

## SPARK-Generator für moderne Windkraftanlagen

### Christian Deeg

Mit der zunehmenden Erschöpfung fossiler Brennstoffe und der schwindenden Akzeptanz von Kernkraftwerken gewinnen Verfahren zur Stromgewinnung aus regenerativen Energieträgern zusehends an Bedeutung. Die Solarenergie hat sich bereits bei der Warmwasserbereitung über Solarkollektoren etabliert und stellt selbst in unseren Breitengraden eine ökologisch sinnvolle und wirtschaftliche Alternative zu den herkömmlichen Technologien dar. Davon abweichend ist die Entwicklung auf dem Gebiet der Photovoltaik zur direkten Wandlung von Solarenergie in elektrische Energie noch nicht abgeschlossen. Die Photovoltaik ist unbestreitbar die eleganteste Form der Stromerzeugung, da sie gänzlich ohne mechanisch bewegte Teile auskommt. Leider blieb ihr der Durchbruch zur Massenapplication bisher versagt, da Solarzellen heute noch relativ teuer und ihr Wirkungsgrad eher gering ist. Außerdem liegt ihre energetische Amortisationszeit, d. h. die Zeit, in der sie die zu ihrer Herstellung aufgewendete Energie wieder zurück liefert, vergleichsweise hoch. Die beachtlichen Fortschritte in der Forschung auf dem Gebiet der Photovoltaik lassen aber keinen Zweifel daran, daß ihr Potential den zukünftigen Markt der Stromerzeugung entscheidend prägen wird.

Schon heute aber gibt es mit dem Wind einen unerschöpflichen und im Hinblick auf die nutzungsbedingte Umweltbeeinflussung nahezu idealen Energieträger. Seit mehreren hundert Jahren macht sich der Mensch die Kraft des Windes durch Windmühlen nutzbar. Während zunächst lediglich zwischen verschiedenen Formen der mechanischen Energie gewandelt wurde, um beispielsweise Mahl- oder Pumpwerke zu betreiben, so steht heute die Wandlung der mechanischen Energie des Windes in elektrische Energie im Vordergrund. Dabei hat die stetige Fortentwicklung und Optimierung von Windkraftanlagen dazu geführt, daß sich schon jetzt die Kosten der Stromerzeugung aus Wind und die Kosten der Stromerzeugung in einem modernen Kohlekraftwerk in vergleichbaren Größenordnungen befinden. Die energetische Amortisationszeit moderner Windkraftanlagen liegt im Bereich von einigen Monaten.

Windkraftanlagen lassen sich einteilen in Anlagen mit direkter und Anlagen mit indirekter Netzeinspeisung. Anlagen mit direkter Netzeinspeisung bestehen in der Regel aus dem Rotor, einem Getriebe zur Drehzahlanpassung und einem direkt mit dem elektrischen Netz verbundenen Asynchrongenerator. Der Generator bezieht dabei die zur Erregung seines magnetischen Feldes benötigte Blindleistung aus dem Netz. Diese Anordnung ist sicherlich die kostengünstigste, aber nicht die energetisch günstigste Form der Energiewandlung. Bei Einsatz eines ASM-Normgenerators ist die Drehzahl einer solchen Anlage durch das Netz vorgegeben. Sie kann nur innerhalb eines sehr engen Bereiches variieren und nutzt damit die vom Wind angebotene Leistung nicht optimal. Das erforderliche Getriebe bedarf einer kontinuierlichen Wartung, senkt den Wirkungsgrad (insbesondere bei Abnutzung) und geht mit einem erheblichen Anteil in die Anschaffungskosten der Anlage ein. Die meisten Hersteller von Windkraftanlagen suchen daher nach Möglichkeiten, um auf das Getriebe verzichten zu können.

Anlagen mit indirekter Einspeisung sind durch einen Frequenzumrichter vom Netz entkoppelt. Hierdurch ergibt sich der Vorteil einer optimalen Energieausbeute, da die Anlage im *Maximum Power Point* (Drehzahl der höchsten momentan umsetzbaren Leistung) betrieben werden kann. Auch der Einsatz von Synchrongeneratoren wird durch den Einsatz eines Umrichters praktisch erst möglich. Permanentmagneterregte Synchrongeneratoren bieten die Möglichkeit einer verlustlosen Bereitstellung des Erregerfeldes und haben daher in der Regel einen höheren Wirkungsgrad als Asynchrongeneratoren. Außerdem ermöglicht die maschinenseitige Steuerung

des Umrichters eine feldorientierte Regelung des Generators, bei der die nicht momentenbildenden Stromanteile zu null geregelt werden. Bei der netzseitigen Steuerung ergibt sich die Möglichkeit zur Einstellung des Leistungsfaktors.

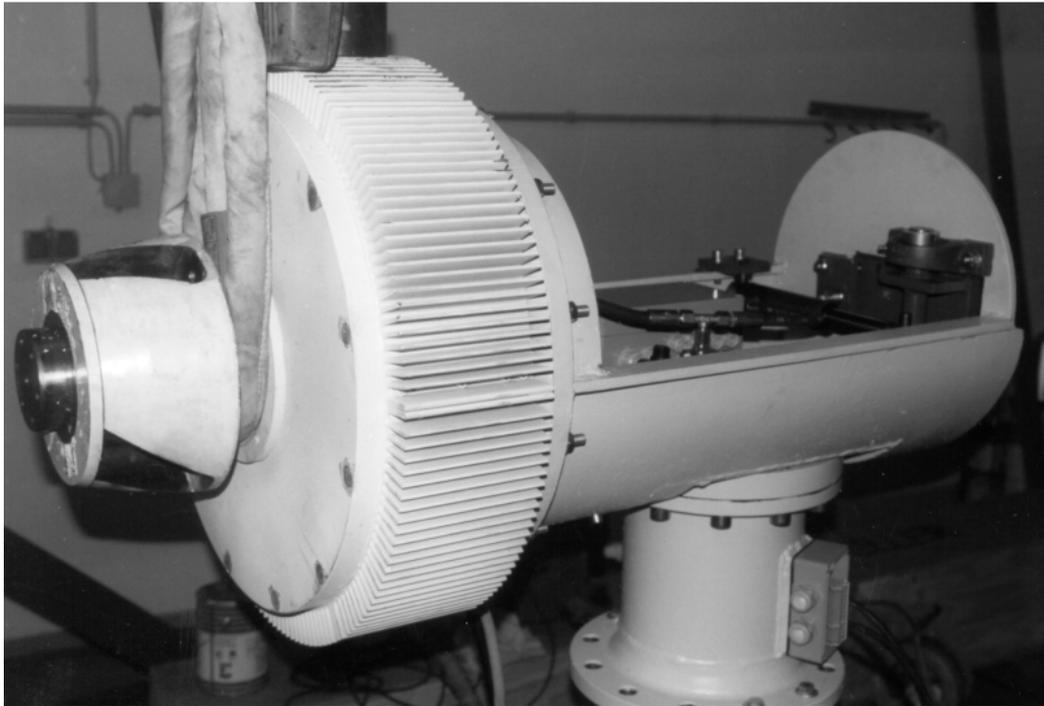


**Abb. 1: Windkraftanlage mit SPARK-Generator**

Die indirekte Einspeisung über einen Frequenzumrichter stellt offensichtlich die technologisch höherwertige Form der Stromerzeugung aus Windenergie dar. Der Verzicht auf ein Getriebe kann die hierbei entstehenden Mehrkosten zumindest teilweise kompensieren. Die Preisentwicklung auf dem Halbleitermarkt unterstützt diesen Trend, so daß abhängig von den Randbedingungen ein Kostengleichgewicht zukünftig möglich erscheint. Voraussetzung ist in diesem Fall jedoch ein Generator, der in der Lage ist, die gewünschte Leistung bei niedrigen Drehzahlen zu wandeln. Das am IMAB der TU Braunschweig entwickelte SPARK-Konzept erfüllt diese Forderung und bietet darüber hinaus noch einige gerade in Bezug auf die Windkraftnutzung nennenswerte Vorteile.

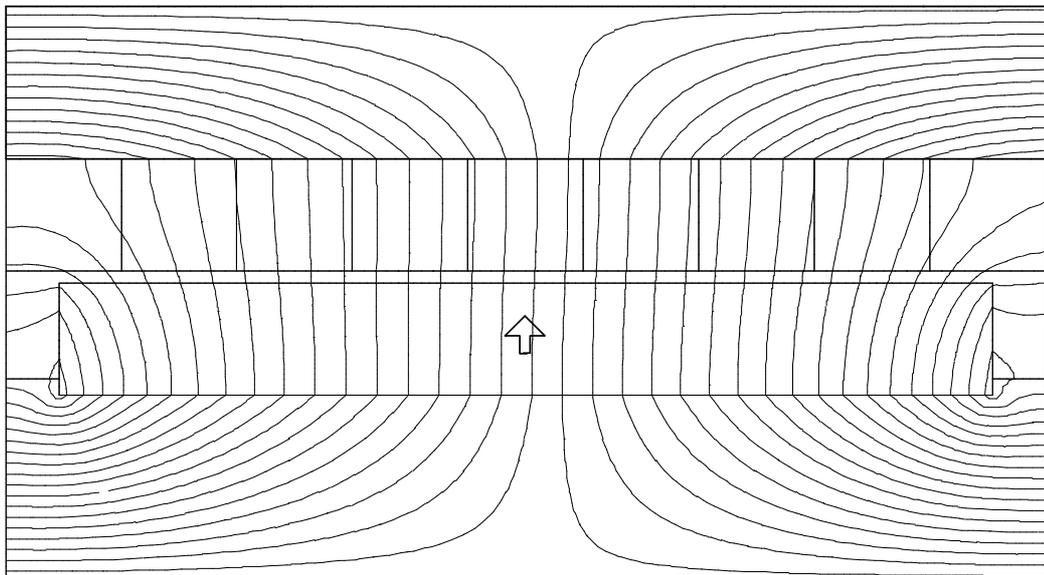
Beim SPARK-Konzept handelt es sich um eine Axialfeld-Synchronmaschine. Die Erregung wird verlustfrei über Hochenergie-Permanentmagnete (NdFeB) bereitgestellt. Die Maschine besitzt keine Nuten, wodurch die Bildung von Rastmomenten vermieden wird. Hierdurch können auch geringe Windgeschwindigkeiten genutzt werden.

Ebenfalls durch das Fehlen der Nuten bedingt, läuft die Maschine nahezu geräuschlos, ein wichtiger Aspekt hinsichtlich der Akzeptanz von Windkraftanlagen.



**Abb. 2: SPARK-Generator**

Die Abbildungen 1 und 2 zeigen eine ausgeführte 5 kW-Windkraftanlage mit SPARK-Generator zur dezentralen Energieversorgung. Das SPARK-Konzept ist problemlos skalierbar, so daß auch höhere Leistungen realisiert werden können.

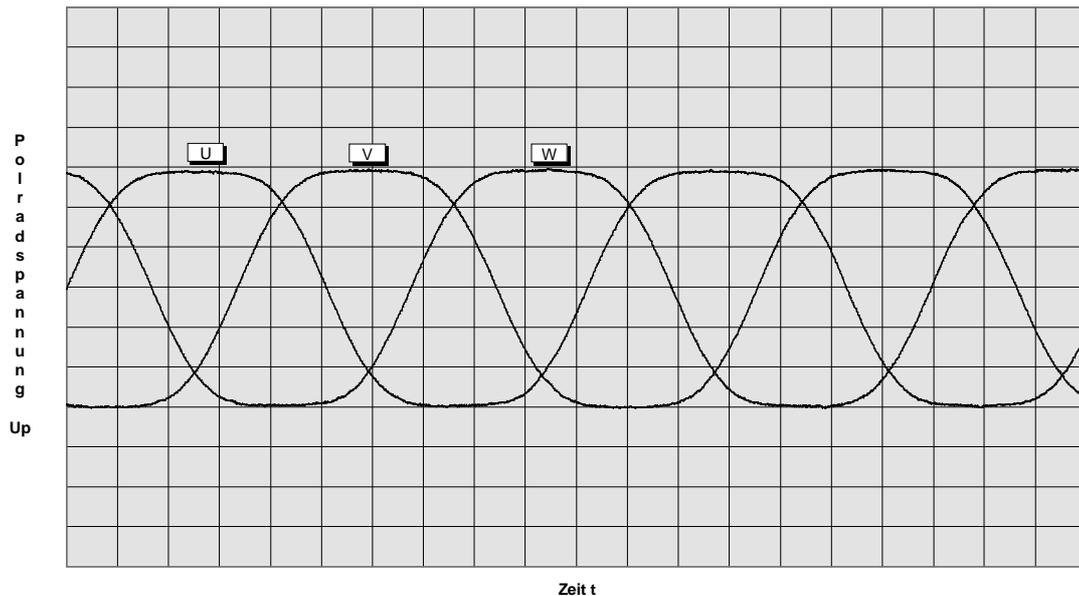


**Abb. 3: Feldlinienverlauf beim SPARK-Generator**

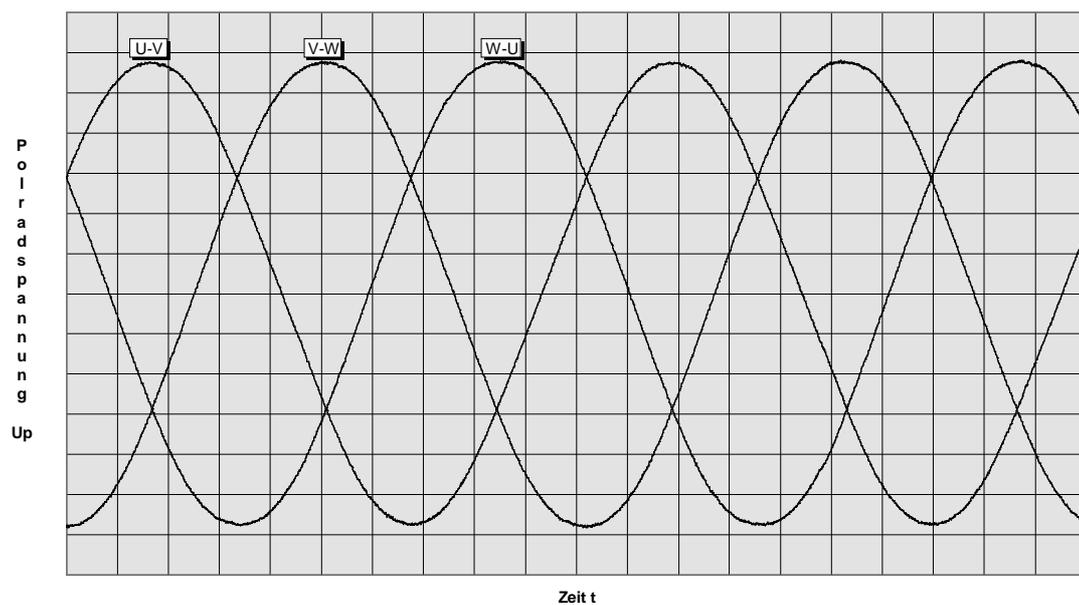
Die elektrische und magnetische Auslegung des Generators erfolgte am IMAB. Abbildung 3 zeigt eine entsprechende FE-Analyse des magnetischen Kreises. **Deutlich zu erkennen ist die geringe Ankerrückwirkung**, da trotz Speisung mit Nennstrom das durch die Permanentmagnete

hervorgerufene Erregerfeld kaum von der symmetrischen Form abweicht. Hiermit einher geht eine hohe Überlastbarkeit der Maschine, ohne daß dabei die Permanentmagnete nachhaltig geschädigt werden könnten. Hilfreich ist dieser Effekt beispielsweise bei der Ausnutzung von Windböen oder dann, wenn eine Anlage mit starrer Blattanlenkung den Bereich zwischen Nennpunkt und Strömungsabriß durchfährt.

Die Strangspannungen im Generatorbetrieb sind in Abbildung 4 dargestellt. Bei der Sternverschaltung werden die dritten Oberwellen in den Spannungen eliminiert, so daß sich in Abbildung 5 für die verketteten Spannungen nahezu reine Sinusverläufe ergeben.



**Abb. 4: Strangspannungen beim SPARK-Generator**



**Abb. 5: Verkettete Spannungen beim SPARK-Generator**