

## 7. ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE

Die gewonnenen Ergebnisse dieser Arbeit lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Die am Rotormodell durchgeführten Versuche haben nochmals bestätigt, was aus der Fachliteratur bereits bekannt war, dass der H-Darrieus-Rotor ohne Unterstützung aus dem Stillstand von selbst nicht anlaufen kann. Die ersten Versuche, einen Savonius-Rotor, bestehend aus zwei Halbkreiszyklindern als Anlaufhilfe einzusetzen, brachten nicht den gewünschten Erfolg, da der Savonius-Rotor in dieser Bauweise bei ungünstiger Stellung zur Windrichtung ebenfalls Startschwierigkeiten besitzt. Erst der Einsatz eines Savonius-Rotors mit drei Halbkreiszyklindern ermöglichte den Start des H-Darrieus-Rotors aus jeder Position heraus.

Als nicht notwendig stellte sich die Entkopplung der beiden Rotoren voneinander heraus, da durch Messungen in Versuchen gezeigt werden konnte, dass bei den festgelegten geometrischen Proportionen des Modells der Savonius-Rotor nicht untertourig gegenüber dem H-Darrieus-Rotor läuft, weshalb der Einsatz einer Überholkupplung bzw. eines Freilaufes auch beim Bau des Prototypen nicht weiter verfolgt wurde.

Bei der Auswahl des Basismaterials für die Rotorblätter der Kleinwindkraftanlage wurde zu Beginn dieser Arbeit auf den nachwachsenden Rohstoff Holz gesetzt. Die ersten Versuche am Modellrotor mit Rotorblättern aus Fichtenholz waren auch sehr vielversprechend, zumal Fichtenholz eine heimische Holzart ist, welche außerdem noch leicht verarbeitbar und auch noch kostengünstig ist. Eine Beschichtung der Holz-Rotorblätter hätte diese zudem noch witterungsbeständig gemacht. Mit der Fertigung der Rotorblätter für den Prototypen hat sich dann allerdings gezeigt, dass die Vorteile von Rotorblättern aus Holz sehr schnell in den Hintergrund geraten, wenn deren Masse von mehr als 3 kg pro Rotorblatt der des Rotorblatts aus Hartschaum mit 1,9 kg gegenübergestellt wird.

Im Labor-Windkanal der Universität Bayreuth wurden der Auftriebs- und Widerstandsbeiwert für verschiedene Anströmwinkel für ein Rotorblattprofil vom Typ NACA-4415 bestimmt, welches dann auch im Modell-Rotor in der Form eingesetzt wurde. Mit dieser Einrichtung wäre es denkbar, weitere Untersuchungen an verschiedenen Rotorblattprofilen durchzuführen und deren Eigenschaften zu bestimmen.

Die Vorgabe bzw. Festlegung zu Beginn dieser Arbeit, für die ersten Versuche an einer Kleinwindkraftanlage vorerst kein Getriebe bzw. keine Übersetzung einsetzen zu wollen, hat sich als positiv herausgestellt und sollte auch beibehalten werden, da hierdurch zusätzliche Reibungsverluste vermieden werden. Die diesbzgl. zu richtenden höheren Anforderungen an die Lagerung des Permanentmagnet erregten Synchrongenerators bei einer direkten Kopplung des Windrotors mit diesem sollten technisch lösbar sein, da es sich bei den beiden Rillenkugellagern des zu den Versuchen herangezogenen Generators um zwei Standardkugellager handelt, wo noch Potential zu Wälzlagern mit größerer statischer und dynamischer Tragzahl nach oben vorhanden ist.

Bzgl. der Suche nach einem passenden Bremssystem für eine vertikalachsige Kleinwindkraftanlage kann die Aussage getroffen werden, dass der Einsatz einer Wirbelstrombremse, wenn gleich diese nicht als Feststellbremse geeignet ist, viele Vorteile mit sich bringt, wie z.B. verschleißfrei und daher wartungsarm, relativ geräuschlos beim Bremsvorgang und wie die Versuche auch gezeigt haben, sehr wirkungsvoll. Sofern die Wirbelstrombremse für eine Spannung ausgelegt wird, die im Bereich der gleichgerichteten Spannung des Generators im Nennbetrieb liegt, wäre denkbar, dass dieses Bremssystem

zur Regelung der Drehzahl der Kleinwindkraftanlage im oberen Bereich ohne externe Spannungsversorgung auskommt.

Eine Bremsung der KWEA per Klemmenkurzschluss des Generators brachte zumindest bei dem eingesetzten Permanentmagnet erregten Synchrongenerator keine zufriedenstellenden Ergebnisse, da festgestellt werden musste, dass auch bei Kurzschließen der Klemmen Drehzahlen im dreistelligem Bereich bei Nennwindgeschwindigkeit möglich sind, weshalb diese Art der Erzeugung einer bremsenden Wirkung nur als Zusatzbremse bei einem Notstopp der Anlage in Betracht gezogen werden kann. Allerdings muss angefügt werden, dass die Bremswirkung hierbei von der Konstruktion des Generators abhängig ist. Eine Steigerung der Bremskraft bei Klemmenkurzschluss ist z.B. durch den Einsatz von Materialien mit einer höheren magnetischen Feldstärke als Permanentmagnete durchaus möglich, wodurch sich aber auch insgesamt der Wirkungsgrad der Maschine verbessert.

Die am Ende dieser Arbeit im Windkanal durchgeführte Leistungsmessung am Prototypen der Kleinwindenergieanlage hat gezeigt, dass die vorher berechneten Leistungsdaten, für welche der Windrotor ausgelegt wurde, durchaus erreichbar sein dürften, sofern ein optimierter Generator im gleichen Leistungsbereich eingesetzt wird.

Aus den Messungen am Prototypen der Kleinwindkraftanlage können die daraus gewonnenen Ergebnisse nur insofern in künftige Planungen mit einfließen, dass neben dem Generator das Gesamtsystem mit Hinblick auf die unter Kapitel 6.4 genannten Punkte komplett analysiert und optimiert wird.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass auf die durch dieses Projekt gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse in Zukunft weiter aufgebaut werden kann und die Forschungsarbeit auf dem Gebiet einer vertikalachsigen Kleinwindkraftanlage mit Darrieus-Rotor und Permanentmagnet erregtem Synchrongenerator mit Spannung weiter verfolgt und sich auch lohnend fortgesetzt werden kann.

## 8. AUSBLICK

Nach der Zusammenfassung der Ergebnisse dieser Arbeit sei noch ein Blick in die Zukunft gerichtet, welche nächsten Schritte für ein Vorantreiben des Projektes mit dem Ziel, einen Prototypen einem Langzeittest unter natürlichen Windbedingungen unterziehen zu können, erforderlich sind. Der wichtigste Ansatzpunkt für Optimierungen muss das Herz der Kleinwindenergieanlage, der Generator, sein. Hier sollte noch Entwicklungsarbeit in den Bau eines 24-poligen Permanentmagnet erregten Synchrongenerators gesteckt werden, welcher zudem durch den Einsatz von qualitativ hochwertigen Permanentmagneten einen höheren Wirkungsgrad von 85 % oder mehr aufweist. Des Weiteren sollte die Nennleistung der Permanentmagnet erregten Synchronmaschine mit der Nennleistung des Windrotors übereinstimmen, da ein überdimensionierter Generator neben dem schlechteren Wirkungsgrad im unteren Drehzahlbereich auch ein höheres Leerlaufdrehmoment aufweist. Die konstruierte Halterung für den Generator ist dabei problemlos auch für andere Maschinentypen verwendbar, allerdings sollte diese bei einem längeren Einsatz im Freien noch verzinkt werden, damit sie vor Witterungseinflüssen geschützt ist.

Wie bereits unter 7. erwähnt, sollte die direkte Kopplung des Windrotors mit der Generatorwelle weiter favorisiert werden und die damit verbundenen Vorteile genutzt werden. Allerdings sollte hierfür die Lagerung des Generators überarbeitet werden, um die axialen Kräfte von derzeit 450 N aufnehmen zu können. Von Vorteil wäre hier der Einsatz von zwei Festlagern, so dass sich die axiale Belastung durch die Gewichtskraft des Rotors auf zwei Lager aufteilt. In diesem Zuge könnte auch der Einsatz von Keramiklagern oder Hybridlagern getestet werden, da die Reibungskräfte bei diesen Lagertypen lt. Herstellerangaben geringer sein sollen. Unverzichtbar ist der Einsatz eines dritten Lagers auf der Oberseite der Rotorachse. Für den Test im Windkanal wurde hier eine einfache und kostengünstige, aber effektive Lösung mittels eines freischwebenden Lagers geschaffen, welches über Drahtseile positioniert und fixiert werden kann. Für weitere Versuche am Prototypen, auch außerhalb des Windkanals, ist diese Art der Lagerung mit dem geringsten konstruktiven Aufwand verbunden.

Bei einer Überarbeitung des Generators sollte gleichzeitig geprüft werden, ob eine Verlängerung der Generatorwelle auf der gegenüberliegenden Seite des Generators um die Länge möglich ist, dass die Bremsscheibe der Wirbelstrombremse auf diesem Teil der Welle montiert werden kann und die Einheit mit den Elektromagneten der Wirbelstrombremse bei senkrecht stehendem Generator unterhalb dessen positioniert werden kann. Dies hätte den Vorteil, dass die Achse des Windrotors entsprechend nochmals gekürzt werden könnte und somit der Schwerpunkt der Anlage tiefer gelegt werden könnte.

Bzgl. der Materialauswahl bei den Rotorblättern könnten noch Versuche mit kohlefaserverstärktem Kunststoff durchgeführt werden, dessen spezifisches Gewicht mit  $\gamma \approx 1,4 \text{ g/cm}^3$  nochmals um knapp 20 % geringer ist als jenes von glasfaserverstärktem Kunststoff mit  $\gamma \approx 1,7 \text{ g/cm}^3$ . Auch beim Savonius-Rotor könnte noch der Einsatz leichterer, aber ebenso stabiler Materialien für die drei Halbkreiszyylinder und die beiden Kreisscheiben getestet werden.

Die Leistung der Kleinwindenergieanlage wurde versucht über eine am Generator angeschlossene Verbraucher-kaskadenschaltung, bestehend aus in Reihe und parallel geschalteten Halogenlampen, zu messen. Hier sollte ein stufenloser Lastwiderstand am Generator für künftige Messungen angeschlossen werden oder der Einsatz eines Maximum-

Power-Point-Trackers (MPPT) geprüft werden, welcher ständig den Betriebspunkt der optimalen Leistungsentnahme mittels Regelung sucht und einstellt.

Beim Stichwort „Regelung“ muss noch auf die ausstehende Gesamtregelung der Kleinwindkraftanlage hingewiesen werden, mit welcher in erster Linie die Regelung der Drehzahl, wozu auch das Abbremsen der Anlage bei Überschreitung der Vollastwindgeschwindigkeit oder das komplette Abbremsen und Abschalten bei Erreichen der Abschaltwindgeschwindigkeit gehört.

Insgesamt ergeben sich viele interessante Betätigungsfelder, um das Projekt weiter voranzutreiben. Mit dem vorhandenen Prototypen, welcher bis auf die Generatorhalterung, welche es noch zu verzinken gilt, und den Kernblechen der Wirbelstrombremse witterungsbeständig gegen Nässe und UV-Strahlung ist, kann nun der Focus auf die Abarbeitung der vorher genannten Punkte mittels weitergehender Versuche und Experimente mit dem Prototypen gerichtet werden, wodurch sich auch interessante Themenstellungen für künftige Studienabschlussarbeiten ergeben werden.