

FAULHABER Tutorial

# Umsetzung des Redundanzprinzips in einem Miniatur-Schrittmotor



# Umsetzung des Redundanzprinzips in einem Miniatur-Schrittmotor

---

Einige der jüngeren Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Elektromotorantriebe für kritische Anwendungen (beispielsweise in der Luft- und Raumfahrt und in Kernkraftwerken) konzentrieren sich auf die Betrachtung verschiedener fehlertoleranter Motor- und Antriebstopologien.

Der vorliegende Artikel diskutiert zunächst verschiedene Lösungen und geht anschließend näher auf die Konstruktion eines miniaturisierten PM-Schrittmotors ein, der in diese fehlertolerante Kategorie fällt, da er eine erhöhte Redundanz bietet.

Sicherheitskritischen Systemen kommt in der industriellen Welt eine immer größere Bedeutung zu. Einige Beispiele für solche Systeme sind Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt, im Transportwesen, in der Medizin, in der Militärtechnik und in Kernkraftwerken. In allen diesen Anwendungen sind etliche Elektromotorantriebe installiert, was letztlich dazu führt, dass die fehlerfreie Funktion der Anlagen stark von diesen Antrieben abhängt. Jede Fehlfunktion dieser Antriebe kann katastrophale Störfälle in den Anlagen auslösen, die im Hinblick auf personelle Ressourcen und Kapitalkosten sehr kostspielig sein können und offensichtlich nicht wünschenswert sind. Die Techniken, die den meisten heute auf dem Markt befindlichen Elektroantrieben zugrunde liegen, sind für sicherheitskritische Anwendungen nicht geeignet. Daher besteht Handlungsbedarf, was die Verbesserung der Überlebensfähigkeit kritischer Systeme betrifft, wenn man die zunehmende Abhängigkeit von diesen Antrieben und die schwerwiegenden Folgen ihres Ausfalls berücksichtigt. Zu den gängigen Hilfsmitteln bei der Entwicklung von sicherheitskritischen Systemen gehört das Prinzip der Redundanz. Im Idealfall sollten viele fehlertolerante Systeme alle Betriebsabläufe widerspiegeln, d.h. jeder Betriebsablauf sollte auf zwei oder mehr doppelt vorhandenen Systemen ausgeführt werden, so dass beim Ausfall eines Systems das andere seine Funktion übernehmen kann. Redundanz innerhalb des Systems ist also ein wichtiger Aspekt.

## Was ist ein fehlertoleranter Motor?

Ein fehlertoleranter Motor ist unter anderem durch folgende Spezifikationen gekennzeichnet:

- Erhöhte Redundanz durch Einsatz identischer Motorsegmente auf derselben Welle.
- Elektrisch isolierte Phasen zur Vermeidung von Phase-zu-Phase-Kurzschlüssen.
- Magnetisch entkoppelte Wicklungen zur Vermeidung von Leistungsverlusten im Fall eines Ausfalls der anderen Phasen.
- Physisch voneinander getrennte Phasen zur Vermeidung einer Fehlerfortpflanzung in die benachbarten Phasen und zur Erhöhung der Wärmeisolation.

## Welche Lösungen bieten sich an?

Was einem normalerweise zuerst einfallen wird, ist die Lösung, zwei Motoren auf derselben Welle miteinander zu koppeln (Abbildung 1). Diese Lösung lässt sich zwar unkompliziert umsetzen, weist aber einige Einschränkungen auf, die zu beachten sind:

- Sie kostet ungefähr doppelt so viel wie das nicht fehlertolerante System.
- Der Antriebsmotor muss das Reibungsmoment und die Rastkräfte des leerlaufenden Motors ausgleichen, während er zusätzlich Eisenverluste in Letzteren induziert, was den Gesamtwirkungsgrad des Systems herabsetzt.
- Es entstehen unkalkulierbare Resonanzfrequenzen, die den ordnungsgemäßen Betrieb des Systems erheblich beeinträchtigen können.
- Die Lösung erfüllt nicht alle Anforderungen, die von der Luft- und Raumfahrtindustrie in Bezug auf kompakte Bauweise und geringes Gewicht gestellt werden.

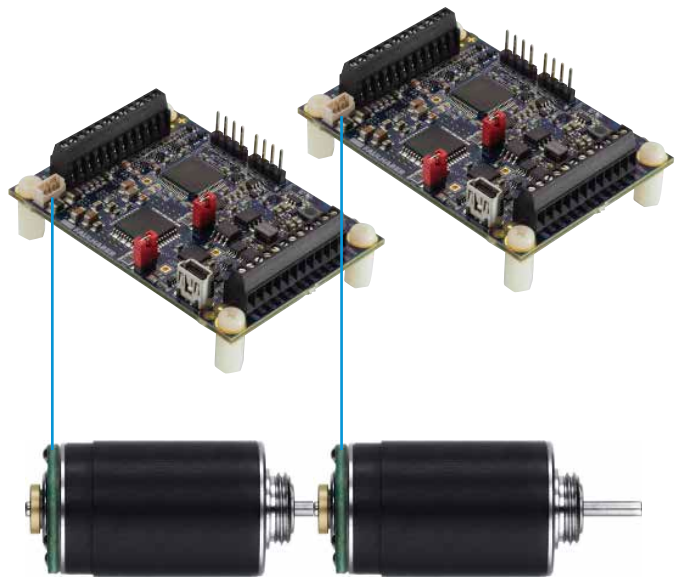
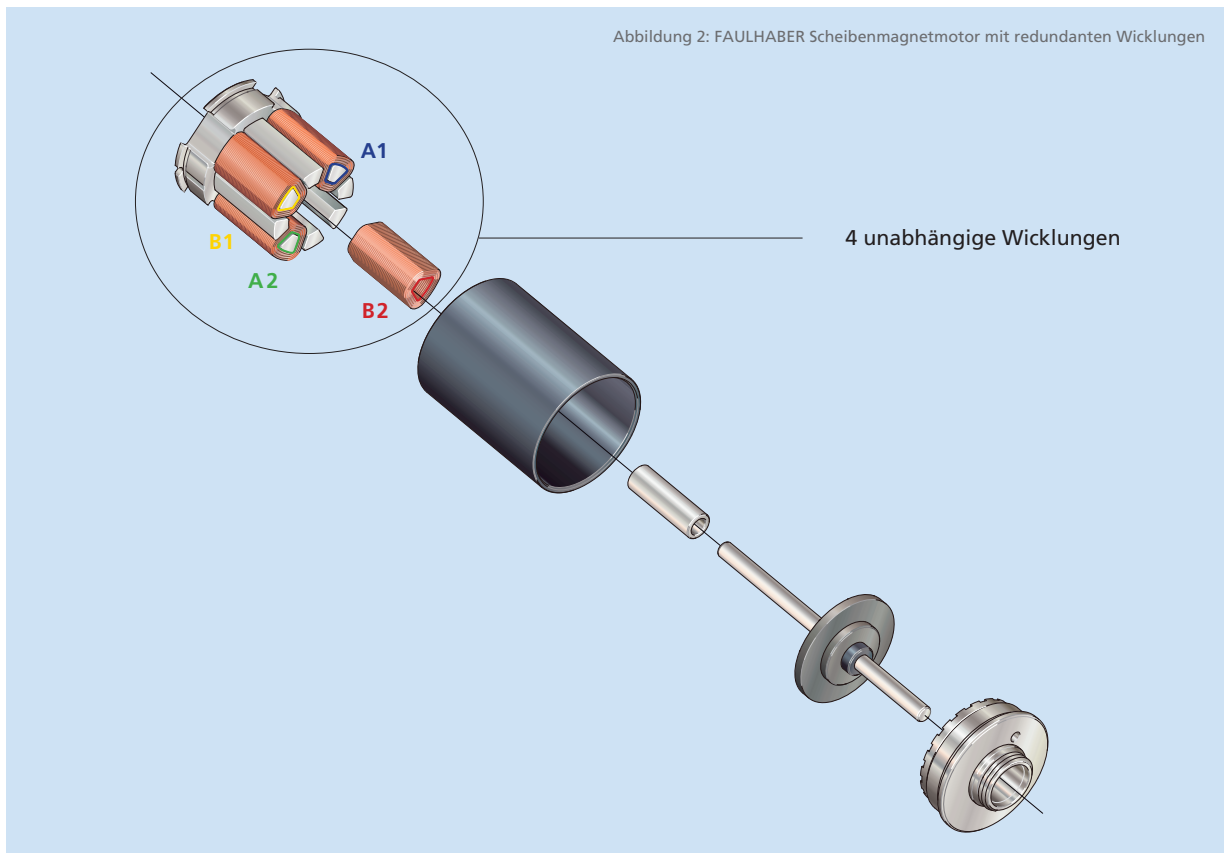


Abbildung 1: Zwei auf derselben Welle gekoppelte Motoren



Beide Konzepte gewährleisten jedoch keine optimale Wärmeisolation, und ein Ausfall einer Phase kann auf die Phase daneben übergreifen. Insgesamt erfordern diese Lösungsansätze bedeutende Modifikationen an der Motorkonstruktion und erfüllen nicht exakt die vorgenannte Spezifikation für einen fehlertoleranten Motor.

Die Verfügbarkeit der FAULHABER Scheibenmagnetmotoren vereinfacht die Suche nach Redundanzfähigkeit. Dieses patentierte Motordesign weist standardmäßig vier Wicklungen auf, die normalerweise paarweise miteinander verbunden sind und einen Zweiphasen-Schrittmotor bilden. In einer kundenspezifischen Lösung, bei der die vier Wicklungen voneinander unabhängig gelassen werden, entstehen zwei Zweiphasen-PM-Schrittmotoren mit physisch und elektrisch isolierten Phasen. Sie bilden den Schlüssel für ein ausfallfreies System (Abbildung 2).

Die Wicklungen sind nur zum Teil magnetisch gekoppelt, und die redundante Konfiguration führt zu einer Drehmomentreduzierung von nur 30%, verglichen

mit der Standard-Motorkonfiguration bei äquivalenter Verlustleistung. Mit einer geeigneten Wärmesenke und einer Phasenstromerhöhung ist dasselbe Ausgangsdrehmoment erreichbar.

## Fazit

Die konkrete und patentierte Konstruktion einiger bestehender kleiner Miniaturmotoren (bis herab zu  $\varnothing 6$  mm) erfüllt mit sehr geringfügigen Anpassungen die Spezifikationen für einen fehlertoleranten, robusten und zuverlässigen Motor mit dem Maß an Redundanz, das in sicherheitskritischen Anwendungen entscheidend ist, die auf einen störungsfreien Betrieb von Elektromotorantrieben angewiesen sind.

### Literaturnachweis:

*Fault Tolerant Motor Drive System with Redundancy for Critical Applications*  
N. Ertugrul, W. Soong, G. Dostal and D. Saxon.  
The University of Adelaide