

Dr. Ing. Michael Schwarz

Sensorlose BLDC-Regelung



ITK Engineering AG
Luitpoldstraße 59
76863 Herxheim
Tel.: +49 7276 9885-600
Fax: +49 7276 9885-619
mailto:info@itk-engineering.de
<http://www.itk-engineering.de>



Bürstenlose Gleichstrommotoren sind effizient, verschleißarm und speziell für hohe Drehzahlen gut geeignet. Preiswerter werden sie, wenn die Sensorik durch Software ersetzt wird.

Sensorlose BLDC-Regelung

In der Medizintechnik, beispielsweise im Dentalbereich, gewinnen bürstenlose Gleichstrommotoren zunehmend an Bedeutung. Beim bisher hauptsächlich eingesetzten klassischen Gleichstrommotor (DC-Motor) besteht der Rotor aus einem Elektromagneten und der Stator aus einem Permanentmagneten. Der Rotor wird über Schleifkontakte mit Strom versorgt, die einem ständigen Abrieb unterworfen sind. Bei hohen Drehzahlen tritt verstärkt Bürstenfeuer auf, was zu schnellem Verschleiß führt. Um einer Zerstörung des Motors durch defekte Schleifkontakte vorzubeugen, ist daher eine regelmäßige Wartung erforderlich.

Der bürstenlose Gleichstrommotor (BLDC) ist umgekehrt aufgebaut: Der Rotor ist ein Permanentmagnet, und der Stator besteht aus Elektromagneten. Diese erzeugen ein rotierendes Magnetfeld, das den Rotor nachzieht. Da keine rotierenden Bauteile mit Strom versorgt werden müssen, entfällt die verschleißbehaftete mechanische Kommutierung. Zudem können durch die Anbringung der Motorwicklungen im Stator höhere Leistungsdichten und damit größere Drehmomente bei gleicher Bauform erzielt werden.

Ein sicherer und effizienter Betrieb eines BLDCs erfordert jedoch eine aufwändigere Regelung als ein klassischer DC-Motor: Das rotierende Stator-

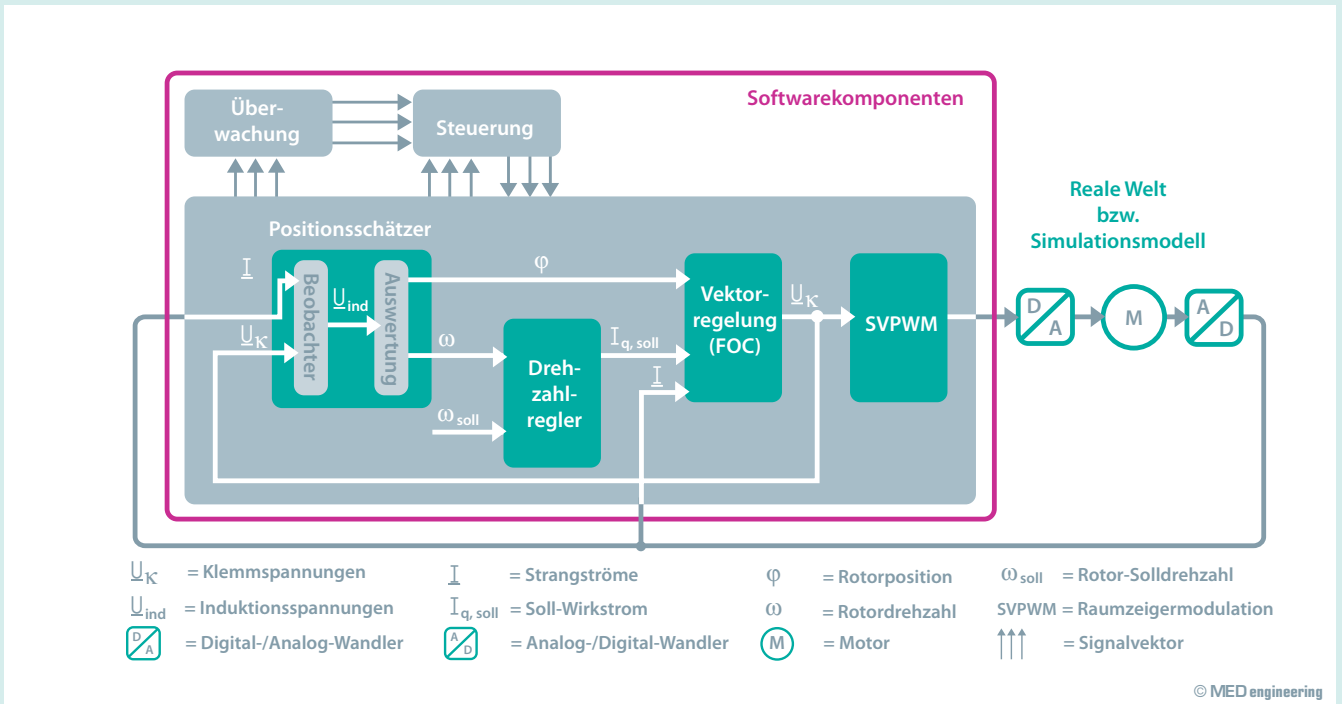
magnetfeld muss kontinuierlich an die aktuelle Belastung des Motors angepasst werden. Ein zu starkes Magnetfeld führt zu einem schlechteren Wirkungsgrad und einer stärkeren Erwärmung des Motors. Umgekehrt darf das Magnetfeld jedoch nicht zu schwach werden, da der Motor sonst dem Lastmoment nicht standhält und bis zum Stillstand abgebremst wird. Neben der Stärke des Magnetfelds ist auch dessen Ausrichtung entscheidend: Es muss dem Rotor stets im richtigen Winkel vorausziehen, um diesen optimal nachziehen zu können. Bei Dentalmotoren stellen die Abdeckung eines weiten Drehzahlbereichs und das Auftreten sehr dynamischer Belastungen hohe Anforderungen an die Regelung.

Ausgeklügelte Regelung der BLDCs

Ein mögliches Reglerkonzept, das diesen Anforderungen gerecht werden kann, stellt die feldorientierte Regelung (FOC, Field Oriented Control) oder auch Vektorregelung dar. Dabei werden die elektrischen Motorgleichungen in ein rotorfestes Koordinatensystem transformiert. In diesem System kann das Statormagnetfeld in eine drehmomentbildende Wirkkomponente, die senkrecht zum Rotor steht, und eine Blindkomponente, parallel zum Rotor, zerlegt wer-

KONTAKT

ITK Engineering AG
76863 Herxheim
Tel. +49 (0)7276 9885-600
Fax +49 (0)7276 9885-619
www.itk-engineering.de



1 Struktur des BLDC-Reglersystems

den. Die Blindkomponente verursacht höhere Stromflüsse und damit eine stärkere Erwärmung des Motors, ohne zum Drehmoment beizutragen, und wird daher zu null geregelt. Die Wirkkomponente wird mithilfe eines überlagerten Drehzahlreglers so angepasst, dass der Motor ausreichend Drehmoment aufbringt, um die geforderte Drehzahl zu halten beziehungsweise einem vorgegebenen Geschwindigkeitsprofil zu folgen (**Bild 1**). Die unabhängige Regelung von Wirk- und Blindkomponente macht die feldorientierte Regelung zu einem leistungsfähigen Ansatz. Sie führt dazu, dass Feldstärke und Ausrichtung des Statormagnetfelds zu jedem Zeitpunkt optimal an die Rotorausrichtung und Belastung angepasst sind und somit der Wirkungsgrad des Motors maximiert wird. Für die Transformation in das Koordinatensystem des Rotors sind präzise Informationen über die aktuelle Rotorposition erforderlich, die mithilfe von Sensoren bestimmt werden kann. Häufig kommen Hall-Sensoren zur Messung des Magnetfelds zum Einsatz, das Rückschlüsse auf die Rotorposition zulässt. Die Sensorik stellt jedoch in Verbindung mit der für die Auswertung des Messsignals notwendigen Elektronik einen nicht zu vernachlässigenden Kostenfaktor dar. Ein Verzicht auf den empfindlichen Sensor führt damit zu einer deutlichen Kostenreduktion und vereinfacht zusätzlich das Sterilisieren des Motors.

Beauftragt von einem Dentalproduktehersteller, hat ITK Engineering den Sensor durch Software ersetzt. Es galt, vorhandene Informationen zu nutzen, um Rückschlüsse auf die Rotorposition zu ziehen, und zwar so präzise, dass die Vektorregelung effizient arbeitet. Der gewählte Ansatz besteht darin, zunächst die vom Rotor in den Statorwicklungen induzierten Spannungen zu bestimmen. Durch deren Auswertung in den einzelnen Strängen kann die Position abgeleitet werden (**Bild 1**).

Die elektrischen Gleichungen des Motors werden durch die Span-

nungen an den Motorklemmen, die Ströme in den einzelnen Strängen und die vom Rotor induzierten Spannungen bestimmt. Die Klemmspannungen werden vom Regler vorgegeben, die Ströme werden kontinuierlich gemessen und können daher ebenfalls genutzt werden. Unter der Voraussetzung einer hinreichend genauen Messung lassen sich die unbekannt induzierten Spannungen mithilfe eines Zustandsbeobachters bestimmen. Hierbei handelt es sich um ein Schätzverfahren, das unter Nutzung von Systemdynamikkenntnissen die gesuchte Information, in diesem Fall die Induktionsspannung, ermittelt. Im Beobachter ist das dynamische Verhalten des Motors in Form von Differenzialgleichungen als Modell abgebildet. Dem Motor und dem Modell werden dieselben Klemmspannungen vorgegeben. Da die induzierten Spannungen unbekannt sind, fließen im Modell zunächst nicht dieselben Ströme wie in der Realität. Durch Rückkopplung der Differenz auf das Modell kann die Abweichung ausgeregelt werden, sodass sich das simulierte Verhalten schnell an das tatsächliche anpasst. Sobald die simulierten Motorströme nur noch geringfügig von den gemessenen abweichen, lassen sich auch die Induktionsspannungen aus dem mathematischen Abbild des Motors als Schätzwert mit hoher Genauigkeit ablesen.

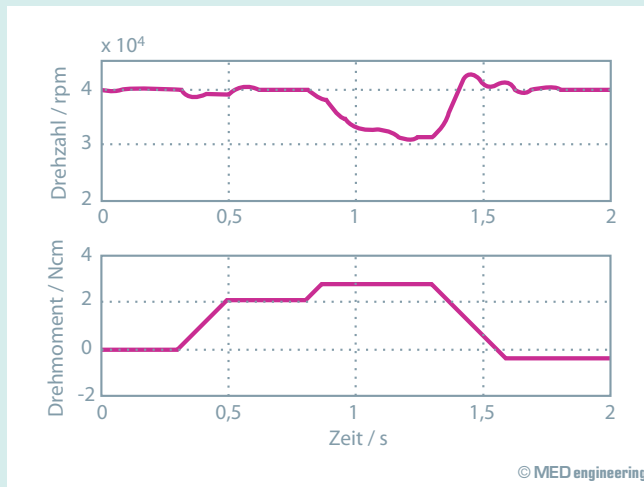
Der Zustandsbeobachter liefert erst ab einer gewissen Mindest-drehzahl ein gültiges Positionssignal, da die Amplitude der induzierten Spannung linear von der Drehzahl abhängt. Bei niedrigen Drehzahlen ist die Amplitude so gering, dass das abgeleitete Positionssignal aufgrund der rauschbehafteten Messung stark fehlerbehaftet ist. Der Motor wird daher im Steuerungsbetrieb ohne Positionsinformation auf die erforderliche Drehzahl von 2000 U/min beschleunigt, um dann ruckfrei in den geregelten Betrieb umzu-

Verzicht auf Sensorik reduziert die Kosten

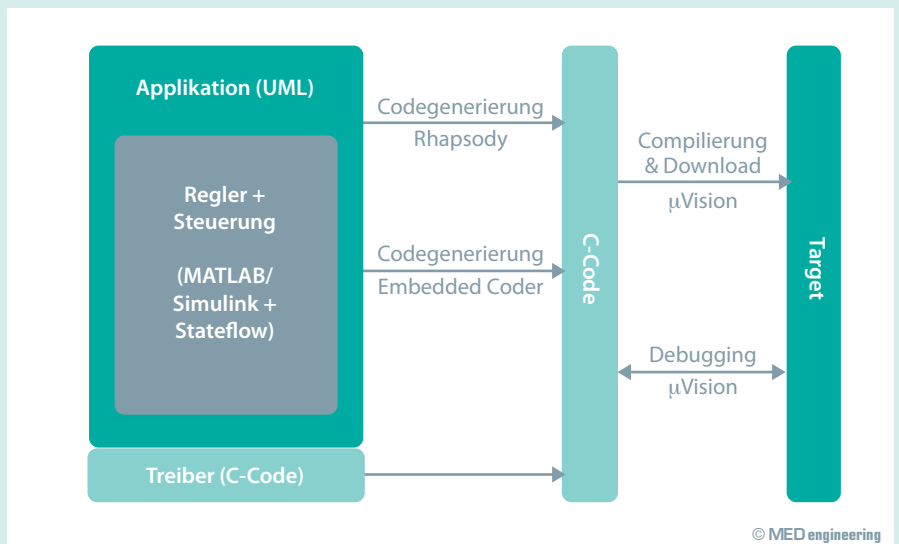
schalten. Ab dieser Drehzahl ist ein stabiler kontinuierlicher Betrieb mit vollem Drehmoment möglich.

Die Drehzahl-Drehmomentcharakteristik von BLDCs lässt sich in zwei Abschnitte unterteilen: Für niedrige Drehzahlen ist das maximale Drehmoment aufgrund des begrenzten Stroms konstant, bei hohen Drehzahlen fällt es aufgrund der begrenzten Klemmenspannung annähernd linear ab. Um der Last im oberen Drehzahlbereich dennoch standhalten zu können, wird bei einer hohen Drehmomentanforderung die Soll-drehzahl gezielt abgesenkt. Wird die Last verringert, beschleunigt der Motor wieder auf die vom Benutzer vorgegebene Drehzahl (Bild 2). Durch die Verlangsamung des Motors und das dadurch veränderte Motorgeräusch erhält der Benutzer eine akustische Rückmeldung, dass die Belastungsgrenze erreicht ist. Im unteren Drehzahlbereich ist dies zunächst nicht der Fall: Ohne weitere Absicherungsmaßnahme würde der Motor bis zum Erreichen des maximalen Drehmoments die gewünschte Drehzahl halten und bei einer Überschreitung abrupt stoppen. Um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten, wird daher das akustische Feedback durch eine künstliche Verringerung der Drehzahl nahe der Belastungsgrenze aufgeprägt.

Die Ansteuerung des Motors erfolgt mithilfe von Leistungstransistoren. Da das Prinzip des BLDCs dem einer Synchronmaschine, also eines Drehstrommotors, entspricht, müssten die drei Stränge mit phasenverschobenen sinusförmigen Spannungen versorgt werden. Da der BLDC jedoch von einer Gleichspannungsquelle gespeist wird, ist die Erzeugung sinusförmiger Spannungen mit variabler Frequenz und Phasenlage aufwändig. In der Praxis werden die gewünschten Verläufe der Klemmenspannungen daher über eine Pulsweitenmodulation angenähert. Das heißt, die Leistungstransistoren werden in schneller Folge so ein- und ausgeschaltet, dass Spannungspulse unterschiedlicher Breite entstehen, die im zeitlichen Mittel den gewünschten Verlauf ergeben. Die Induktivitäten und Widerstände des Motors bewirken eine Trägheit beim Auf- und Abbau des Stroms, die zu einem annähernd sinusförmigen Verlauf führt. Zur Erzeugung einer dreiphasigen Pulsweitenmodulation eignet sich insbesondere die Raumzeigermodulation (Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM)): Anstatt die gewünschten Spannungsverläufe in den drei Phasen einzeln durch



2 Simulation eines hohen Lastmoments bei Maximaldrehzahl: Bei einem Lastmoment von 2 Ncm kann die maximale Drehzahl von 40 000 rpm gehalten werden. Eine weitere Erhöhung der Last bewirkt eine gezielte Drehzahlsenkung, um das Motormoment zu maximieren. Nach Wegnahme der Last wird die ursprüngliche Drehzahl wieder eingeregelt.



3 Vom Modell zum Target: die Toolkette zur Generierung des Codes für den Mikrocontroller

Pulsweitenmodulation zu generieren, werden Sequenzen von Spannungsvektoren aufgeschaltet. Mit dieser Methode können größere Stromamplituden bei gleicher Versorgungsspannung generiert werden.

Das Gesamtsystem, bestehend aus Positionsschätzer, Regler und Raumzeigermodulation, wird von einer Überwachungseinheit kontinuierlich geprüft und von einer Zustandsmaschine gesteuert (Bild 1). Die Überwachung ermöglicht unter anderem das automatische Abschalten des Systems bei Blockade. Für den Entwurf des Systems wurde ein Simulationsmodell des



MD110179
www.med-eng.de

► Motors mit MATLAB/Simulink erstellt und mit den Motorparametern Stranginduktivität, Strangwiderstand, Motorkennlinie und Trägheitsmoment initialisiert. Das Modell berücksichtigt Eingangsgrößen wie den Lastmomentverlauf, Messfehler durch Rauschen und Quantisierung sowie Anfangsbedingungen wie die initiale Lage des Rotors. Durch den hohen Detaillierungsgrad können viele Effekte reproduziert werden, die auch in der Realität beobachtet werden, beispielsweise eine kurzzeitige Rückwärtsbewegung

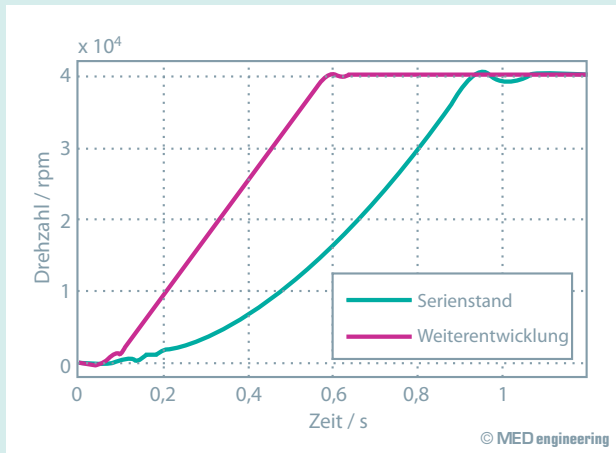
Bild 3 zeigt den modularen Aufbau der Software und die Toolkette zur Codegenerierung für den Mikrocontroller: Das Reglersystem, bestehend aus dem Regler selbst und der zugehörigen Steuerung, wurde in MATLAB/Simulink beziehungsweise Stateflow umgesetzt und ist in eine Applikation eingebettet, die in UML modelliert wurde. Aus den modellbasierten Softwarekomponenten wurde mit

Optimierung per Simulation

Rhapsody beziehungsweise MATLAB Embedded Coder ein C-Code generiert, hardwarenahe Komponenten wurden direkt in C implementiert.

Die Reglersoftware wird auf einem Cortex-M3-Mikrocontroller mit einem Taskzyklus von 100 µs ausgeführt. Da dieser Mikrocontroller-Typ keine Fließkommaeinheit besitzt, wurde der Algorithmus vollständig in Festkomma-Arithmetik implementiert. Auch hier ergaben sich durch den modellbasierten Ansatz Vorteile, da die Entwicklungsumgebung weitreichende Unterstützung bei der Umsetzung der Rechenoperationen bietet. Die Simulation kann wahlweise in Fließ- oder Festkomma-Arithmetik erfolgen, was die Fehlersuche deutlich vereinfacht und die Möglichkeit bietet, Änderungen schnell zu testen, ohne die Beschränkungen der Festkommazahlen zu berücksichtigen.

Mit dem vorgestellten Konzept wurden die Anforderungen an die Regelung übertroffen. Der geregelte Motor überzeugt mit hervorragender Laufkultur, einem weiten Drehzahlbereich und hoher Belastbarkeit. Im spezifizierten Drehzahlbereich von 2000 bis



4 Simulierter Hochlauf: Mit der Seriensoftware wird die Maximaldrehzahl nach zirka 0,9 Sekunden erreicht, mit dem aktuellen Entwicklungsstand gelingt dies bereits nach 0,6 Sekunden

des Rotors beim Anlauf, der von der Ausrichtung des Rotors zum Statormagnetfeld abhängt. Der Einsatz eines realitätsnahen Simulationsmodells (Model-in-the-Loop, MiL) bietet den Vorteil, dass die Regelung ohne real vorhandene Strecke entwickelt werden kann. Die Auswirkungen von Änderungen und Optimierungen des Regleralgorithmus können sofort anhand der Simulation überprüft werden. Darüber hinaus vereinfacht der modellbasierte Ansatz die Fehleranalyse durch die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und die Möglichkeit, beliebige Signale aus dem Simulationsmodell und dem Reglersystem zu visualisieren. Durch die Automatisierbarkeit von Parameterstudien und Tests wird die Entwicklungszeit erheblich verkürzt.

40 000 U/min ist das Verhalten mit dem eines Sensormotors vergleichbar, wobei der sensorlose Motor und die Ansteuerelektronik kostengünstiger und robuster sind. Aktuell arbeitet ITK Engineering an einer Erweiterung des Verfahrens zur Positionsschätzung. Diese wird einen stabilen Betrieb im Drehzahlbereich ab zirka 200 U/min und ein deutlich schnelleres Beschleunigen aus dem Stillstand ermöglichen (**Bild 4**). ■



DR.-ING. MICHAEL SCHWARZ
ist Entwickler für medizintechnische Software bei ITK Engineering in Herxheim.
michael.schwarz@itk-engineering.de

Professionelles Software & Systems Engineering

Finden Sie in uns einen Partner, auf den Sie sich verlassen können. Denn wir entwickeln nicht nur innovative Lösungen für Sie, sondern übernehmen auch Verantwortung. Unser starkes Team ist für Sie da, wenn es z.B. um die Entwicklung von Embedded Echtzeitsystemen, Desktop- oder Webapplikationen geht.

**ITK Engineering AG – Ihr zuverlässiger ISO 13485 zertifizierter
Entwicklungspartner für:**

- Software-Entwicklung nach IEC 62304
- User Interfaces
- Modellbasierte Software-Entwicklung
- Rapid-Control-Prototyping: Regler- und Algorithmenentwurf
- Virtuelle Absicherung: MiL, SiL, HiL
- Testautomatisierung
- Mock-Up
- Systemintegration und Produktpflege

www.itk-engineering.de

