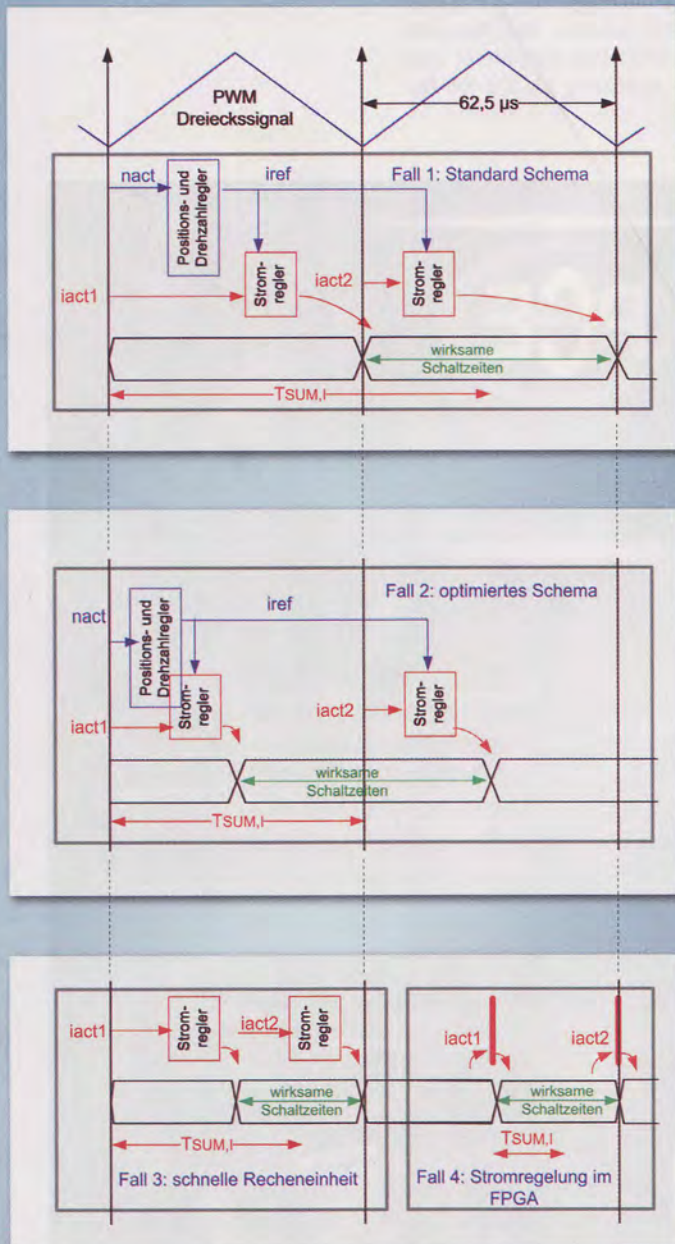


# Theoretisch und praktisch erreichbare Regelgüte von Servoantrieben

## Teil 3: Einflussgrößen für die erzielbare Bandbreite

Stephan Beineke, Alexander Bähr, Joachim Böcker



13: Rechenschema für Drehzahlregelung, Stromregelung und Ausgabe der Schaltzeiten an die PWM.

Fall 1: Standard-Rechenschema

Fall 2: Minimierung der Totzeiten bei gleicher Recherauslastung

Fall 3: Minimierung der Totzeiten bei sehr schneller Recheneinheit

Fall 4: Realisierung im FPGA

Die Regelungsqualität eines Servoreglers wird häufig anhand von Kennwerten beurteilt. Von Kundenseite werden diese Kennwerte als Gütekriterien aufgegriffen, obwohl sie für den Anwender aus dem Maschinenbau nur unter idealen Voraussetzungen Aussagekraft haben. Im ersten und zweiten Teil wurden als Kennwerte die Bandbreiten von Strom- und Drehzahlregelkreisen gezeigt, wie sie sich unter idealen Bedingungen erreichen lassen. Die realen Verhältnisse an einer Produktionsmaschine oder Anlage sind allerdings wesentlich komplexer, womit sich nun dieser dritte und letzte Teil des Beitrags befasst.

### 1 Schaltfrequenzen und Rechenschema für Drehzahl- und Stromregelkreis

Im Grundlagenteil ist bereits hergeleitet worden, dass die Bandbreite des Stromreglers umgekehrt proportional zur unterlagerten effektiven Totzeit ist. Die effektive Totzeit ergibt sich als Zeitspanne zwischen dem Erfassen der Istgröße (Strom) und der Mitte des Zeitintervalls, in dem die ausgegebenen pulsbreitenmodulierten Spannungen als Stellgröße wirken („Wirkungsschwerpunkt“). Aufgrund der Synchronisation von Reglerabtastung und Pulsweitenmodulation wird diese Totzeit im Wesentlichen durch die Schaltfrequenz  $f_s$  der Endstufe bestimmt, deren Maximalwert sich durch die eingesetzten Leistungshalbleiter (IGBTs) und Schaltungstopologien ergibt. Höhere Schaltfrequenzen sind prinzipiell realisierbar, müssen dann allerdings teuer erkaufte werden, da z. B. eine Schaltfrequenz von 16 kHz immer mit einem Derating der Endstufenleistung einhergeht. Verstärkend kommt hinzu, dass die Halbleiter-Hersteller die IGBTs zunehmend auf Durchlassverluste und weniger auf die Schaltverluste optimieren, so dass viele Hersteller von Antriebsreglern den Nennstrom bereits bei einer Schaltfrequenz von 4 oder 5 kHz angeben. Nur sehr spezielle, aber deutlich teurere Endstufentopologien lassen höhere Schaltfrequenzen zu. So gelingt es z. B.

Dr.-Ing. Stephan Beineke ist Entwicklungsleiter bei der LTI Drives GmbH in Lahnu.

Dr.-Ing. Alexander Bähr ist Gruppenleiter Regelungstechnik bei der LTI Drives GmbH in Lahnu.

Prof. Dr.-Ing. Joachim Böcker ist Leiter des Fachgebiets Leistungselektronik und elektrische Antriebstechnik an der Universität Paderborn.

mit einer Dreipunktwechselrichtertopologie, Schaltfrequenzen von 64 kHz bei einer Antriebsleistung von 30 kW zu erzielen [5][6]. Ein anderer Weg zur Erhöhung der Schaltfrequenz besteht darin, resonante Entlastungsschaltungen einzusetzen, welche durch Nullstrom bzw. Nullspannungsschalten die Schaltverluste reduzieren. Die minimalen Zykluszeiten für die Berechnung der Regelkreise ergeben sich aus der Schaltfrequenz zu

$$T_{\text{CYC,MIN}} = \frac{1}{2f_s} \quad (9)$$

Neben den Zykluszeiten für die Berechnungen, mit welchen im Marketing häufig geworben wird, haben aber auch die Reihenfolge und das Zusammenspiel mit der Messwerterfassung und der PWM, die in keinem Prospekt angegeben sind, einen entscheidenden Einfluss auf die effektive Totzeit und damit auf die erzielbare Dynamik.

Verdeutlicht wird dies in **Bild 13** an einem Beispiel mit 16 kHz Schaltfrequenz und Rechenraten von 8 kHz für Drehzahl- und Lageregler sowie 16 kHz für den Stromregler. Oben dargestellt ist der dreieckförmige Verlauf des PWM-Modulationsträgers (Carrier-Signal). Die Strommessung und die Lageerfassung erfolgen an jeder unteren Dreieckspitze, also mit einer Abtastrate von 16 kHz. Die Übernahme der PWM-Zeiten ist an jedem dieser Punkte möglich. Fall 1 stellt das in den meisten Antriebsreglern implementierte Rechenschema bei 16 kHz Schaltfrequenz dar. Zunächst werden Lage- und Drehzahlregler berechnet, so dass die Übergabe des Stromsollwertes ohne weitere Verzögerung erfolgt. Die Totzeit zwischen Abtastung des Istwertes für den Strom und der Ausgabe eines neuen PWM-Musters beträgt 62,5 µs, hinzu kommt noch die statistische Stromrichtertotzeit von 31,25 µs, da das PWM-Muster im Mittel für diese Zeitdauer anliegt. Es resultiert die effektive Totzeit  $T_{\text{sum,i}}$  zu 93,75 µs.

Wenn der Rechner in der Lage ist, alle Regelkreise einschließlich Messwerterfassung und PWM innerhalb von 31,25 µs zu berechnen, kann die Totzeit innerhalb des Stromregelkreises auf 62,5 µs verkleinert werden, ohne dabei die Totzeit im Drehzahlregelkreis zu vergrößern. Neue Antriebsregler mit schnellen Prozessoren (z. B. ServoOne) ermöglichen ein solches Rechenschema (Fall 2).

Wird der Stromregler mit 32 kHz berechnet, wobei Messwerte zu den oberen und unteren Dreiecksspitzen abgetastet und auch die PWM-Zeiten im gleichen Takt aktualisiert werden (Fall 3, links), ergibt sich eine effektive Totzeit von zirka 48 µs, im theoretischen Fall einer „unendlich schnellen“ Bearbeitung im Mikrorechner (Fall 4) kann diese sogar auf 16 µs reduziert werden, was die theoretische Grenze bei der Verwendung einer Pulsbreitenmodulation mit 16 kHz Schaltfrequenz darstellt. An Prototypen durchgeführte Untersuchungen haben gezeigt, dass sich eine solche „unendlich schnelle“ Bearbeitung bei einer Realisierung von Stromregelkreis und PWM in einem FPGA nahezu erreichen lassen [11].

Als Ergebnis dieser Betrachtungen bleibt festzuhalten, dass die theoretisch mögliche Dynamik des Reglers durch die effektive Totzeit und nicht allein durch die Rechenraten bestimmt wird. Daher ist die Angabe der effektiven Totzeit sinnvoller als die reine Angabe von Rechenzykluszeiten und sollte daher auch im Marketing Verwendung finden.

## 2 Eigenschaften des Motors

### 2.1 Sättigung und Rastdrehmomente des Motors

In der Praxis stellt der Motor kein ideales Drehmomentstellglied dar. Aufgrund der Sättigung ändern sich die Induktivitäten in Abhängigkeit des Stroms, was eine Adaption der Stromreglerverstärkungen notwendig macht, um die Bandbreite unabhängig vom aktuellen Motordrehmoment zu halten. Ohne Adaption wäre der Stromregelkreis bei kleinen Strömen recht langsam oder bei großen Strömen instabil. Die Adaption ist insbesondere bei High-Torque-Motoren oder Servomotoren mit einer konzentrierten Wick-

# MISUMI





NORM-TEILE



ZEICHNUNGS-TEILE



**Sonderlösungen spielend realisieren. Konstruktionshilfe für jeden Bedarf:**

- Konfigurierbare Komponenten in bis zu 0,01-mm-Schritten
- 1 Million Norm-, Kauf- und Zeichnungsteile. Jedes Produkt unterliegt einer 100% Kontrolle
- Lieferung ab Stückzahl 1 – zuverlässig
- Keine Mindestbestellmenge, Minder Mengen-Zuschläge oder Versandkosten
- Katalog mit allen technischen Informationen sowie Preisen, Mengenrabatten und Lieferzeiten auf einen Blick



**AUTOMATICA 2019**  
Halle B1 | Stand 210  
8. – 11.6. | München



... Precisely Meeting Your Demands

<http://mag2.misumi.de> | Tel. +49 (0) 6196-7746-0  
Fax +49 (0) 6196-7746-364 | [verkauf@misumi.de](mailto:verkauf@misumi.de)

▲ Weitere Informationen 9952920 [www.vfv1.de/#9952920](http://www.vfv1.de/#9952920)

## Elektrische Antriebe

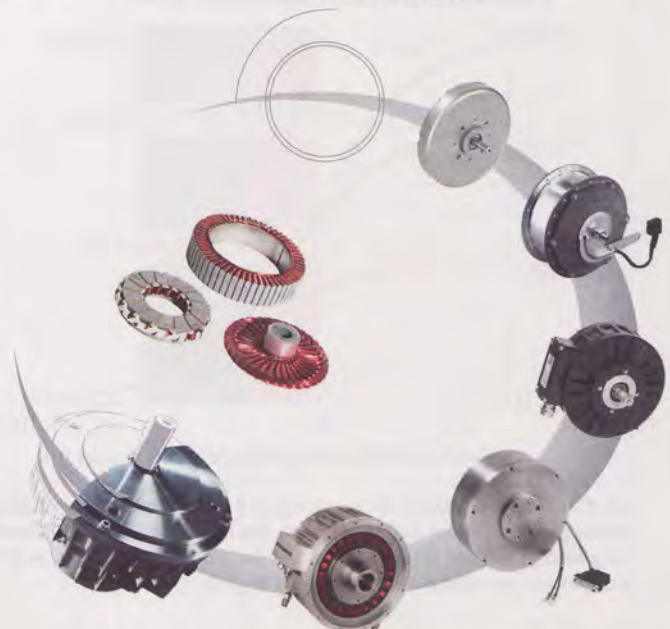


Heinzmann GmbH & Co. KG

Am Haselbach 1  
D - 79677 Schönau  
Germany  
Tel: +49 7673 8208 - 0  
Fax: +49 7673 8208 - 188  
E-Mail: [info@heinzmann.de](mailto:info@heinzmann.de)

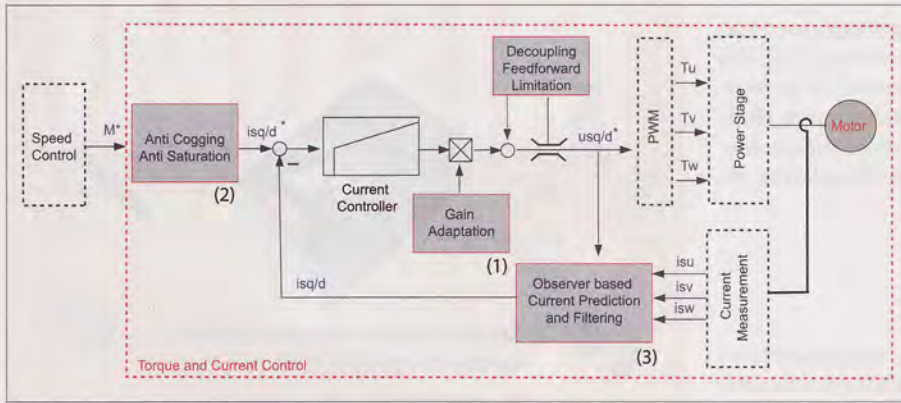
### Antrieb Ihrer Innovation

- ✓ Scheibenläufermotoren
- ✓ Radnabenmotoren
- ✓ Motoren für batteriebetriebene Fahrzeuge
- ✓ Steuerungen für elektrische Antriebe
- ✓ Hybridantrieb für industrielle Anwendungen



Weitere Informationen 11065310 [www.vfv1.de/#11065310](http://www.vfv1.de/#11065310)

[www.heinzmann.com](http://www.heinzmann.com)



14: Drehmoment- und Stromregelkreis mit Kompensationsmaßnahmen für die Unzulänglichkeiten des Motors und der Strommessung.

lung notwendig. Asymmetrien im magnetischen Kreis führen zu Rastdrehmomenten und einer nicht sinusförmigen EMK. Diese Effekte führen zu Drehmomentschwankungen, welche abhängig von der Motorstellung und dem gestellten Drehmoment sind. Im Antriebsregler sollten daher entsprechende Algorithmen zur Kompensation dieser Effekte zu Verfügung stehen [8][9]. Im Bild 14 sind entsprechende Maßnahmen wie die

- Adaption der Stromreglerverstärkungen (1),
- Kompensation von Sättigungseffekten und Rastdrehmomentkompensation bei der Drehmomentbildung (2),
- Beobachtung für die Unterdrückung von Unsymmetrien im Stromregelkreis sowie zur Filterung und Prädiktion der Stromistwerte (3)

dargestellt, wie sie im Antriebsregler ServoOne zu Verfügung stehen.

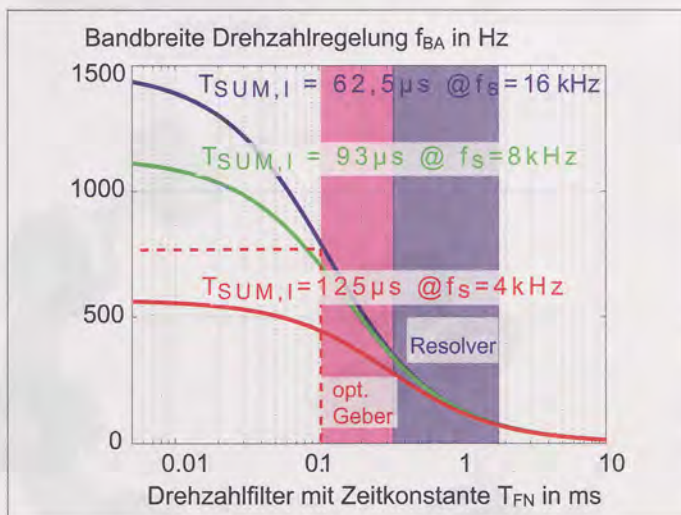
### 2.2 Stellgrößenbegrenzung in der Spannung

Schnelle Sollwertänderungen des Stromes erfordern bei hohen Reglerverstärkungen eine große Spannung als Stellgröße. Die verfügbare Spannung des Antriebs ist aber durch die Zwischenkreisspannung begrenzt und die für eine bestimmte Stromänderung notwendige Spannung ist z. B. bei einer Synchronmaschine von der Ständerinduktivität abhängig. Einer großen Sollwertänderung kann die Stromregelung somit nur folgen, wenn der Motor eine relative kleine Induktivität besitzt.

## 3 Einfluss der Messwerterfassung

### 3.1 Messwerterfassung für die Ströme

In der Praxis ist es nicht möglich, ganz ohne Filterung des Strom-



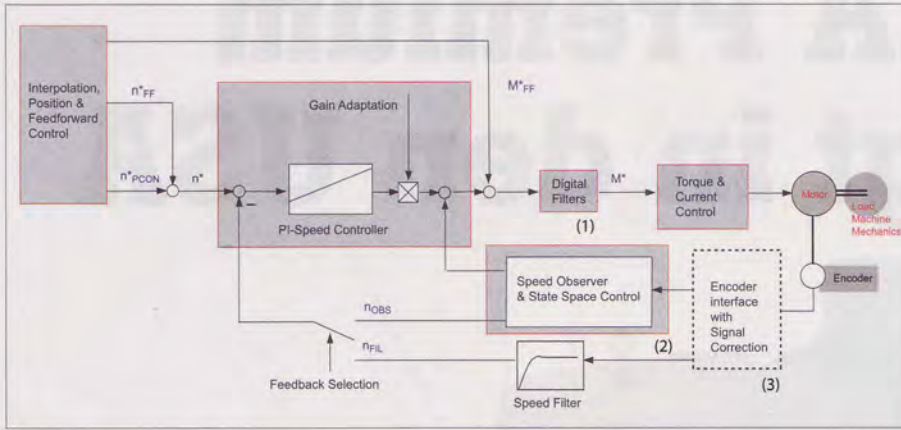
15: Bandbreite der Drehzahlregelung im Antriebsregler ServoOne in Abhängigkeit von der Zeitkonstanten des Drehzahlfilters. Die Darstellung erfolgt mit der effektiven Totzeit des Stromregelkreises, welche sich bei der jeweiligen Schaltfrequenz ergibt.

signals auszukommen. Zudem ist die A/D-Wandlung nicht beliebig schnell. Die hierdurch verursachten Phasenlaufzeiten von weniger als 10  $\mu$ s sind allerdings bei den typischen Schaltfrequenzen relativ klein und machen sich erst bei höheren Schaltfrequenzen bemerkbar. Die Stromerfassung muss in jedem Fall sehr rauscharm aufgebaut sein, damit die gemäß Gl. (1) berechnete Verstärkung auch wirklich einstellbar ist. Bei vielen Antriebsreglern führt das Messrauschen zu nicht tolerierbaren akustischen Geräuschen und zur Anregung höherer Maschinenresonanzen, so dass die theoretisch ermittelte Verstärkung in diesen Fällen deutlich reduziert werden muss. Die Aussage, dass sich die Reglerverstärkung und damit die Bandbreite im selben Maß erhöhen lässt, wie sich die effektive Totzeit verringert, ist dann nicht mehr gültig. Die Messwerterfassung für die Ströme stellt daher eine Schlüsselfunktion dar, wenn es um Antriebe mit höchsten dynamischen Anforderungen geht. Auch hier bieten sich Beobachter an, um die Messsignale durch Verwendung eines Motormodells zu verbessern [10].

### 3.2 Messwerterfassung für die Drehzahl

Bei realen Verhältnissen machen die eingesetzten Gebersysteme und die Analogelektronik eine Filterung des Drehzahlsignals notwendig, insbesondere wenn kostengünstige Komponenten eingesetzt werden. In der Regel ist es kaum möglich, ganz ohne Filtermittel im Drehzahlregelkreis auszukommen. Aufgrund des hohen Umrechnungsfaktors von der gemessenen Positionsdifferenz auf die berechnete Drehzahl, der sich bei einer Abtastrate von 8 kHz zu 480 000  $\text{min}^{-1}$  ergibt, führen auch kleinste Quantisierungsfehler oder systematische Geberfehler zu einem sehr großem Rauschen im Drehzahlsignal. Das Quantisierungsrauschen kann dabei durch ein Messwertfilter unterdrückt werden. Ist dieses als PT1-Glied ausgeführt, so liegen die üblichen Filterzeiten für ein Resolverssystem oder einen magneto-resistiven (MR) Sensor, welche typischerweise 1 bis 3 Sinusschwingungen pro Motorumdrehung liefern, im Bereich von 0,3 bis 1 ms. Hochauflösende Encoder liefern zwischen 512 bis 36 000 Sinusschwingungen, so dass typische Filterzeiten bei 0,1 bis 0,5 ms liegen.

Bild 15 zeigt den Einfluss des Drehzahlfilters auf die erreichbare Bandbreite der Drehzahlregelung für unterschiedliche Schaltfrequenzen und das Rechenschema, wie es im Antriebsregler ServoOne von LTi Drives realisiert ist. Die unterlagerte Stromregelung wurde mit  $\gamma = 0,78$  (Phasenreserve = 45°) für die im Bild angegebenen Schaltfrequenzen und die daraus resultierenden effektiven Totzeiten ausgelegt; die Drehzahlregelung wird nach dem symmetrischen Optimum mit einem Doppelverhältnis von  $\alpha = 2$  entworfen und die zusätzlich wirksamen Totzeiten im Drehzahlregelkreis betragen 62,5  $\mu$ s. Die entsprechenden Übertragungsfunktionen bei Filterzeiten von 0 und 100  $\mu$ s wurden bereits in Teil 2, Bild 9, dargestellt und diskutiert. Die durch diese Filter bedingten Phasenlaufzeiten überschreiten in der Regel die Phasenlaufzeiten aufgrund der Stromregelung, so dass die Abtastzeit der Stromregelung an Bedeutung verliert. Daher ist es wichtig, dass der Servoregler eine rauscharme Signalverarbeitung mit einer Korrektur der systematischen Fehler in der Lageerfassung zu Verfügung stellt, um die Filterzeiten klein halten zu können.



16: Struktur des Drehzahlregelkreises eines High-Performance-Servoreglers.

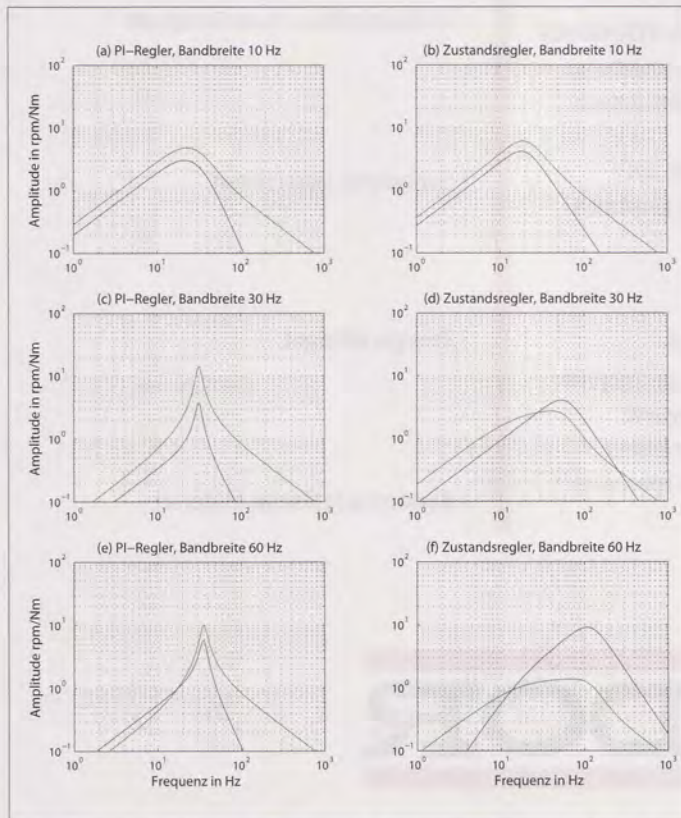
Eine weitere Möglichkeit, den „Phasenverlust“ zu verringern, besteht in dem Einsatz von Beobachtern, welche die modellierten Signalanteile ohne Phasenverzögerung bei guter Filterung des Messsignals rekonstruieren können [3]. Die Erfassung der Drehzahl stellt bei fast allen Antrieben eine der kritischsten Funktionen dar, um die geforderte Dynamik zu erreichen. Bild 16 zeigt die Struktur des Drehzahlregelkreises des ServoOne, der eine Korrektur der Geber-signale (3), eine Beobachter-basierte Drehzahlerfassung, sowie die im Folgenden diskutierte Zustandsregelung (2) ermöglicht.

#### 4 Maschinen mit schwingungsfähiger Mechanik

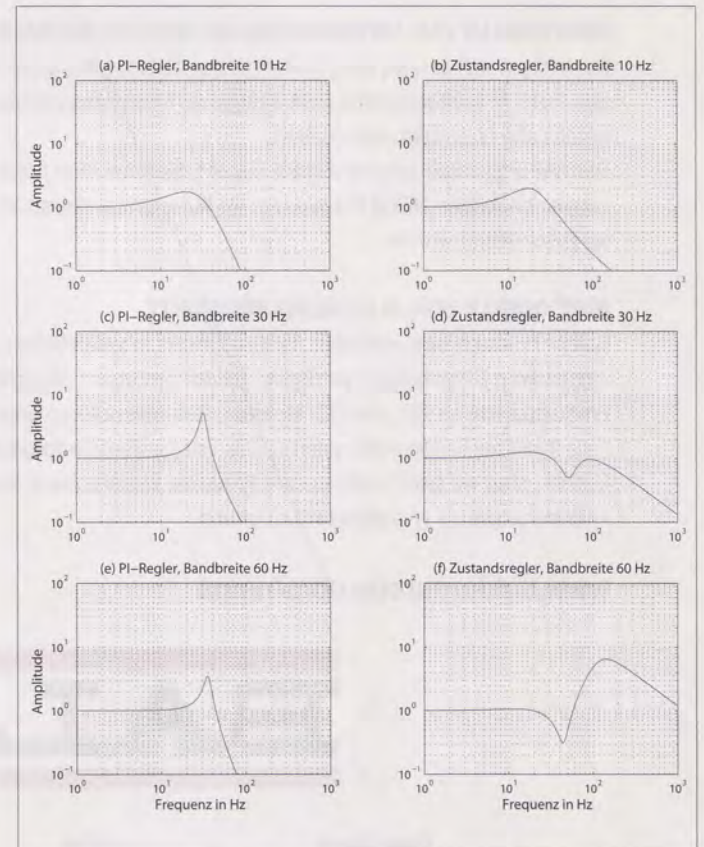
Die Mechanik einer Maschine weist in der Regel schwach gedämpfte Eigenfrequenzen auf oder sie kann nicht ideal an den Motor angekoppelt werden. In diesen Fällen richtet sich die erreichbare Bandbreite der Drehzahlregelung nach der Resonanzfrequenz des Antriebsstrangs. Mit der konventionell ausgelegten PI-Regelstruktur sind nur Bandbreiten deutlich unterhalb der Resonanzfrequenz sinnvoll; wird statt der PI-Struktur ein Zustandsregler eingesetzt [3], so kann theoretisch die Bandbreite der Regelung auch deutlich größer als die Resonanzfrequenz sein.

Die folgenden Betrachtungen beziehen sich beispielhaft auf eine Mechanik mit einer Resonanzfrequenz bei 50 Hz, wobei das Verhältnis von lastseitiger zu motorseitiger Massenträgheit 2 beträgt. Für die Berechnungen werden die Verhältnisse im Strom- und Drehzahlregelkreis als ideal angenommen, d.h. durch Stromregelung oder Drehzahlfilter entstehen keine Phasenverzögerungen. Damit sind die Ergebnisse nur auf Systeme mit relativ kleinen Eigenfrequenzen (< 100 Hz) übertragbar, ansonsten sind die Phasenlaufzeiten zu berücksichtigen [6].

Der PI-Regler wird nach der Methode der Doppelverhältnisse auf unterschiedliche Bandbreiten ausgelegt und die resultierenden Störgrößenübertragungsfunktionen von Lastdrehmoment zu Drehzahl werden als Bodediagramme im linken Teil von Bild 17 dargestellt. Eine ausreichende Bedämpfung der Resonanz ist nur möglich, wenn die Dynamik unterhalb der Resonanzfrequenz (a) liegt. Wird die Bandbreite in den Bereich der Resonanzfrequenz (c), (e) gelegt, so führt dies zu sehr großen Schwingungen auf Last- und Motorseite bei der Resonanzfrequenz. Liegt die Bandbreite deutlich oberhalb der Resonanzfrequenz (hier nicht dargestellt), so wird die Schwingung auf der Motorseite zwar wieder gut bedämpft, die Lastseite führt aber unkontrollierte Schwin-



17: Störungs-Übertragungsfunktionen des Lastmomentes auf Motordrehzahl (blau) und Lastdrehzahl (grün) bei PI- und Zustandsregelung.



18: Drehmomentbedarf bei PI- und Zustandsregelung.

gungen aus, da Last- und Motorseite oberhalb der Resonanz nur noch schwach miteinander gekoppelt sind.

**Bild 18** stellt das Verhältnis von Motordrehmoment zu Lastdrehmoment dar, welche unterhalb von Resonanzfrequenz und Regelungsbandbreite gleich sind. Beim PI-Regler ist das Drehmoment im Bereich der Resonanz überhöht, auf höhere Signaleanteile reagiert der PI-Regler nicht, was zu einer freien Schwingung der Last führt. Mit einer Zustandsgrößenregelung (Bild 17 und Bild 18 auf der rechten Seite) können in der Praxis Bandbreiten bis in den Bereich der mechanischen Resonanz ( $d$ ) erzielt werden, ohne dass die dazu notwendige Stellgröße allzu hohe Werte annimmt. Theoretisch ist auch der Betrieb deutlich oberhalb der Resonanz möglich ( $f$ ). Allerdings muss die Signalenergie bei diesen Frequenzen über die relativ „weiche“ Übertragungsstelle vom Motor auf die Last gebracht werden, weshalb sehr große Schwingungsamplituden in der Motordrehzahl notwendig sind. Die notwendigen Drehmomentamplituden des Motors zur Übertragung einer Sollschiwingung bei unterschiedlichen Bandbreiten des Regelkreises zeigt Bild 18. Liegt die Bandbreite oberhalb der Resonanzfrequenz ( $f$ ), so ist eine Regelung in der Praxis häufig nicht mehr möglich, da der Motor sehr große Bewegungen durchführt und in der Regel auch die Stellgrößenbeschränkung überschritten wird.

## 5 Zusammenfassung

Die Angaben von Bandbreiten und Abtastzeiten sind allein nur bedingt geeignet, um Aussagen über die erreichbare Dynamik einer Antriebsregelung zu treffen. Die theoretischen Grenzen ergeben sich aus der effektiven Totzeit im Stromregelkreis, welche durch die Schaltfrequenz der Endstufe und das verwendete Berechnungsschema im Microcontroller bestimmt wird. Werden allgemeine Bandbreiten für einen Antriebsregler angegeben, so muss die verwendete Bandbreiten-Definition und die zugrunde liegende Auslegung der Regelung hinterfragt werden. In der Praxis schränken das Rauschverhalten der Messsysteme und des Antriebsreglers sowie die Unzulänglichkeiten des Motors und der angekoppelten Mechanik die erzielbare Dynamik deutlich ein. Dann entscheiden die erweiterten Maßnahmen in der Signalverarbeitung und der Regelungsstruktur des Antriebsreglers, welche Regelgüte tatsächlich an der Maschine erreichbar ist.

LTI  
11265200

WWW  
www.vfv1.de/#11265200

### Literaturhinweise:

- [1] Schröder, D.: *Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen*, Springer, 2. Aufl., 2001.
- [2] Zäh, M.; Brandenburg, G.: *Das erweiterte Dämpfungsoptimum, Automatisierungstechnik* 35, Heft 7, 1987, pp. 275-283.
- [3] S. Beineke, A. Bähr: *Observer-based Speed Estimation for Linear Motor Control*; PCIM Power Conversion Intelligent Motion, Nürnberg, June 2006
- [4] A. Bähr, S. Beineke: *Mechanical Resonance Damping in an Industrial Servo Drive*; EPE European Power Electronics Conference 2007, Aalborg.
- [5] S. Beineke, L. Hebing, A. Bünte: *High-Speed Drive with Three-Level Inverter for Vacuum Pumps, Laser Cooling and High-Speed Cutting*, EPE European Power Electronics Conference 2003, Toulouse.
- [6] L. Kucera: *Optimale Architektur zur Regelung hochdynamischer und Resonanzbehafteter Antriebe*, SPS/DRIVES 2006, Nürnberg, pp. 455-462.
- [7] H. Schürigel, J. O. Krahl, R. Berger: *Delay Time Compensation in the Current Control Loop of Servo Drives – Higher Bandwidth at no Trade-off*, PCIM Power Conversion Intelligent Motion, Nürnberg, June 2006, pp 541-546.
- [8] L. Springob: *Synchron-Servoantrieb mit hoher Rundlaufgüte und Selbstentnahmefunktion*; Dissertation, Wuppertal 1994.
- [9] S. Beineke, A. Bähr: *High Performance Motion Control of Linear Motor Drives*, EPE European Power Electronics Conference 2005, Dresden.
- [10] S. Beineke, A. Bähr, F. Mink, R. Nalepa: *„Regelung von Synchronmotoren mit Kompensation von Sättigungseffekten“*, SPS/DRIVES 2008, Nürnberg.
- [11] Ch. Gröling, B. Amlang, M. Lux, W. Schumacher: *Referenzumrichter für Servoantriebe: Optimierung konventioneller Stromregelkreise hinsichtlich Dynamik und Genauigkeit*, SPS/IPC/DRIVES 2008, Nürnberg.

## Einladung zum

# Fachsymposium Kleben im Maschinenbau

### Programminhalte:

- Klebtechnik im Maschinen- und Fahrzeugbau
- Klebstoffe, Funktionsprinzipien, Anwendungseigenschaften
- Anwendungsbreite der Klebtechnik
- Schrauben und Kleben ergänzen sich
- Klebegerecht konstruieren
- Anforderungen der Klebtechnik an die Fertigung
- Praxisbeispiel einer Klebanwendung im Maschinenbau / Fahrzeugbau
- Praktische Anwendungsbeispiele
- Innovationsausblick
- Offene Diskussion

### Teilnahmedaten:

**Termin:** Mittwoch, 9. Juni 2010

**Zeitraum:** 9:00 Uhr bis 17:00 Uhr

**Ort:** Verlagsgebäude der Vereinigten Fachverlage, Mainz

**Teilnahmegebühr pro Person:** 195,- € zzgl. MwSt.

Inkl. Mittagsmenü, Konferenzgetränke, alle Arbeitsunterlagen, CD und Zertifikat.  
Mindestteilnehmerzahl: 20 Personen. Abonnenten der Zeitschriften DER KONSTRUKTEUR und DER BETRIEBSLEITER erhalten 10% Rabatt.

**Sichern Sie sich noch heute Ihre Teilnahme:**  
per Fax 06131/992-134 oder unter [www.industrie-service.de](http://www.industrie-service.de)

verbindliche Anmeldung

weitere Informationen

Name: .....

Vorname: .....

Titel: .....

Firma / Abteilung: .....

Straße: .....

Postleitzahl / Ort: .....

Telefon: .....

E-Mail: .....

Unterschrift: .....

Der Betriebsleiter

Der Konstrukteur

Mit freundlicher Unterstützung:

**DELO**  
INDUSTRIE KLEBSTOFFE

Füge-technik  
**AWOK**

**SCHRÄMBERG**  
Klebstoffe

**BÖLLHOFF**  
Joining together!

**TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
KAISERSLAUTERN**