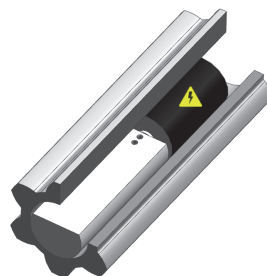


Energy Harvesting in rotierenden Maschinenelementen

Quanz, M.; Gansel, R.; Barton, S.; Lohrengel, A.

Im Rahmen des DFG Schwerpunktprogramms 2305 „Sensorintegrierende Maschinenelemente als Wegbereiter flächendeckender Digitalisierung“ wird als ein Teilaspekt untersucht, wie mittels Energy Harvesting die im System vorhandene Energie genutzt werden kann, um Sensoren und eine integrierte Auswerteelektronik in rotierenden Antriebselementen mit elektrischer Energie zu versorgen. Dazu wurden Vorversuche mit kleinen permanentenregten DC-Maschinen im Generatorbetrieb durchgeführt.



As a part of the DFG priority program 2305, "Sensor-integrating machine elements as a pioneer of comprehensive digitalization", researchers are investigating the use of energy harvesting to supply sensors and integrated evaluation electronics in rotating drive elements with electrical energy while making use of the energy available in the system. Therefore, preliminary tests have been carried out using small permanently excited DC machines in generator mode.

Einleitung

Um den Ermüdungszustand von Maschinenelementen zu untersuchen, werden Sensoren eingesetzt. Bisher ist es notwendig die Sensoren über Kabel mit der Auswerteelektronik und der Energieversorgung zu verbinden. Die erfassten Daten müssen ebenfalls über eine Kabelverbindung oder durch eine Funkverbindung übertragen werden. Die Sensoren sind oft an schwer zugänglichen Stellen montiert. Dies macht die Wartung und den Batteriewechsel aufwendig oder es müssen unwirtschaftliche Übertragungsmöglichkeiten wie Schleifringe für die Stromversorgung eingesetzt werden, bei denen die Schleifkontakte durch auftretende Verschleißerscheinungen ebenfalls regelmäßig ersetzt werden müssen.

Für eine einfache, wartungsarme im Maschinenelement integrierte Energieversorgung bietet sich das Energy Harvesting an. Dieser Begriff beschreibt die Nutzung von im System vorhandener Energie und deren Umwandlung, um beispielsweise Sensoren oder Mikroelektronik mit elektrischer Energie zu versorgen. Im Idealfall, wenn die Sensordaten per Funk übertragen werden, kann dann auf aufwendige Lösungen wie den Einsatz von Schleifringen gänzlich verzichtet werden. Dadurch können Wartungen vermieden oder deren Häufigkeit reduziert werden.

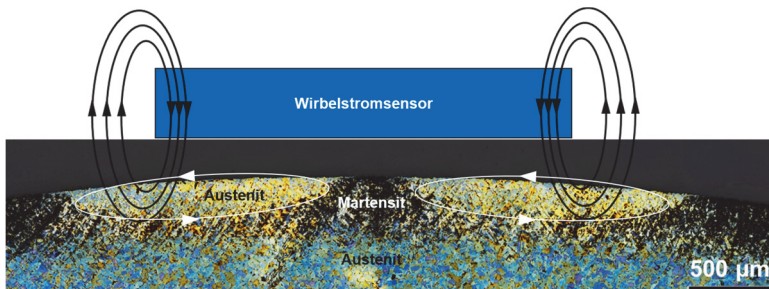


Abbildung 1: Querschnitt eines exemplarischen sensorischen Werkstoffs mit stark vereinfachter Darstellung der Funktionsweise des Wirbelstromsensors

Im Rahmen des Teilprojekts „Lastsensitive Zahnwelle mit sensorischem Werkstoff“ des DFG Schwerpunktprogramms (SPP) 2305 wird die Belastung der Zahnwelle durch einen Werkstoffsensor erfasst. Ein Teilziel besteht darin, die erforderliche elektrische Energie durch Energy Harvesting zu gewinnen. Die Stromversorgung muss dabei ausreichend Leistung zur Verfügung stellen, um die auf dem Werkstoffsensor angebrachte Wirbelstromspule, sowie die Bauteile zur Datenauswertung und -übertragung zu versorgen. Dazu ist eine Leistung in Höhe von 1,25 W während des Auslese- und Übertragungsvorgangs notwendig. Ein Querschnitt durch einen solchen Werkstoffsensor ist in Abbildung 1 dargestellt.

Literaturrecherche

In /1/ wird eine Übersicht über die nutzbaren physikalischen Effekte für das Energy Harvesting gegeben und wie diese kategorisiert werden können. Nutzbar sind beispielsweise Relativbewegungen, Temperaturdifferenzen, Licht, elektromagnetische Strahlung und chemische Energie. Im Getriebe treten Relativbewegungen, mechanische Schwingungen und Temperaturunterschiede auf. Für den Einsatz in rotierenden Maschinenelementen bieten sich somit der piezoelektrische, elektromagnetische und der thermoelektrische Effekt (Seebeck-Effekt) an.

Die erzielbare Leistung hängt von dem physikalischen Effekt sowie vom verwendeten Energiewandler ab und reicht von einigen μW bis zu einigen Watt /2/. Im Anwendungsfall rotierender Antriebswellen besitzt die elektrodynamische Energieumwandlung nach /2/ die höchste nutzbare Leistung, gefolgt von den Thermogeneratoren und den Piezoelementen.

In /3/ werden ebenfalls verschiedene Methoden des Energy Harvesting verglichen. Dabei wird aufgezeigt, dass ein Nachteil der Nutzung des piezoelektrischen Effekts die starke Variabilität der Ausgangsleistung, abhängig vom Betriebszustand, ist. Dem gegenüber stehen bei Nutzung der thermischen Energie eine kontinuierliche

Energieversorgung bei vorhandenem Temperaturunterschied, sowie Langlebigkeit und Zuverlässigkeit. Allerdings hängt die nutzbare elektrische Energie stark vom Temperaturgradienten ab und fällt bei geringen Temperaturdifferenzen sehr gering aus. Die nutzbare Leistung wird durch den geringen Wirkungsgrad der Methode noch weiter reduziert.

Aus diesen Gründen wird für das weitere Vorgehen der elektromagnetische Effekt genutzt. Ziel ist es, einen Generator in eine Zahnwelle zu implementieren. Ein Beispiel ist im Titelbild dargestellt. Dazu wird die Zahnwelle als Hohlwelle ausgeführt. Dieses Vorgehen ist ideal, da das Material im Inneren der Zahnwelle unter Torsionsbelastung kaum beansprucht wird und deshalb entfernt werden kann. In /4/ wird als Grenze angegeben, dass Bohrungen mit einem Durchmesser von $0,33 d_B$ (d_B = Bezugsdurchmesser der Zahnwelle) nahezu keine Spannungserhöhung hervorrufen und dass ein Bohrungsdurchmesser von $0,5 d_B$ die Beanspruchung im Zahnfuß um weniger als 10 % erhöht. Die Grenzen des maximal möglichen Bauraums für die Generatoren werden hierdurch klar festgelegt. Der Generator (schwarz) ist über sein Gehäuse starr mit der Zahnwelle verbunden, das Gehäuse rotiert demnach mit der Zahnwelle. Um elektrische Energie induzieren zu können, muss die Rotorwelle des Gleichstrommotors fixiert werden. Dies wird durch eine träge Masse (grau, halbrund) erreicht, welche mit der Rotorwelle des Generators verbunden ist. Wenn die Zahnwelle rotiert, bleibt die Masse in Ruhe.

Durchgeführte Versuche

Für die Vorversuche wurden verschiedene Gleichspannungs-Elektromotoren mit Permanentmagnet, die in Tabelle 1 mit den jeweiligen Kennzahlen aufgelistet sind, generatorisch betrieben.

In Umkehrung zum Anwendungsfall in der Zahnwelle wurde jedoch die Rotorwelle angetrieben und das Gehäuse fixiert, da dadurch der erste Prüfaufbau vereinfacht werden konnte. Die erzeugte elektrische Leistung der Generatoren wurde durch die Verwendung von zwei Multimetern (Strom- und Spannungsmessung) gemessen. Zusätzlich wurde die Drehzahl in den Schritten 170, 240, 355, 560, 800, 1180, 1700, 2400 sowie 3550 Umdrehungen pro Minute variiert.

Die Ergebnisse der Vorversuche sind in Abbildung 2 dargestellt. Der Energy Harvesting Mechanismus in der Zahnwelle soll für den Betrieb der Wirbelstromspule und der Auswerteelektronik eine Leistung von 1,25 W generieren. Diese Leistung wird als „Erforderliche Mindestleistung“ im Diagramm dargestellt. Es ist ersichtlich, dass drei Motoren diese Leistung oberhalb einer Mindestdrehzahl kontinuierlich bereitstellen können. Der Getriebemotor IG420014-25271R generiert bereits bei sehr niedrigen Drehzahlen genug elektrische Energie, um die kontinuierliche Stromversorgung sicherstellen zu können. Jedoch ist der Drehzahlbereich begrenzt, als Nennzahl sind 420 U/min angegeben /5/. Weiterhin wird dabei das größte Schleppmoment erzeugt, da ein Getriebe genutzt wird. Dadurch wird eine entsprechend große träge Masse benötigt, um die Rotorwelle im Anwendungsfall in

Ruhe halten zu können. Aus diesem Grund ist der Getriebemotor nur für sehr große langsam laufende Zahnwellen geeignet.

Tabelle 1: *Verwendete Elektromotoren /5-7/*

Bezeichnung	65060-9167AH	FS - 390PH	FF - 130SH	RS - 550PF	38ZYT	IG420014 25271R
Hersteller	Johnson Electric	Mabuchi Motor Co. Ltd.	Mabuchi Motor Co. Ltd.	Mabuchi Motor Co. Ltd.	Ningbo Leison Motor Co. Ltd	Tru Components
Bauart	DC-Motor	DC-Motor	DC-Motor	DC-Motor	DC-Motor	DC-Getriebemotor (i=1:14)
Nenn Drehzahl [1/min]	5400	11.330	6060	15.000	2800	420
Spannung [V]	13,6	12	6	12	24	24
Stromstärke [mA]	170	2650	230	900	600	< 2100
Leistung [W]	n.a.	21,6	0,76	n.a.	9	34,7
Durchmesser [mm]	37	28,5	20,5	37	38	45

Die Motoren 65060 und 38ZYT übertreffen die notwendigen Leistungsanforderungen ebenfalls, jedoch erst mit Erreichen üblicher Betriebsdrehzahlen von Asynchronmaschinen. Der Motor 65060 erreicht die erforderliche Leistung bei etwa 2500 U/min, während der Motor 38ZYT diese bereits ab 1300 U/min erreicht. Demnach sind diese Motoren ab den entsprechenden Drehzahlen in der Lage die erforderliche Leistung kontinuierlich zu liefern. Als kritisch erweist sich der Drehzahlbereich unter 1300 U/min. Für diesen Bereich liefert keiner der Motoren ohne Getriebe genug Leistung, um eine kontinuierliche Stromversorgung sicherstellen zu können.

Da die Sensoren und zugehörigen elektronischen Bauteile allerdings häufig nicht durchgehend mit der genannten Leistung versorgt werden müssen, können über zusätzliche Speicher die zeitweise notwendigen Leistungen bereitgehalten und von weniger leistungsfähigen Generatoren über längere Ladezeiten gesammelt werden. Diese Vorgehensweise mit einem zusätzlichen Ladungsspeicher ist auch sinnvoll einsetzbar, wenn Maschinen mit deutlich unterschiedlichen Drehzahlen betrieben werden oder auch bereits während eines Anfahrvorgangs eine Datenaufnahme und -übertragung sichergestellt werden soll.

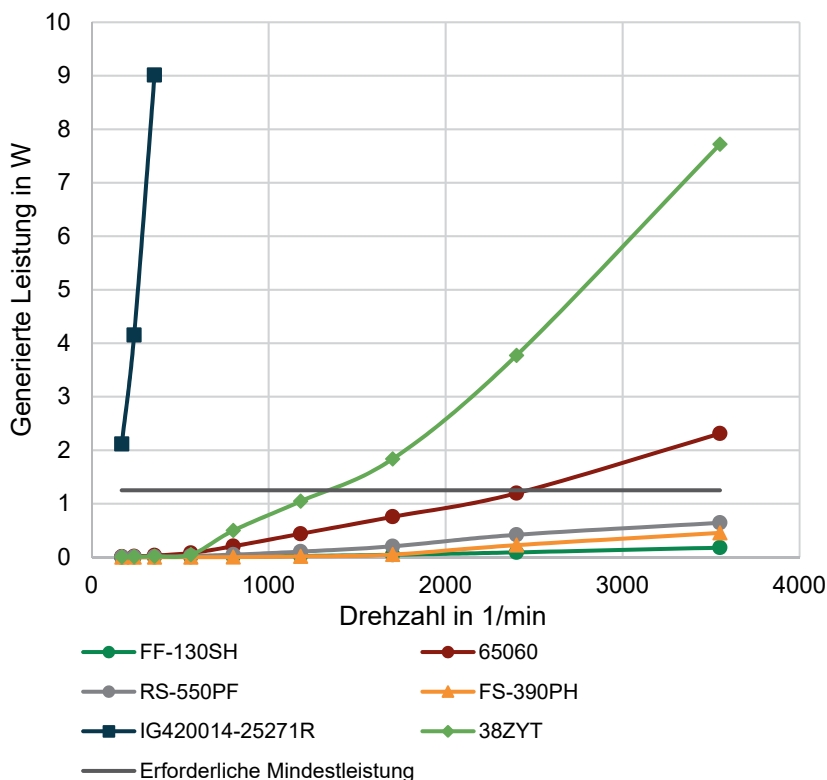


Abbildung 2: Generierte Leistung in Abhängigkeit von der Drehzahl für verschiedene Motoren sowie erforderliche Mindestleistung

Zusammenfassung

Für diese Betrachtung wurden Voruntersuchungen zur Leistungsabgabe von permanenterregten DC-Motoren im Generatorbetrieb durchgeführt. Generell zeigt sich, dass die untersuchten Motoren ab 1300 U/min (38ZYT) beziehungsweise ab 2500 U/min (65060) die zum Betrieb der Wirbelstromspule erforderliche Leistung kontinuierlich bereitstellen können. Dies ermöglicht einen dauerhaften Sensor- und Übertragungsbetrieb ab den jeweiligen Drehzahlen. Unterhalb dieser Grenzdrehzahlen könnte ein Akku verwendet werden, der im Betrieb geladen werden muss und nur bei Bedarf die benötigte Leistung abgeben kann. Ein Dauerbetrieb unterhalb von 1300 U/min ist ausschließlich mit dem untersuchten Getriebemotor möglich, jedoch nur in einem begrenzten Drehzahlbereich und verbunden mit weiteren Einschränkungen. Dazu zählen unter anderem die große

erforderliche träge Masse zur Fixierung der Rotorwelle sowie die Dimensionen des Getriebemotors selbst.

Im weiteren Vorgehen sind Versuche in einer rotierenden Welle geplant, die Aufschluss zu den notwendigen trägen Massen und deren Verhalten bei instationärem Betrieb geben sollen. Daneben wird untersucht, inwiefern Thermoelemente und Piezoelemente zur Erzeugung elektrischer Leistung in rotierenden Antriebselementen genutzt werden können. Eine denkbare Lösung könnten Thermoelemente im Anfahrbetrieb sein, der meist durch deutliche Temperaturgradienten gekennzeichnet ist, die im stationären Betrieb dann durch Generatoren abgelöst werden. Weitere Kombinationen von verschiedenen Energy Harvesting Mechanismen sind ebenfalls denkbar.

Literatur

- /1/ M. Kiziroglou, E. Yeatman: 17 - Materials and techniques for energy harvesting, In Woodhead Publishing Series in Energy, Functional Materials for Sustainable Energy Applications; S. 541-572, 2012, <https://doi.org/10.1533/9780857096371.4.539>
- /2/ K. Dembowski: Energy Harvesting für die Mikroelektronik, VDE Verlag GmbH, Berlin, Offenbach, 2011, ISBN 978-3-8007-3799-4
- /3/ Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V.: Low Cost Sensors – Trendstudie Low Cost Sensors – Forschungsvorhaben Nr. 899 I, Heft 1422, 2021
- /4/ G. Schäfer: Kerbspannungen von Passverzahnungen auf Hohlwellen, in Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal, Band 41, 2017, DOI: 10.21268/20190528-16
- /5/ TRU Components, Datenblatt Gleichstrom-Getriebemotor IG420014-25271R, <https://asset.conrad.com/media10/add/160267/c1/-/en/001601533DS00/datenblatt-1601536-tru-components-ig420014-25271r-gleichstrom-getriebemotor-24-v-2100-ma-0529559-nm-420-umin-wellen-durchmesser-8-mm.pdf>, abgerufen am 04.12.2023
- /6/ Ningbo Leison Motor Co. Ltd, Datenblatt DC-Motor 38ZYT, https://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/X200/DATASHEET38ZYT_A.pdf, abgerufen am 04.12.2023
- /7/ Mabuchi Motor Co. Ltd., Datenblatt FF-130SH-14230, <https://product.mabuchi-motor.com/detail.html?id=25>, abgerufen am 04.12.2023