bis zum zweifachen des gemessenen Wertes.

Sehr gut bildete das hier verwendete SST-Turbulenzmodell, die in Wasserkanalversuchen beobachteten, Wirbelpaarablösungen im Hochlauf ab.

In Abb. 8-1 ist die hier simulierte Leistungskennlinie als Vergleich zu den heute gängigen Rotoren eingezeichnet.

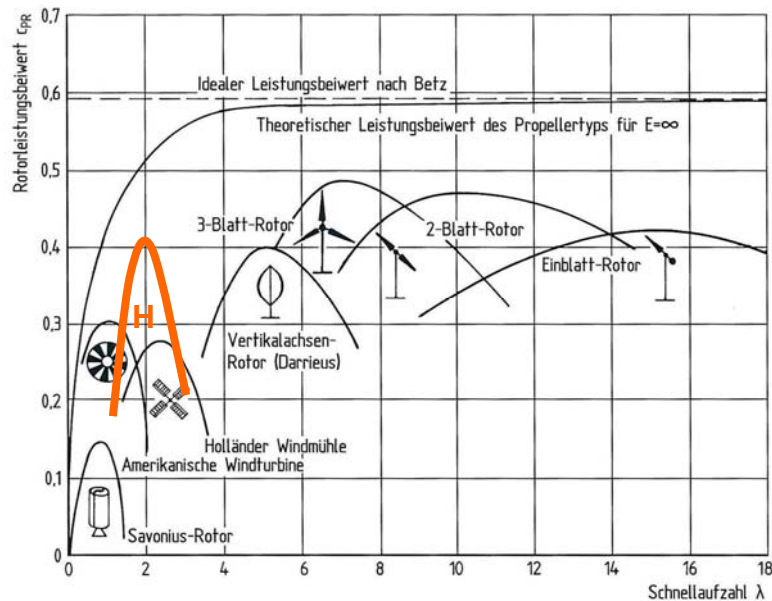


Abb. 8-1: Vergleich der Leistungskennlinie des hier simulierten H-Rotors mit den bekannten Rotoren

Der ermittelte Leistungsbeiwertverlauf ist aber, aufgrund der vereinfachten 2D-Betrachtung, als Ideal zu verstehen. Auftretende Blattrandeffekte sowie Impulsverluste, aufgrund der vorhandenen Rotorachse, führen zu Leistungsverlusten, die nicht berücksichtigt wurden.

Dass dieser Verlauf aber sehr nah an der tatsächlichen Anlage liegt, zeigen die geringen Drehmomentabweichungen während des Hochlaufs in *Abb. 7-20* und der Vergleich mit Anlagen der gleichen Leistungsklasse.

Eine erste durchgeführte akustische Auswertung direkt an einem Profil (Nahfeld) ergab die dort entstehende domierende Frequenz, die sich mit 20 Hz gerade noch im hörbaren Bereich befindet, und einen sich bildenden hohen Schalldruck von 97 dB(A). Weiterführende akustische Untersuchungen lassen sich mit Fernfeldlösern durchführen.