

Klein-Windanlagen im Klärwerk Nürnberg

Wind-Messtechnik

Photovoltaik und große Windanlagen sind mittlerweile etablierte Technologien und in großer Menge im praktischen Einsatz. Ganz anders ist die Situation bei gebäudemontierten Klein-Windanlagen, die erst in wenigen Pilotanwendungen im Einsatz sind. Wie bei jeder jungen Technologie zeigen sich dabei verschiedene zu lösende Aufgaben wie z.B. eine realistische Ertragsprognose, die die Basis für eine wirtschaftliche Investitionsentscheidung bildet, oder verschiedene Optimierungsaufgaben im Anlagenbetrieb.

Die Technische Hochschule Nürnberg hat 2013 auf dem Gelände des Kooperationspartners Stadtentwässerung und Umweltanalytik (SUN) GmbH eine Klein-Windkraftanlage errichtet und mit einigen studentischen Arbeiten in Betrieb gesetzt. Während der Betriebsphasen der verschiedenen Optimierungsstufen wurden verschiedene Daten in unterschiedlichen zeitlichen Auflösungen aufgezeichnet. Inzwischen liegt ein umfangreiches Archiv an Betriebsdaten vor, das nach Bedarf ausgewertet werden.

Das Projekt

Die am beabsichtigten Standort herrschenden Windverhältnisse definieren den maximal möglichen Energieertrag. Die lokale Luftströmung wird durch Hindernisse in der Umgebung je nach Windrichtung teilweise abgeschirmt oder sogar verstärkt. Zudem ist die tatsächliche Luftströmung nicht ideal laminar, sondern enthält erhebliche turbulente Anteile. Für eine einigermaßen gesicherte Prognose des Ertrags ist für die zukünftige Anlage am geplanten Ort eine Messung über einen längeren Zeitraum durchzuführen. Dabei ist gerade auch der turbulente Anteil der Luftströmung zu erfassen, da dieser zusammen mit der Dynamik der zukünftigen Klein-Windanlage den Ertrag weitgehend bestimmt.

Mit einem in der Höhe variablen Messmast (max. 12m) wird die Windstärke in 3 unterschiedlichen Höhen, die Windrichtung und die Temperatur erfasst. Darüber hinaus werden die batteriebetriebenen Datenlogger aufgezeichnet. Abtastrate und Aufzeichnungsdauer sind je nach Messaufgabe wählbar. Für Klein-Windanlagen sind 1-min Mittelwerte angemessen, sofern auch die Turbulenzintensität erfasst wird.



Wartung auf 14m Höhe



Betrieb der 10 kW Klein-Windanlage

Ergebnisse

Bereits während der ersten Betriebszeit im Frühjahr 2015 wurde beobachtet, dass der Vertikalrotor bei einer bestimmten Drehzahl von rund 55-60 U/min am Generator eine erste kritische Eigenschwingung anregt. Bei Resonanz bewegt sich der Generator mit ca. 2,7 Hz um bis zu 20 mm seitwärts in zwei Koordinaten, was auch mit mechanisch fragwürdiger Geräuschentwicklung verbunden ist. Das Fundament ist bis an die Auslegungsgrenze belastet.

Durch Lasermessung dieser Schwingung und Videoaufnahmen, aber auch durch Eigenfrequenzberechnungen mit Finiten Elementen konnte die Ursache dieser Resonanz und deren Frequenz bestimmt werden. Der Vertikalrotor übt auf den Generator an der Mastspitze eine in Betrag und Richtung zeitlich veränderliche Querkraft aus. Hinzu kommt noch ein pulsierendes Drehmoment. Die Grundfrequenz dieser Kräfte und Momente ergibt sich als "Drehzahl mal Anzahl der Flügel" des Rotors. Trifft die mit der Rotordrehzahl variable anregende Frequenz gerade die Eigenfrequenz des nur schwach gedämpften Masts, so tritt diese unerwünschte Resonanz mit den beobachteten überhöhten Amplituden auf. Als Abhilfe wird dieser Drehzahlbereich der Mastresonanz im Betrieb so schnell als möglich durchfahren, d.h. der Rotor wird bei zunehmenden Wind kurz von der Synchronmaschine zusätzlich motorisch angetrieben. Nach Überschreiten der kritischen Drehzahl wird wieder in den normalen generatorischen Betrieb gewechselt.

Auch nachdem die erste kritische Resonanzdrehzahl mit Hilfe zusätzlicher Momente der Synchronmaschine so schnell durchlaufen wird, dass keine Resonanzüberhöhung mehr auftritt, wurden weitere Schäden durch Materialermüdung im Rotor beobachtet. Deshalb wurde die Untersuchung mit Finiten Elementen auch auf höhere Eigenwerte und Eigenformen im Rotor ausgeweitet. Dabei zeigten sich in der FEM-Eigenwertbestimmung eine ganze Reihe weiterer Eigenfrequenzen, die durch die im normalen Betrieb auftretenden pulsierenden Kräfte und Momente des Darrieus-Rotors zur Resonanz je nach Wind und Drehzahl angeregt werden können.

Die numerische Genauigkeit von Finiten Elementen bei der Bestimmung höherer Eigenwerte technischer Geräte ist begrenzt. Daher wurden bei einer Wartung ein kleiner Beschleunigungsaufnehmer am Rotor befestigt und der Rotor mechanisch zu Eigenschwingungen angeregt. Das gemessene Resonanzspektrum zeigt eine Reihe signifikanter Eigenfrequenzen im Rotor.

Die im Betrieb bis zur Nenndrehzahl auftretenden pulsierenden Kräfte und Momente des Rotors haben eine Grundfrequenz im Bereich von 2 bis 6 Hz, und wegen ihres asymmetrischen Verlaufs ist auch die erste Oberschwingung im Bereich von 4 bis 12 Hz noch zu beachten. Bei einer mit der Windstärke variablen Drehzahl sind die pulsierenden Kräfte und Momente des Darrieus-Rotors zeitweilig in Resonanz mit einer der vier gemessenen Rotoreigenfrequenzen, was zu den beobachteten Schäden geführt hat.

Die Abhilfe ist naheliegend: Aus dem gemessenen Resonanzspektrum ergeben sich eine Reihe verbotener Drehzahlen und Toleranzbereiche von +/-3%. Übrig bleiben dann für den schadensfreien Betrieb nur noch wenige erlaubte Drehzahlen. Statt des kontinuierlichen Drehzahlbereichs für den 10 kW Rotor von 30 bis 125 U/min sind nun nur noch die resonanzfreien diskreten Drehzahlen 30, 47, 68, 80, 111 U/min erlaubt,

zwischen diesen erlaubten Drehzahlen wird je nach Wind mit motorischer Hilfe möglichst zügig gewechselt.



Betrieb und Test der Anlage

Ansprechpartner

Prof. Dr. Günter Kießling

Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm

Kesslerplatz 12

90489 Nürnberg

Tel.: 0911/5880-1231

E-Mail: guenter.kiessling@th-nuernberg.de