



Umrichtertechnik

So schnell und einfach lassen sich Feldverteiler in Betrieb nehmen und bedienen

Anpassung schwankender Antriebsdrehzahl in Windkraftanlagen



01 Überlagerungsgetriebe (links) und Servo im Vergleich

Große Frequenzumrichter sind teuer, reparaturanfällig und mit teils hohen elektrischen Verlusten verbunden. Gerade im Zukunftsmarkt Windkraft sind die Betriebssicherheit und ein hoher Wirkungsgrad wichtige Verkaufsargumente. In einem Gemeinschaftsprojekt ist nun ein Getriebe entwickelt worden, das den Betrieb eines Generators mit Konstantdrehzahl ermöglicht.

Das entwickelte stufenlose Getriebe wandelt die durch den Wind bedingte instationäre Drehzahl des Rotors in eine konstante Drehzahl für einen Synchrongenerator und macht somit den kostspieligen leistungselektronischen Umrichter hoher Leistung obsolet. Weiterhin ermöglicht diese Bauweise einen besseren Wirkungsgrad des Gesamtsystems. In diesem Artikel wird die Auswahl des geeigneten Getriebekonzeptes aus der Vielzahl verschiedener Möglichkeiten beschrieben.

Definition der leistungsverzweigten Getriebe

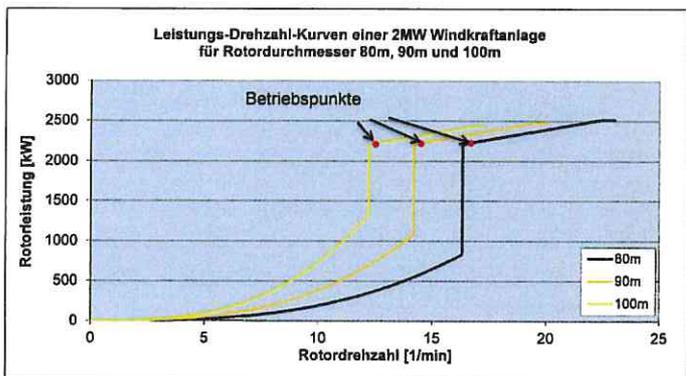
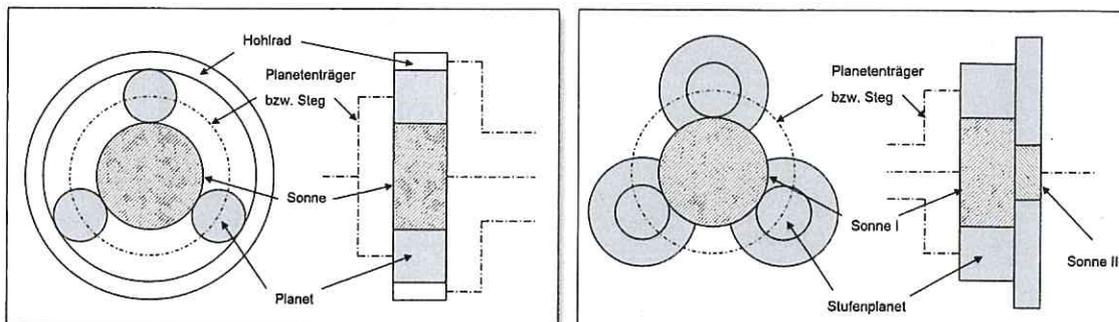
Für die Realisierung ist ein Überlagerungsgetriebe mit einem speziellen Planetensatz zur Leistungsverzweigung gewählt worden. Es besteht aus einem Zentralrad (Sonne), umlaufende Zahnräder (Planeten), welche auf einem Steg bzw. Planetenträger montiert sind und dem Hohlrad. Der Aufbau des Planetengetriebes ist dem Bild 02 zu entnehmen. Üblicherweise ist das Hohlrad gehäusefest, in der gewünschten Anwendung ist es notwendig, dass das Hohlrad eine Drehzahl annehmen kann, um einen Antrieb, einen Abtrieb und einen Nebenzweig zu realisieren.

Eine weitere betrachtete Variante des Planetengetriebes, ein Plus-Getriebe, ist in Bild 02 zu sehen. Hier ersetzt eine zweite Sonne das Hohlrad. Die Sonnen sind über Stufenplaneten gekoppelt. Die Planeten sind starr miteinander verbunden.

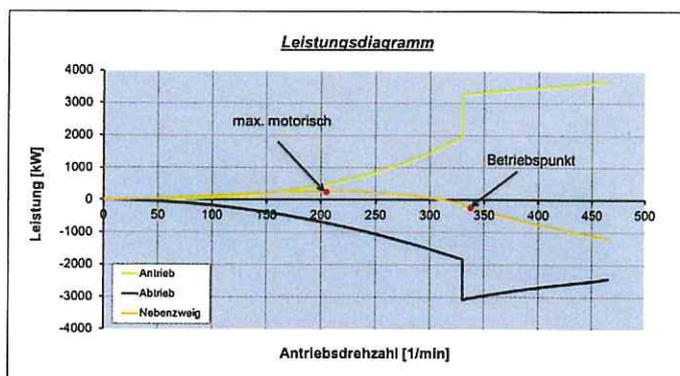
Abgesehen von der Bauform gibt es einige Wirkunterschiede zwischen den beiden Bauformen. Die lastunabhängigen Verluste sind bei Standard-Getrieben höher, da zwischen Schmierstoff und mitdrehendem Hohlrad hohe Reibungsverluste entstehen. Plus-

Dr.-Ing. Khashayar Nazifi ist Werksleiter und Dipl.-Ing. Christoph Ridder Projektleiter Windkrafthauptgetriebe, beide bei der Zollern GmbH & Co. KG in Dorsten; Dr.-Ing. Ernst August Werner ist Geschäftsführer der Isatec GmbH in Aachen; Prof. Dr.-Ing. Kay Hameyer ist Leiter des Institut für elektrische Maschinen an der RWTH Aachen; Qian Liu, M.Sc., und Dr.-Ing. Rüdiger Appunn sind beide wissenschaftliche Mitarbeiter am Institut für elektrische Maschinen an der RWTH Aachen

02 Standard-Planetengetriebe (links) und Plus-Getriebe



03 Leistungs-Drehzahl-Kurven einer 2-MW-Windkraftanlage für Rotordurchmesser 80, 90 und 100 m



04 Leistungsdiagramm der Variante A, 122 m, 1000 rpm und 3 MW

Getriebe bieten hier geringere Angriffsflächen. Ein weiterer Vorteil der Plus-Getriebe ist die einfache Montierbarkeit. Nachteilig ist jedoch die hohe Herstellgenauigkeit der Stufenplaneten, um eine gleichmäßige Lastaufteilung zwischen den einzelnen Planeten zu gewährleisten. Zusätzlich weisen Plus-Getriebe in manchen Betriebszuständen Blindleistung auf, welche den Wirkungsgrad verschlechtert und zu einer Überdimensionierung führt.

Ermittlung der Standübersetzung

Zur Ermittlung der geeigneten Standübersetzung sind einige Randbedingungen zu definieren. Zielsetzung ist es, das Getriebe in Windkraftanlagen der 2-MW- bis 3-MW-Klasse einzusetzen. Die erfahrungsgemäß infrage kommenden Betriebsdaten sind in **Tabelle 1** aufgeführt.

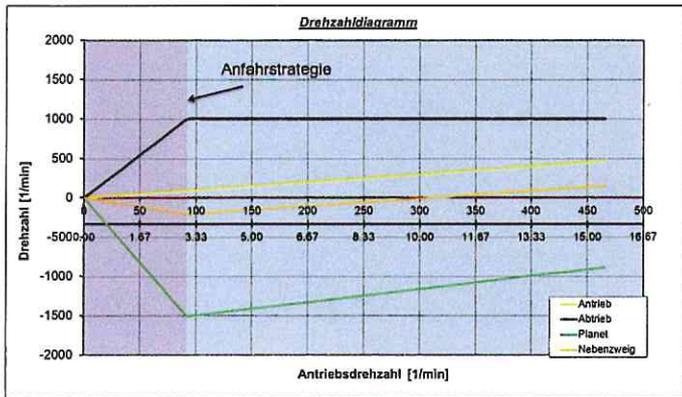
Die stufenlose Regelung des Getriebes soll durch eine überlagerte Drehzahl aus dem Nebenzweig realisiert werden. Je nach Betriebszustand treibt der Nebenzweig den Abtrieb gemeinsam mit dem Rotor an oder wird ebenfalls vom Rotor angetrieben. Die sechs verschiedenen Kopplungsmöglichkeiten der Wellen sind in **Tabelle 2** dargestellt.

Der Betrag der Nebenzweigleistung wird über die Standübersetzung des verwendeten Getriebes festgelegt. Durch eine Leistungsbilanz und der Kenntnis der Drehmomentbeziehungen eines Planetengetriebes können für jede Variante Standübersetzungen ermittelt werden, die eine gezielte Leistung im Betriebspunkt einstellen.

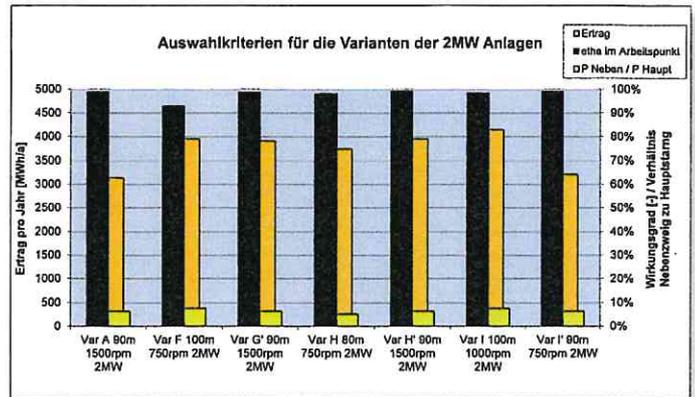
Die Leistung des Nebenzweigs wird mit max. 5 % der Nennleistung festgelegt und ist für 2-MW-Anlagen - 100 kW und für 3-MW-Anlagen - 150 kW groß. Die negative Leistung bedeutet, dass hier

Tabelle 1: Drehzahlen, Rotordurchmesser und Übersetzungen der beiden Leistungsklassen

Leistungsklassen [MW]	Rotordurchmesser [m]	Rotordrehzahlen [min ⁻¹]	Generatordrehzahlen [min ⁻¹]	Übersetzungen [-]	Anzahl möglicher Kombinationen
2	80,	12,5,	750, 1000, 1500	30, 60, 70, 80, -30, -60, -70, -80	3 × 8 = 24
	90,	14,5,			
	100	16,7			
3	100,	11,25,	750, 1000, 1500	30, 66, 80, 100, -30, -66, -80, -100	3 × 8 = 24
	112,	13,6,			
	122	14,5			



05 Drehzahl-Diagramm der Variante A, 122 m, 1 000 rpm und 3 MW



06 Auswahlkriterien für die Varianten der 2-MW-Anlagen

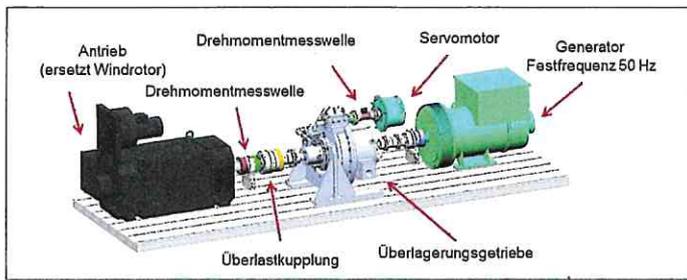


Tabelle 2: Kopplungsmöglichkeiten am Beispiel Standard-Getriebe

Variante	Antrieb	Abtrieb	Nebenzweig
A	Steg	Sonne	Hohlrad
B	Steg	Hohlrad	Sonne
C	Sonne	Steg	Hohlrad
D	Sonne	Hohlrad	Steg
E	Hohlrad	Steg	Sonne
F	Hohlrad	Sonne	Steg

07 Komponenten des Prüfstandsbaus

der angeschlossene Elektromotor generatorisch betrieben wird. Die Abtriebsdrehzahl ist über den Synchrongenerator vorgegeben. Somit ist für die Ermittlung der Standübersetzung der Betriebspunkt des Antriebes notwendig. Diese Betriebspunkte lassen sich über Leistungs-Drehzahl-Kurven ermitteln, welche das Betriebskennfeld einer Windkraftanlage darstellen. In Bild 03 sind diese Kurven für drei verschiedene Rotordurchmesser mit ihren Betriebspunkten dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Kurven zunächst exponentiell bis zu einer Drehzahl kurz vor der Betriebsdrehzahl ansteigen. Ab diesem Punkt wird mittels der Rotorblattverstellung bei konstanter Drehzahl das Drehmoment bis kurz vor der Nennleistung erhöht. Beim Erreichen des Nenndrehmomentes wird in einem weiteren Schritt die Drehzahl bis zur Nenndrehzahl weiter erhöht. Um den Antriebsstrang weniger zu belasten, wird die Schwankung der Windgeschwindigkeit mit Schwankungen in der Drehzahl kompensiert und nicht mit Schwankungen des Drehmomentes.

Aufgrund der Festlegungen der Randbedingungen und der Kombinationen der Getriebeanbindungen ergeben sich 864 mögliche Standübersetzungen für jede Megawattklasse. Wird auch die umgekehrte Drehrichtung des Synchrongenerators betrachtet, so ist dann sogar die doppelte Anzahl an Möglichkeiten gegeben. Die Untersuchungen zeigen jedoch, dass diese Lösungen redundant sind. Nicht jede dieser 864 Standübersetzungen können auch realisiert werden. Die Standübersetzungen eines Standard-Planetengetriebes liegt zwischen $i_0 = -1,8$ und $-5,5$. Übersetzungen die größer sind als $i_0 = -1,8$ sind nicht herstellbar und Übersetzungen kleiner als $i_0 = -5,5$ werden selten hergestellt, da die Getriebestufe schwer wird. Beim Plus-Getriebe sind alle Lösungen kleiner als $i_0 = 0$ nicht herstellbar.

Nach der ersten groben Auswahl werden nun alle Varianten näher untersucht und detaillierter über den gesamten Drehzahl-

bereich betrachtet. Bisher war es Ziel der Auslegung eine bestimmte Leistung im Nebenzweig einzuhalten. Nun werden Kriterien wie Abtriebsdrehmoment des Nebenzweiges, Planeten- und Abtriebsdrehzahl aus konstruktiver Sicht wichtig. Zusätzlich wird bei der Feinjustierung die Standübersetzung so verändert, dass der Betrag der Leistungen im Arbeitspunkt und die maximale im motorischen Betrieb gleich groß sind.

Als Grenzdrehzahl für die Planetenräder sind 1500 min^{-1} festgelegt worden. Für den Nebenzweig ist versucht worden die Drehzahl geringer als 3000 min^{-1} und das maximale Drehmoment geringer als 5 kNm zu halten. Diese Drehzahlen werden durch eine geeignete Anfahrstrategie erreicht. Bei zu hohen Drehmomenten im Nebenzweig wird eine zusätzliche Abtriebsstufe genutzt.

Auswahl der geeigneten Lösung

Für die ausgewählten Varianten ist der gesamte Betriebsbereich betrachtet worden. Anhand einer Weibull-Verteilung für eine mittlere Windgeschwindigkeit von $6,5 \text{ m/s}$ ist die Häufigkeit verschiedener Windgeschwindigkeiten ermittelt worden. Mit diesem Wissen und den berechneten Wirkungsgraden wird der Jahresertrag der Varianten ermittelt. Die Wirkungsgrade setzen sich zusammen aus dem Wirkungsgrad des Hauptgetriebes, des Überlagerungsgetriebes, falls vorhanden, dem der nachfolgenden Stufe, des Synchrongenerators und dem motorischen und generatorischen Wirkungsgraden des Elektromotors im Nebenzweig.

In Bild 06 sind die besten Ergebnisse für die 2-MW-Anlagen sammengetragen. Es ist zu erkennen, dass die Wirkungsgrade im Arbeitspunkt deutlich über 90 % liegen. Jedoch bedeutet ein hoher Wirkungsgrad nicht unmittelbar einen hohen Ertrag pro Jahr. Je nachdem bei welcher Windgeschwindigkeit die Produktion beginnen

kann und welche Anfahrstrategie durchgeführt wird ist der Ertrag abweichend zur Höhe des Wirkungsgrades. Es zeigt sich, dass die Variante F die beste Lösung für Standard-Planetengetriebe liefert und die Variante I die beste Lösung für die Plus-Getriebe liefert.

Systemsimulation des Triebstrangkzeptes

Am Institut für Elektrische Maschinen (IEM) der RWTH Aachen wurde eine Systemsimulation des Triebstrangkzeptes mit mechanischer Leistungsverzweigung in Matlab/Simulink durchgeführt. Basierend auf den zuvor ermittelten Getriebedaten konnte das dynamische Verhalten einer Windenergieanlage der 2-MW-Klasse simuliert werden. Es wurden stochastische Windfelder verwendet, sowie eine geeignete Anfahrstrategie implementiert.

Das Konzept wurde auf einem im Maßstab 1:10 skalierten Prüfstand am IEM verifiziert. Sowohl stationäre Betriebspunkte, als auch dynamische Vorgänge konnten gefahren werden. Es wurden die mechanischen Leistungen in den einzelnen Zweigen des Getriebes, sowie die elektrischen Leistungen von Synchrongenerator und Elektromotor gemessen. Die Ergebnisse belegen das Funktionsprinzip. Insgesamt konnte anhand der Prüfstandsversuche gezeigt werden, dass das Überlagerungsgetriebe über einen relativ kleinen Nebenzweig mit der erforderlichen Drehzahlstreuung bei gleichzeitig hoher Dynamik betrieben und die gewünschte Festdrehzahl auf der Abtriebsseite sichergestellt werden kann.

www.zollern.com; www.isaftec-aachen.de

Danksagung



Das Forschungsvorhaben wurde im Rahmen der Ziel2.NRW-Förderung unterstützt.

Inserentenverzeichnis Heft 5/2017

Altra Industrial Motion, Braintree/Massachusetts (USA).....	9	LTI Motion, Lahnau	13
Automation24, Essen	5	Mayr, Mauerstetten	8
Baumer IVO, Villingen-Schwenningen	51	Novotechnik, Ostfildern	27
Bosch Rexroth, Lohr.....	43	Pöppelmann, Lohne	19
B&R Industrie-Elektronik, Bad Homburg.....	7	Reich, Bochum	38
BRECO Antriebstechnik, Porta Westfalica	29,31	Rotor Clip, Somerset/New Jersey (USA)	3
CSM, Filderstadt	32	R+W Antriebselemente, Klingenberg	15
ELATECH, Brembilla/BG (Italien)	33	SCHMIDT-KUPPLUNG, Wolfenbüttel... 39	
GMN Paul Müller Industrie, Nürnberg	25	SIEB & MEYER, Lüneburg.....	17
HEIDENHAIN, Traunreut.....	2,US	Siemens AG, Industry Sector, Bocholt	4,US
HSB Automation, Reutlingen.....	45	STS Sensoren Transmitter Systeme, Sindelfingen	11
igus®, Köln.....	44	TWK-ELEKTRONIK, Düsseldorf.....	11
IMS Gear, Donaueschingen	63	VMA®, Grobostheim	37
Jenaer Antriebstechnik, Jena	61	WITTENSTEIN alpha, Igersheim	59
KIMO, Erlangen	63		

HOCHSCHULE PFORZHEIM

Die Hochschule Pforzheim bietet anwendungsbezogene wissenschaftliche/künstlerische Lehre und Forschung. Interdisziplinarität, Internationalität, Technologie- und Know-how-Transfer sind wesentliche Elemente unseres Erfolgs. Das Hochschulstudium wird bei uns nicht nur als Fachausbildung verstanden, sondern dient zugleich der Persönlichkeitsentwicklung der Studierenden.

An der Fakultät für Technik ist im Studiengang Mechatronik die folgende Professur zu besetzen:

PROFESSORIN / PROFESSOR (W3)

FÜR ELEKTRISCHE ENERGIEWANDLUNGS- UND ANTRIEBSSYSTEME

Gesucht wird eine Persönlichkeit für die Abdeckung der Lehre und Forschung auf dem Gebiet der elektrischen Antriebstechnik in Kombination mit Leistungselektronik für mobile Systeme (Haupt- und/oder Nebenaggregate in Kfz, NKW, TwoWheeler oder Schiene).

Der zukünftige Stelleninhaber/Die zukünftige Stelleninhaberin ist ausgewiesene/-r Ingenieur/-in, verfügt über mehrjährige Berufserfahrung in o.g. Themen, ist umfassend in seinem/Ihrem Fachgebiet vernetzt, hat Erfahrung in der Einwerbung von Drittmitteln, ist regelmäßig mit Fachpublikationen auf Konferenzen bzw. Journalen vertreten und komplettiert dies durch die Mitarbeit in einschlägigen Fachgremien.

Des Weiteren wird die Bereitschaft zum Ausbau des Forschungsschwerpunktes im Rahmen von Laboren und ForschungsKooperationen vorausgesetzt.

Eine priorisierte Liste der für die Stelle relevanten Veröffentlichungen, Vorträge und Patente runden die Bewerbung ab.

Die Professur ist im Studiengang Mechatronik verankert, der sich auf die Ausbildung von Studierenden mit umfassendem Systemwissen fokussiert. In der Bewerbung sollte dahingehend aufgezeigt werden, auf welchen Teilgebieten der elektrischen Antriebssysteme bzw. deren Integration in mechanische Anlagen und Produkte eine umfassende Expertise besteht.

Kennziffer 172013 – Bewerbungsschluss ist der 30.06.2017.

Bei Fragen wenden Sie sich bitte an Prof. Dr. Martin Pfeiffer (E-Mail: martin.pfeiffer@hs-pforzheim.de).

Berufungsvoraussetzungen sind u. a. ein abgeschlossenes Hochschulstudium, wissenschaftliche Qualifikation, die i. d. R. durch Promotion nachgewiesen wird, und mindestens fünf Jahre Berufserfahrung – davon mindestens drei Jahre außerhalb des Hochschulbereichs. Weitere Einzelheiten (vgl. § 47 Landeshochschulgesetz Baden-Württemberg) sind einem Merkblatt zu entnehmen, das über die Homepage der Hochschule heruntergeladen werden kann.

Die Hochschule Pforzheim strebt die Erhöhung ihres Frauenanteils an und fordert qualifizierte Interessentinnen deshalb nachdrücklich auf, sich zu bewerben. Bei gleicher Qualifikation haben behinderte Bewerber/-innen Vorrang.

Ihre Bewerbung senden Sie bitte unter der Kennziffer entweder per E-Mail an berufungen@hs-pforzheim.de oder per Post an den Rektor der Hochschule Pforzheim, Herrn Prof. Dr. Ulrich Jautz, Tiefenbronnerstr. 65, 75175 Pforzheim.

