

UNTERSUCHUNG DES EINFLUSSES VOM BODEN UND
BAUWERK AUF DIE GESAMTANLAGENDYNAMIK VON
WINDENERGIEANLAGEN

-

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE SOIL AND
STRUCTURE TO THE DYNAMICS OF WIND TURBINES

Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen
Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der
Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

ALEXANDER TORSTEN WERKMEISTER

Berichter:

apl. Prof. Dr.-Ing. Ralf Schelenz

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Burkhard Corves

Tag der mündlichen Prüfung:

1. März 2021

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	I
Kurzfassung / Abstract.....	III
Inhaltsverzeichnis	III
Nomenklatur	VII
Abkürzungsverzeichnis.....	XI
1 Einleitung.....	1
1.1 Problemstellung	3
1.2 Zielsetzung und Forschungsfragen.....	5
1.3 Aufbau der Arbeit	7
2 Stand der Technik und Forschung.....	9
2.1 Aerodynamik.....	9
2.1.1 Blattaerodynamik	9
2.1.2 Strukturdynamik.....	11
2.1.3 Turm Aerodynamik	13
2.2 Regelung	16
2.3 Strukturkomponenten.....	17
2.3.1 Großwälzlager	17
2.3.2 Turm.....	18
2.3.3 Gründung	20
2.4 Auslegung von Windenergieanlagen.....	24
2.4.1 Lastenrechnungsprogramme	24
2.5 Simulation von technischen Systemen	25
2.5.1 Mehrkörpersimulation.....	25
2.5.2 Balkentheorie	26
2.5.3 Craig-Bampton.....	27
3 Auslegung von Windenergieanlagen	29
3.1 WEA-Klassen	29
3.2 Modellbildung.....	31

3.3	Der Auslegungsprozess.....	35
3.3.1	Die Lastenrechnung	37
3.3.2	Auslegungslastfälle	38
3.3.2.1	Produktionsbetrieb	42
3.3.2.2	Start und normale Abschaltung	46
3.3.2.3	Parken, Leerlauf und Stillstand	48
3.3.2.4	Zusammenfassung.....	49
3.3.3	Ableich der Simulation mit einer Messung.....	51
4	Entwicklung erweiterter Modelle.....	55
4.1	Azimutlager	57
4.2	Turmeinfluss	60
4.2.1	Modellierung.....	61
4.2.2	Einfluss auf einen Systemprüfstand	65
4.2.3	Fazit	68
4.3	Boden und Fundament	70
4.3.1	Flachgründung	72
4.3.2	Pfahlgründung.....	74
4.3.3	Schichtung	74
4.3.4	Fazit	75
4.4	Turm-Blatt-Aerodynamik	77
4.4.1	Modellwindenergieanlage im Windkanal	78
4.4.2	Skalierung der Windenergieanlage	80
4.4.3	Simulationsmodell	83
4.4.4	Ergebnisse und Vergleich	84
4.4.5	Einfluss auf die Lasten.....	89
4.4.6	Fazit	91
4.5	Aerodynamische Turmdämpfung.....	93
4.5.1	Ergebnisse.....	94
4.5.2	Fazit	95
5	Auswirkung der erweiterten Modellierung	96
5.1	Einfluss auf die Gondel.....	98
5.2	Einfluss auf das Bauwerk.....	103
5.3	Fazit	108

6	Zusammenfassung und Ausblick	109
6.1	Ergebnisse und Beitrag der Arbeit	109
6.2	Mögliche zukünftige Fragestellungen	110
7	Literaturverzeichnis	113
A	Anhang.....	I
A.1	Turmmodellierung	I
A.2	Beschreibung der Ringflansche.....	II
A.3	Bodensteifigkeiten	III
A.4	Aerodynamische Dämpfungsbeiwerte	V
	Abbildungsverzeichnis.....	VII
	Tabellenverzeichnis	XI