# Massen in Bewegung setzen : Artikelserie Automation : Antriebe (5)

Autor(en): **Vezzini, Andrea / Kolar, Johann / Goette, Josef**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin.ch : Fachzeitschrift und Verbandsinformationen von Electrosuisse, VSE = revue spécialisée et informations des associations Electrosuisse, AES**

Band (Jahr): **96 (2005)**

Heft 15

PDF erstellt am: **29.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-857824

**Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

**Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

**http://www.e-periodica.ch**

# Massen in Bewegung setzen

## Artikelserie Automation: Antriebe (5)

Sei es ein Roboter, ein Förderband oder der Rollladen: Motoren bewegen. Dass der Elektrorasierer einen anderen Motor braucht als der Roboter, versteht sich von selbst: Jeder Motortyp hat seine Vor- und Nachteile. Der eine ist klein, der andere präzise; andere arbeiten besonders effizient oder liefern ein grosses Drehmoment. Unmittelbar mit dem Motor verknüpft ist die Leistungselektronik, denn der Motor muss mit Energie versorgt werden. Soll der Antrieb in bestimmten Geschwindigkeiten drehen oder eine präzise Position anfahren, wird er über die Leistungselektronik geregelt.

### Artikelserie zur Automation

Das *Bulletin SEV/VSE* veröffentlicht dieses Jahr eine Serie zur Automation. Im Monatsrhythmus erscheinen in der Electrosuisse-Ausgabe des *Bulletins SEV/VSE* folgende Artikel:

- **Einführung (Nr. 1/05)**
- **Steuerung (Nr. 3/05)**
- **Kommunikation (Nr. 7/05)**
- **Sensoren, Bildverarbeitung (Nr. 11/05)**
- **Antriebe, Regelungstechnik**
- **Software, Bedienen, Beobachten**
- **Sicherheit**



Elektrische Antriebe begegnen uns täglich, auch wenn sie oft nicht wahrgenommen werden. Dies trifft insbesondere auf die in der Automation verwendeten elektrischen Antriebe zu, die als Bestandteil einer komplexen Maschine häufig nicht sichtbar sind. Dabei haben diese kleinen Helfer schon seit geraumer Zeit

*Andrea Vezzini, Johann Kolar, Josef Goette*

den Weg aus der Industrieautomation in die Endprodukte der Automobil- und Konsumgüterindustrie, der Medizinaltechnik, der Luftfahrt und der Büro- und Gebäudeautomatisierung gefunden.

Entsprechend vielfältig sind die Anforderungen, sei es für lineare oder rein rotative Bewegungen. Die Drehzahlen reichen von einigen Umdrehungen pro Minute für Dosierantriebe bis zu mehreren 10 000 Umdrehungen für Spindeln in Webmaschinen. Bei der Positionierung werden Winkelauflösungen (ohne Getriebe) bis zu einigen Winkelminuten erreicht, bei Linearbewegungen sogar Wegauflösungen im Mikrometerbereich.

Der einfachste dreiphasige Motor ist der Asynchronmotor, der zur Gruppe der Drehstrommotoren gehört. Insbesondere wenn er ohne Frequenzumrichter direkt am Netz betrieben wird, erhält man ein kostengünstiges und robustes Antriebssystem. Dabei ändert sich die Drehzahl mit der Belastung: Im Leerlauf erreicht der Asynchronmotor nahezu eine synchrone Drehzahl; bei Nennlast (der Belastung, für die der Motor angelegt ist) reduziert sich die Drehzahl um bis zu 10%. Diese Differenz bezeichnet man als Schlupf.

Viele Anwendungen stellen aber höhere Anforderungen an die Regelbarkeit von Drehzahl und Drehmoment. Deshalb ist der Anteil an geregelten Antrieben, also die Kombination von Motor, Leistungselektronik und – meist digitaler – Regelung, in allen Bereichen der Automation in den letzten Jahren stark angestiegen.

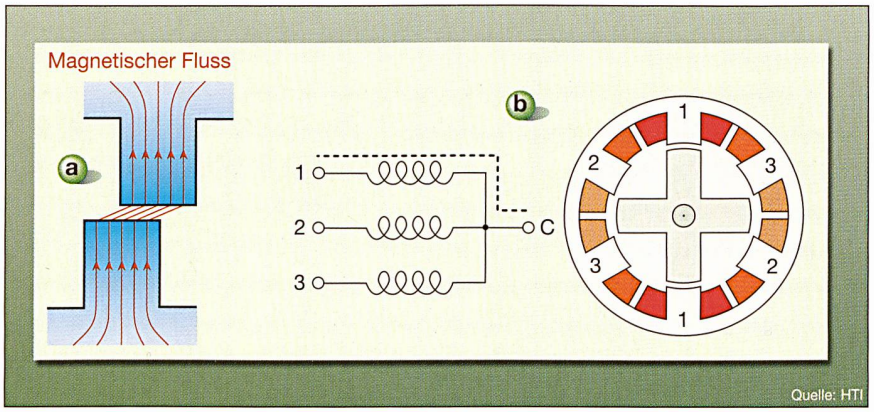


**Bild 1** a) Reluktanzprinzip; b) Reluktanz-Schrittmotor mit Wicklungsschema

### Schrittmotoren laufen synchron

Schrittmotoren laufen synchron zu den eingespeisten Spannungsimpulsen. Die Ansteuerimpulse drehen den Rotor in genau definierten Inkrementen – ohne komplizierte Sensorik, sondern alleine durch das physikalische Konzept der Momenterzeugung. Schrittmotoren besitzen sowohl einen ausgeprägten Rotor als auch einen ausgeprägten Stator, meist in Form von kleinen Zähnen. Bild 1a zeigt einen kleinen Ausschnitt eines Schrittmotors und zeigt auch gleich das fundamentale Prinzip der Bewegungserzeugung: Wird der magnetische Kreis aus Stator und Rotor erregt, erfolgt eine Kraft, die den kleinsten Luftspalt einzustellen versucht und dabei die beiden Zähne ausrichtet. Das Magnetfeld kann entweder durch Wicklungen im Stator erzeugt wer-

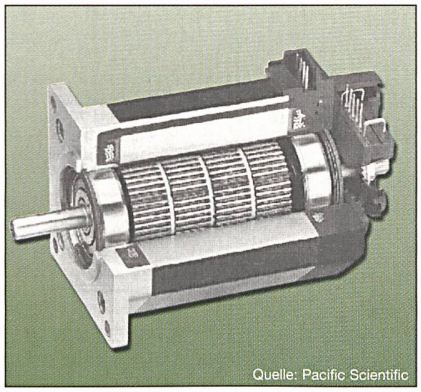


Bild 2 Hybrid-Schrittmotor

den (Reluktanz-Schrittmotoren) oder durch einen Magneten (Magnet-Schrittmotor oder Hybrid-Schrittmotoren). Ein einfacher Reluktanz-Schrittmotor mit unipolarer Wicklung und drei Phasen ist in Bild 1b dargestellt. Das Winkelinkrement beträgt bei diesem Motor 30 Grad. Weist ein solcher Motor feine Zähne auf den Rotor- und Statorpolen auf, lassen sich Auflösungen von wenigen Grad realisieren.

### Magnetschrittmotoren

Magnetschrittmotoren weisen eine ähnliche Struktur auf, die Pole des Rotors sind jedoch magnetisiert und richten sich deshalb automatisch in ihre Vorzugsstellung aus. Dies ist leicht durch das dabei entstehende Rastmoment erkennbar. Der Strom in der Wicklung wird nun so beschaltet, dass die Rotorpole entweder angezogen oder abgestossen werden. Je nachdem, wie die Wicklung ausgelegt und angesteuert wird, unterscheidet man zwischen Uni- oder Bipolarmotoren. Reine Permanentmagnet-Schrittmotoren weisen meistens eine glatte Rotoroberfläche auf (Nord- und Südpole werden magnetisiert) und besitzen einen ausgeprägten Stator ohne zusätzliche Zähne auf den Statorpolen. Entsprechend gross sind die Winkelinkremente. Zudem sind die maximalen Drehzahlen meist auf unter 2000 rpm begrenzt. Ansätze wie der TurboDisc-Schrittmotor von Portescap erlauben Drehzahlen bis zu 5000 rpm, bevor es zu einem dynamischen Momenteinbruch kommt. Dies wird durch eine Scheibenrotorkonstruktion mit einer feinen Teilung der Magnetisierung erreicht.

### Hybrid-Schrittmotoren: Das Beste aus zwei Welten

Häufiger werden Hybrid-Schrittmotoren eingesetzt, wobei es sich strikt genommen auch um einen Magnetmotor handelt, der jedoch die ausgeprägten Pole von Stator und Rotor inklusive zusätzlicher Zähne vom Reluktanz-Schrittmotor übernommen hat. Durch zwei leicht verdrehte Rotoren, die um einen axialen Magneten angeordnet werden, verkleinern sich die Inkremente bis unter ein Grad. Bild 2 zeigt einen Hybrid-Schrittmotor.

Ein entscheidender Fortschritt gelang durch die Einführung der Mikroschrittansteuerung, die ein Inkrement durch die Ansteuerung des Stromes noch einmal fein unterteilt: Bis zu 50000 Mikroschritte sind möglich. Allerdings ist die Position zwischen zwei echten Inkrementen etwas weniger genau.

## Permanentmagnet-Motoren

Für hohe Drehzahlen und Drehmomente werden Motoren mit Permanentmagneten eingesetzt. Die Kraft, respektive das Moment, wird durch einen stromführenden Leiter in einem Magnetfeld erzeugt. Die bekanntesten Vertreter sind der bürstenbehaftete Gleichstrommotor und sein bürstenloses Pendant, der EC-Motor.

### Gleichstrommotoren

Im kleinen Leistungsbereich ist der Gleichstrommotor vielerorts erste Wahl. Er ist kompakt aufgebaut, lässt sich einfach ansteuern und gut regeln, ohne aufwändige Sensorik. Damit ist er vielerorts die kostengünstigste Variante für drehzahl- und positionsgeregelte Antriebe. Hinzu kommen ein guter Wirkungsgrad, geringe elektromagnetische Störungen und eine hohe kurzzeitige Überlastbarkeit. Qualitativ hoch stehende Produkte mit eisenlosem Rotor von Maxon oder Portescap erlauben eine hohe Dynamik und Drehzahlen bis über 20000 rpm (Spezialausführungen). Eine Begrenzung ergibt sich durch die mechanische Kommutierung durch die Bürsten.

### Bürstenlose DC-Servomotoren

Der bürstenlose DC-Servomotor[1)] wird häufig auch als EC-Motor bezeichnet und weist eine dreiphasige Statorwicklung auf, bei der jeweils abwechselnd zwei Phasen mit einem blockförmigen Wechselstrom beaufschlagt werden. Welche zwei Phasen bestromt werden, wird durch drei Halleffekt-Sensoren ermittelt. So wird garantiert, dass Strom und Magnetfeld immer senkrecht zueinander stehen (gleich wie es der mechanische Kommutator im Gleichstrommotor garantiert). Im einfachsten Fall kann eine solche Ansteuerung über eine einfache Wahrheitstabelle erfolgen. Bild 3 zeigt die Funktionsweise.

Für diesen Motor existieren einfache Regelkonzepte ohne Winkelgeber, da sich die Lage des Rotors aus der induzierten Spannung der unbestromten Phase ermitteln lässt; dies funktioniert allerdings nur zuverlässig bei hohen Drehzahlen. Bei tiefen Drehzahlen müssen andere Verfahren eingesetzt werden. Der DC-Brushless-Motor weist eine hohe Momentdichte auf und kann bis zu hohen Dreh-

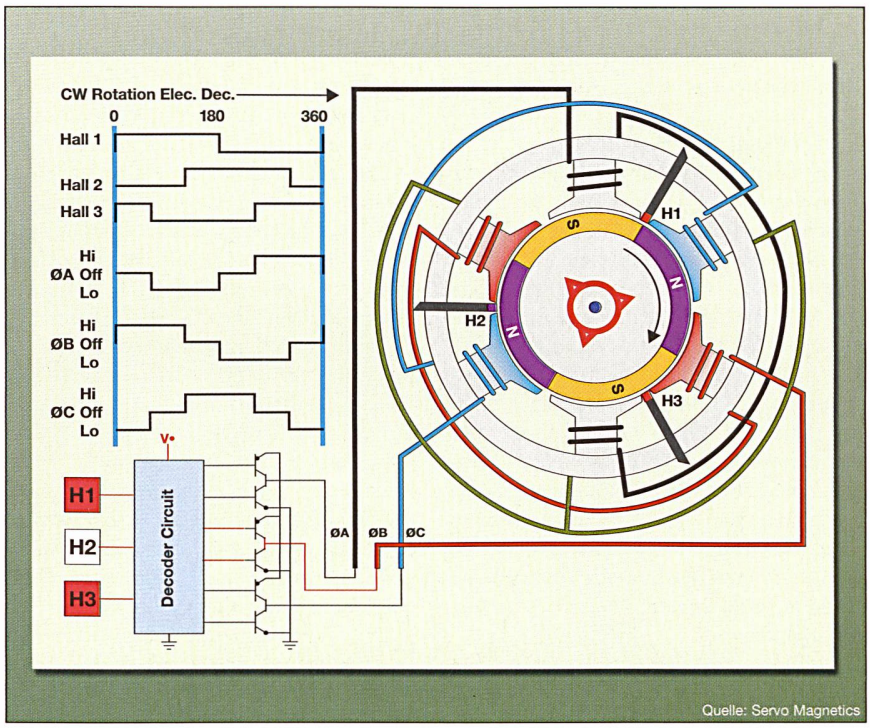


Bild 3 Schema und Funktionsweise des Brushless-DC-Motors

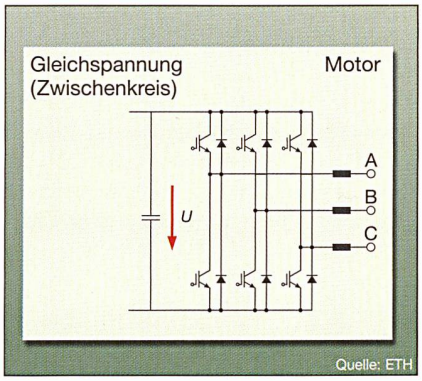


**Bild 4 Wechselrichter mit antiparallelen Freilaufdioden**

zahlen betrieben werden (mehrere 10 000 bis 100 000 rpm), ist jedoch auf Grund seiner Konstruktion mit einem hohen Rastmoment behaftet. Dadurch lassen sich nur diskrete Positionen des Rotors anfahren, was für viele Applikationen nicht akzeptabel ist.

**Permanentmagnet-Synchronmotoren**

Permanentmagnet-Synchronmotoren funktionieren ähnlich wie der bürstenlose DC-Motor, weisen aber auf Grund einer anderen Wicklungskonstruktion eine sinusförmige induzierte Spannung auf. Die drei Phasen werden mit sinusförmigem Strom angesteuert, was zum Teil den Einsatz von Absolutgebern bedingt. Aus Kosten- und Platzgründen werden auch magnetoresistive Encoder eingesetzt, die ein resolverähnliches (sinsuförmiges) Signal erzeugen. Der Regelaufwand bei diesen Motoren ist zwar allgemein der grösste, aber nur hier lassen sich Motoren mit einem konstanten Lastmoment ohne Rasteigenschaften erzeugen.

**Vorwärts, nicht drehen!**

In vielen Anwendungen ist eine lineare Bewegung gefragt, die auf Grund dynamischer Anforderungen nicht über ein Getriebe erzielt werden kann. Die Auslenkungen können dabei sehr klein werden und eine hohe Auflösung erfordern. Hier werden Linearmotoren eingesetzt. Bei den Voice-Coil-Motoren handelt es sich um eine Umsetzung des Lautsprecherprinzips in einen Motor. Eine bewegliche Spule wird innerhalb eines Magneteskreises (Permanentmagnet) aufgehängt und erfährt eine Auslenkung in axialer Richtung. Durch die geringe Massenträgheit der Spule wird eine hohe Dynamik erreicht, allerdings bei geringen Auslenkungen.

**Mehrphasen-Linearmotoren**

Mehrphasen-Linearmotoren ordnen die Wicklung eines konventionellen Rotationsmotors auf einer Achse an und lassen den Rotor als Stab in axialer Richtung laufen (Moving Magnet). Die bekanntesten Vertreter hier sind LinMot und Festo. Je nach Auslegung lassen sich relativ lange Hübe und hohe Kräfte erzielen. Bei entsprechender Sensorik lassen sich Wegauflösungen im Mikrometerbereich erzielen.

## Leistung für die Motoren

Bis vor wenigen Jahren wurden in der Automation selten Drehstrommotoren eingesetzt, da deren Drehzahl nicht geregelt werden konnte. Heute verdrängen Drehstrommotoren, die über Frequenzumrichter gespeist werden, die verbreiteten DC-Motoren. Die Frequenzumricher bereiten erst die Netzspannung zu einer Gleichspannung auf und richten diese darauf in eine Wechselspannung mit variabler Frequenz um. So können auch asynchrone Motoren geregelt werden – im Zusammenhang mit Sensoren in recht genauen Inkrementen – und ersetzen sogar Schritt- und Servomotoren.

Die Umrichter werden meist als dreiphasige Pulswechselrichter in Brückenschaltung ausgeführt (Bild 4). Zwei Transistoren[2)] verbinden je eine Phase des Motors wechselnd mit der positiven und der negativen Klemme der Gleichspannung. Die Induktivität des Motors glättet die Stromaufnahme zur Sinusform. Die Frequenzumrichter kauft man als ganzes Modul (für alle drei Phasen) und steuert sie mit einem pulsbreitenmodulierten Signal an. Die Taktfrequenzen liegen bei Standardantrieben, abhängig von der Antriebsleistung, bei 2 bis 8 kHz. So bleibt die Stromwelligkeit gering, bei einer hohen Bandbreite der Stromregelung und einer geringen Momentanregelzeit.

Die hochintegrierten Treiberbausteine steuern die Brückenzweige mit optischer oder magnetischer Potenzialtrennung der Steuersignale an. Damit die Schaltverluste der Leistungshalbleiter auch bei hohen Frequenzen tief bleiben, müssen die Signale exakt zur richtigen Zeit kommen, ohne Störungen. Dies bedingt eine hohe Gleichtaktstörfestigkeit und eine geringe Signalverzugszeit; derzeit liegt der Grenzwert bei 30 kV/µs mit Verzögerungszeiten im Bereich von 50 ns und hoher Pulsbreitentreue. Die Ansteuerenergie wird direkt, über Ladungspumpen oder magnetisch übertragen (falls eine Potenzialtrennung nötig ist).

Die Gleichspannung zur Speisung des Pulswechselrichters wird meist durch Diodengleichrichter erzeugt. Diese sind einfach, zuverlässig und kompakt. Allerdings werden dem Netz hohe pulsförmige Ströme entnommen und die Ausgangsspannung ist direkt an die Netzspannung gebunden. Bei einer einphasigen Speisung können die Oberschwingungen verringert werden, wenn die Kapazität im Zwischenkreis (Gleichstromseite) klein gewählt wird. Eine andere Möglichkeit ist ein (unidirektionaler) Hochsetzsteller, der den Strom sinusförmig aufnimmt und zugleich die Gleichspannung regelt. Da sich diese Art von Gleichrichter an die Eingangsspannung anpassen kann, wird sie auch oft gewählt, wenn der Antrieb weltweit bei verschiedenen Netzspannungen betrieben wird.

## Wohin mit der Bremsleistung?

Bei einer dreiphasigen Speisung können ähnliche Schaltungen verwendet werden, für unidirektionale Gleichrichterkonzepte ist allerdings keine Rückspeisung von Bremsenergie in das Netz möglich. Daher muss je nach Anwendung parallel zum Zwischenkreis ein Bremschopper vorgesehen werden, der allfällige Bremsleistung in Verlustwärme umsetzt. Auch für diese Systemkonfiguration sind Leistungsmodule verschiedener Hersteller verfügbar. Der Platzbedarf und die Erwärmung des Bremswiderstandes sind jedoch bei der Unterbringung im Schaltschrank ein Nachteil. Abhilfe schafft eine antiparallel zur Diodengleichrichtung liegende Thyristorbrücke, deren Stromführung einerseits durch die Ansteuerung der Ventile und andererseits durch einen in Serie liegenden IGBT so gesteuert wird, dass in der Umgebung der Maxima der verketteten Spannung Energie in das Netz zurückgeführt wird. Zukünftig wird sich für Antriebe mit häufig wechselnden Beschleunigungs- und Verzögerungsphasen oder hohen bewegten Massen verstärkt die in Bild 5 gezeigte Schaltung durchsetzen. Der Leistungsfluss ist dann mit hoher Dynamik umkehrbar und so bei einer Bremsung eine Rückspeisung der Energie der rotieren-

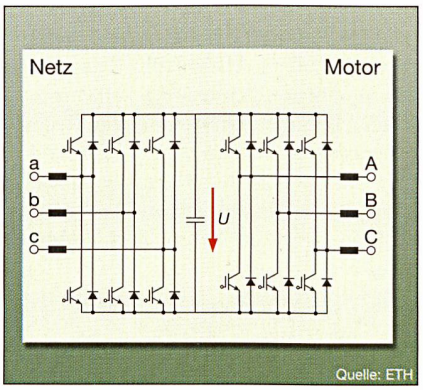


**Bild 5 Wechselrichter mit bidirektionaler Speisung**

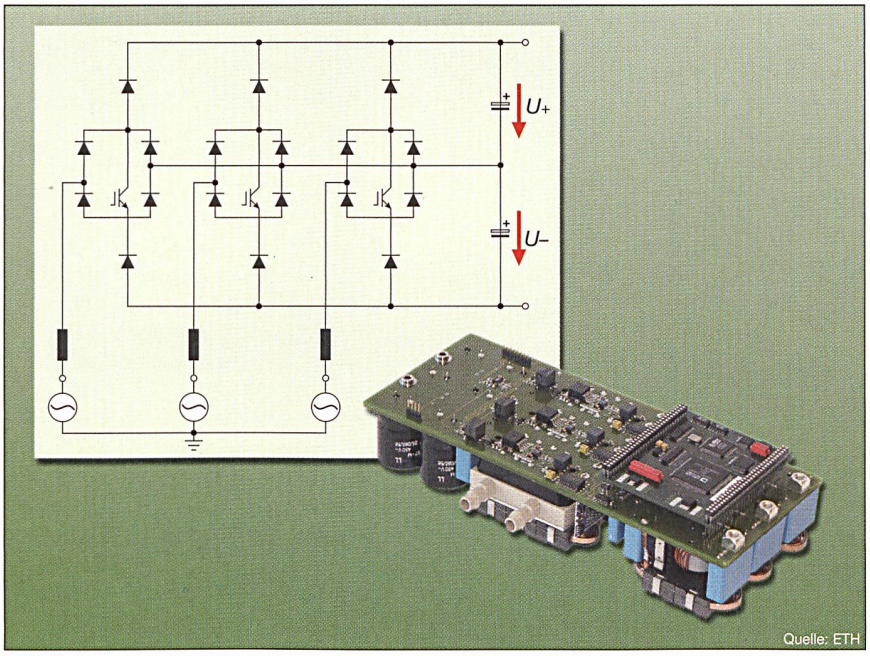


**Bild 6 Dreiphasiger Pulsgleichrichter mit einer Zielleistungsdichte von 50 kW/l bei einer Taktfrequenz von 2,5 MHz und 10 kW Ausgangsleistung (als Labormuster realisiert, Leistungsdichte derzeit 10 kW/l)**

den Massen an den Eingang möglich. Durch eine geeignete Regelung entspricht der Antrieb einer ohmschen Last am Netz (Energieaufnahme), niederfrequente Oberschwingungen werden vermieden. Des Weitern kann die Eingangsstufe neben der Gleichrichterfunktion die Aufgabe eines aktiven Filters übernehmen und damit die Netzrückwirkungen eines aus mehreren Antrieben bestehenden Systems kompensieren. Da bei Gruppenantrieben vielfach mehrere Wechselrichter aus einer Zwischenkreisspannung gespeist werden, ist die aufwändigere bidirektionale Speisung wirtschaftlich vertretbar.

Bei Antrieben kleiner Leistung wird der Umrichter zunehmend in die Maschine integriert, wobei die hohen Motortemperaturen und der zusätzliche Platzbedarf die Limits bilden. Die Lebensdauer der zur Stützung der Zwischenkreisspannung eingesetzten Elektrolytkondensatoren wird durch den Betrieb bei hoher Temperatur signifikant reduziert. Es werden daher Systeme mit kleiner Zwischenkreiskapazität entwickelt, die auch kleinere Netzrückwirkungen verursachen. Ein wesentlicher Vorteil der Integration des Umrichters in den Motor ist, dass die geschirmten Motorzuleitungen wegfallen. Diese sind bei herkömmlichen Antrieben nötig, damit keine Störungen ausgesendet werden – die Anlage elektromagnetisch verträglich ist (EMV). Im Bereich der Forschung wird eine vollständige Integration des bidirektionalen Systems nach Bild 5 in Drehfeldmaschinen untersucht, wobei die Eingangsinduktivitäten in gering ausgenutzten Teilen des Maschinenblechpaketes untergebracht sind.

Zusammenfassend liegen heute für das gesamte Spektrum der industriellen Automatisierung- und Fertigungstechnik sowie für Anwendungen im Bereich der Gebäudeautomation und Klimatisierung technisch ausgereifte Lösungen mit hohem Integrationsgrad und hoher Modularität, auf Seite der Leistungselektronik wie auch der voll digitalen Signalverarbeitung und Kommunikation mit Leitebenen vor. Die damit verbundene Standardisierung wird zu einer weiteren Kostenreduktion führen und so dem Einsatz drehzahlvariabler Antriebe kleinerer Leistung in Massenanwendungen den Weg bereiten. Damit kann bei wirtschaftlich vertretbarem Aufwand erheblich Energie eingespart werden.

## Trends der Leistungselektronik

Die Leistungselektronik für Antriebe wird nicht mehr grundlegend neu erfunden. Eher werden bewährte Konzepte ergänzt mit neuen Funktionen, zum Beispiel mit direkten Feldbusanbindungen oder neuen Benutzerschnittstellen. Zukünftige Konzepte und Halbleitermaterialien (z. B. SiC) werden den Aufbau der Leistungselektronik weiter vereinfachen, den Wirkungsgrad erhöhen und neue Anwendungen mit extremen Anforderungen nach Temperaturfestigkeit und Leistungsdichte erschliessen, zum Beispiel in den Bereichen Automotive und More-Electric-Aircraft.

Für konventionelle Pulswechselrichter wird von mehreren Halbleiterherstellern der Einsatz rückwärtsleitender IGBTs untersucht. Diese Bauelemente sollen die bisher diskrete Freilaufdiode monolithisch integrieren und so die Zahl der Fertigungsschritte und Bondverbindungen bei der Modulherstellung reduzieren.

Weiters befinden sich, zum Beispiel für Anwendungen in der chemischen Industrie, Umrichter mit Taktfrequenzen von 50 kHz und kompaktem Sinusausgangsfilter in Entwicklung. Die hohe Taktfrequenz wird durch SiC-Schottky-Freilaufdioden[3)] und eine planare Mehrschicht-Verbindungstechnik der Leistungshalbleiterchips ermöglicht (heute werden die Chips noch mit Wire-Bonds verbunden). Die Schaltgeschwindigkeit kann so ohne hohe Rückstrom- oder Überspannungsspitzen gesteigert werden.

Mittelfristig sollen Konverter ausschliesslich mit SiC-Halbleitern realisiert werden, die auf Grund des hohen Bandabstandes von SiC eine hohe intrinsische Temperatur aufweisen und maximale Sperrschichttemperaturen von 250 bis 350 °C erlauben werden (gegenüber derzeit 150 °C). Dies eröffnet Hochtemperaturanwendungen und vereinfacht die Kühlvorrichtung – falls sie nicht ganz wegfällt. Wesentliche Herausforderungen liegen hier in der Verbindungstechnik (Stromänderungen bis zu 50 kA/µs), im Packaging, bei den passiven Komponenten, der Signalelektronik und der Ansteuerung, die bei Zwischenkreisspannungen von 800 V mit Gleichtaktspannungsänderungen von bis zu 100 kV/µs beansprucht wird[4)].

### Frequenzen bis einige MHz

Nachdem konventionelle Pulswechselrichterschaltungen seit Längerem eingeführt sind, rücken neue Konvertertopolo-

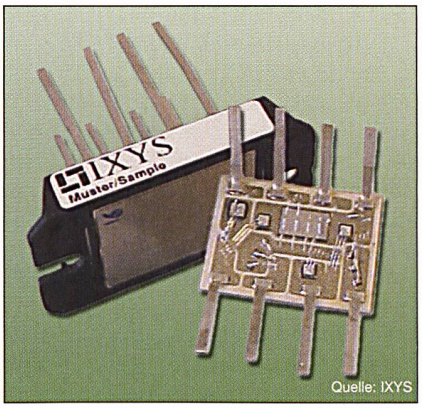


**Bild 7 Leistungs-Halbleitermodul mit SiC-Schottky-Dioden und Superjunction-MOSFETs**

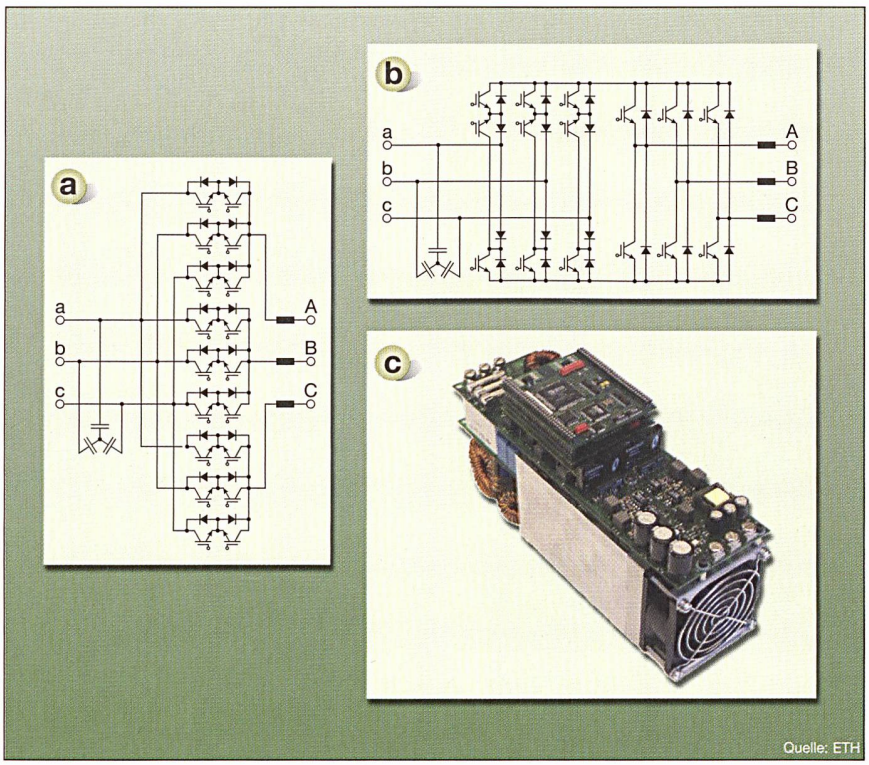


**Bild 8 Matrix-Konvertertopologie**

a) Der Matrix-Konverter kann jede Phase des Motors mit jeder Phase des Netzes verbinden und so jederzeit die richtige Spannung «abholen». b) Der Sparse-Matrix-Konverter lässt unnötige Elemente weg. c) Sparse-Matrix-Prototyp mit einer Leistungsdichte von 5 kW/l, rund fünfmal besser als konventionelle Antriebssysteme.

gien wieder verstärkt in den Blickpunkt der Forschung: beispielsweise digital geregelte, dreiphasige Pulsgleichrichtersysteme mit einer Zielleistungsdichte von 50 kW/l bei einer Taktfrequenz von 2,5 MHz und 10 kW Ausgangsleistung[5] (Bild 6). Hierbei finden anwendungsspezifische Leistungs-Halbleitermodule mit SiC-Schottky-Dioden und Superjunction-MOSFETs Einsatz (Bild 7).

Wie die Untersuchungen zeigen, beansprucht das EMV-Filter bei Taktfrequenzen im MHz-Bereich einen wesentlichen Teil des Konvertervolumens. Hybride EMV-Filter, d. h. eine Kombination aus aktiven und passiven Filterstufen, sollen hier Platz sparen. Derartige Filterstufen sind auch für konventionelle Pulswechselrichtersysteme von Interesse und werden künftig eine Integration des Filters in den Konverter ermöglichen.

Die Integration des Kühlsystems in das Konvertervolumen mit einer thermischen Anbindung passiver Komponenten sind weitere Forschungspunkte, um die Leistungsdichte zu steigern. Die funktionelle Trennung der Kühlung wird dabei aufgegeben.

Weiter kann der Wirkungsgrad durch Sparse-Matrix-Konvertertopologien zur direkten AC-Konversion der dreiphasigen Netzspannung verbessert werden. Gleichzeitig wird die Anzahl passiver Elemente minimiert. Im Gegensatz zu konventionellen Matrixkonvertern sind die Systeme durch eine geringere Zahl von IGBTs sowie ein signifikant einfacheres Kommutierungsverfahren gekennzeichnet und erlauben so erstmals eine industrielle Umsetzung des Matrixkonverterkonzeptes. Erste Labormuster der ETH Zürich (Bild 8) haben gegenüber der Lösung nach Bild 5 eine Verbesserung des Wirkungsgrades um 1,5% und eine Reduktion des Funktionsvolumens um 30% gezeigt. Ein mit 150 kHz getakteter Sparse-Matrix-Konverter (ausschliesslich mit SiC-Leistungshalbleitern realisiert) erreichte eine Leistungsdichte von 7,5 kW/l. Konventionelle Antriebssysteme ohne aktive Eingangsstufe liegen heute bei einer Leistungsdichte von 1 kW/l.

## Wer regelt den Motor?

Ein Motor muss nicht nur angetrieben werden – man muss ihn auch regeln, damit er in der richtigen Geschwindigkeit läuft. Mit den Fortschritten in der Leistungselektronik und den Mikroprozessoren wurden die Regler immer leistungsfähiger. Einige Herausforderungen bleiben aber, weil die Dynamik der Motoren Nichtlinearitäten aufweist, die man nicht vernachlässigen darf. Meist werden zudem aus Kostengründen nicht alle Zustandsvariablen des Systems gemessen, und Motorenparamenter können beträchtlich von ihren Nominalwerten abweichen.

Die Literatur zeigt eine Vielzahl von nichtlinearen Methoden zur Regelung von Motoren [1], wobei sie zwischen modellbasierter und modellfreier Regelung unterscheidet. Während modellfreie Regelungen heute oft neuronale Netzwerke und Fuzzy-Logik verwenden, beschränken wir uns hier auf modellbasierte Regelungen.

Regler werden anhand von Modellvereinfachungen entworfen, da die realen Motoren oft komplex und meist nichtlinear sind. Gebräuchlich sind die Methode der zwei Zeitskalen oder die Transformation des Referenzkoordinatensystems. Noch verbleibenden Nichtlinearitäten wird entweder mit Ad-hoc-Methoden oder mit nichtlinearen Reglern begegnet. Um sich vor Überraschungen zu schützen, werden die Regler vor einer Implementierung simuliert.

## Methode der zwei Zeitskalen

Motoren sind Rückkopplungsverschaltungen eines elektrischen und eines mechanischen Teilsystems. Oft hat das elektrische Teilsystem viel kleinere Zeitkonstanten als das mechanische, bewegt sich also in einer viel schnelleren Zeitskala:

**Bild 9 Rahmenstruktur einer digitalen Regelung für einen Wechselstrommotor**

Im innersten Rahmen findet sich das Modell des physikalischen Motors für Matlab/Simulink-Simulationen oder der «wirkliche Motor» bei Echtzeitsimulationen mit dSpace; dabei umfasst der Begriff «wirklicher Motor» den Motor, die Leistungselektronik sowie die Interface-Komponenten zum digitalen Regelprozessor. Der nächste Rahmen beschreibt den Blondel-Park-transformierten Motor: Die physikalischen Motorvariablen wie Phasenspannungen und Phasenströme sind auf Regelvariablen abgebildet. Im gezeigten Fall wird im nächsten Rahmen eine Feedback-Linearisierung gerechnet. Das dadurch resultierende lineare System wird mit bekannten linearen Regelalgorithmen geregelt.

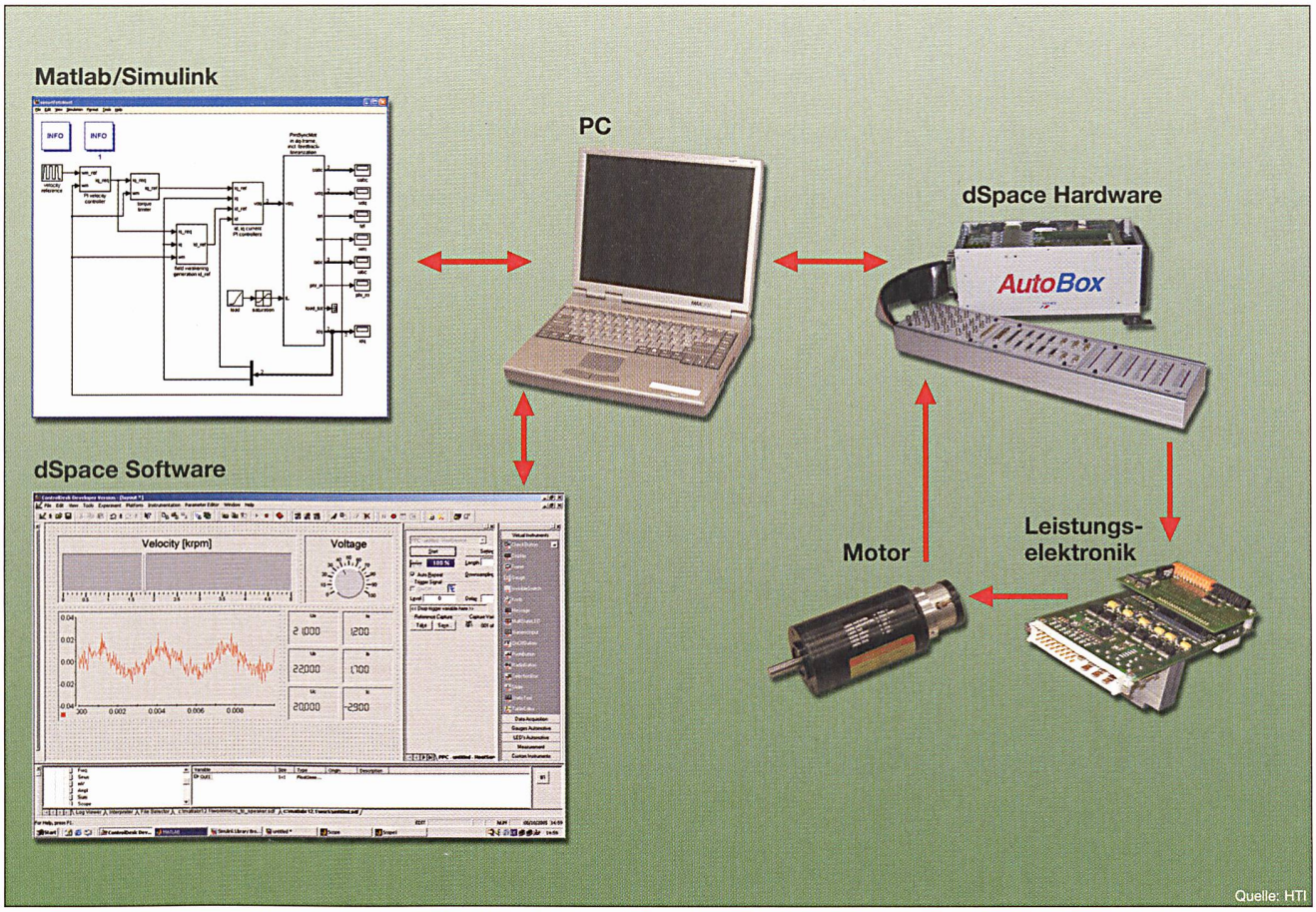


**Bild 10 Entwicklung, Simulation und Prototyping von Motorenreglern mit den Werkzeugen Matlab/Simulink und dSpace**

Mit Simulationen auf einem PC werden die Regelalgorithmen entwickelt, getestet und optimiert. Anschliessend werden die Algorithmen in Form von Simulink-Blockschaltbildern für die dSpace-Hardware kompiliert und mit der Leistungselektronik und dem Motor im Regelkreis in Echtzeit getestet.

Angenähert kann das elektrische Teilsystem als «unendlich schnell» betrachtet werden, und es bleibt ein Motorenmodell tieferer Ordnung.

Zur Geschwindigkeits- und Positionsregelung dieser vereinfachten Modelle kommen meist Proportional- (P), Proportional-Integral- (PI) und Proportional-Integral-Differential-Regler (PID) zum Einsatz. Die Auslegung der Regler hängt vom Ziel ab: möglichst gutes Führungsverhalten, möglichst gute Störunterdrückung oder ein Kompromiss dazwischen.

Ist das elektrische Teilsystem nicht genügend schnell, kann mit Hilfe eines inneren Stromreglers nachgeholfen werden (Kaskadenregelung): Der physikalische Motor mit dieser Stromregelung erscheint wie ein stromgesteuerter Motor, der wieder durch ein Modell tieferer Ordnung angenähert und geregelt wird. Der Motor wird also über zwei Stufen geregelt. Wenn ein einfacher P-Stromregler den Strom schlecht führt, kommen die PI-Regler in Frage[6]. Die schnelle Regelung im inneren Stromregelkreis wird oft analog ausgeführt und in die Leistungselektronik integriert. Die Kaskadenstruktur ist besonders wirkungsvoll bei komplizierten Motortypen mit nichtlinearen, gekoppelten dynamischen Gleichungen, die mit dem Stromregler annähernd entkoppelt werden.

## Transformation der Referenz-Koordinatensysteme

In vielen Motoren hängen die beschreibenden dynamischen Gleichungen periodisch von der Rotorposition $\Theta$ ab. Die seit langem bekannten Blondel-Park-Transformationen (BP) und deren Weiterentwicklungen eliminieren für viele Motortypen diese explizite Positionsabhängigkeit in den Gleichungen des elektrischen Teilsystems. Für diese $\Theta$-abhängigen Koordinatentransformationen muss $\Theta$ durch Messung oder Schätzung bekannt sein. Die genaue Definition der verwendeten Transformation ist eine Frage der bevorzugten Referenz: Es kann sich um die Transformation auf ein statorfestes, auf ein sich mit dem Rotor mitbewegendes, oder auf ein sich synchron mit der verwendeten Wechselstromanregung mitbewegendes Koordinatensystem handeln.

Durch die Transformationen werden die physikalischen Motorvariablen in neue Regelvariablen transformiert, die im stationären Betrieb konstant sind (Synchronmotor) oder langsam als Sinusschwingungen variieren (schlupfgeregelter Induktionsmotor). Damit lassen sich die Regler-Entwicklungen und -Auslegungen vereinfachen.

## Motoren sind nicht linear

Weil viele Motoren stark nichtlinear sind, kommen neben der Kleinsignal-Linearisierung auch Ad-hoc-Regelungen in Frage: Der innere Stromregelkreis eines Kaskadenreglers erzeugt einen stromgesteuerten Motor. Dessen elektrisch erzeugtes Moment ist annähernd proportional zum Strom und das mechanische Teilsystem wird ebenfalls annähernd linear angenommen.

Eine Alternative, die Nichtlinearitäten nicht explizit berücksichtigt, ist die aus

der Prozessregelung bekannte merkmalbasierte Auslegung von PI- und PID-Reglern: Ein Merkmal (zum Beispiel eine gemessene Schrittantwort) wird durch wenige Parameter charakterisiert und zur Reglerauslegung mit bekannten Formeln verwendet. Die ersten und gut bekannten merkmalbasierten Methoden gehen auf Ziegler und Nichols zurück; Verbesserungen sind seither vorgeschlagen worden [1].

## Nichtlineare Regelungen

Bei höheren Anforderungen werden die Nichtlinearitäten von Motoren im Regler berücksichtigt. Dabei ist keine allgemein anwendbare Methode, aber eine reiche Sammlung von alternativen und teilweise komplementären Methoden bekannt: Von Gain Scheduling und Feedback-Linearisierung (FBL) über robuste Methoden wie Sliding Mode Control (SMC) und Passivity-Based Control (PBC) bis zu adaptiven Regelungen.

Bei der FBL wird in einem inneren Regelkreis durch nichtlineare Rückkopplung die Nichtlinearität des zu regelnden (falls notwendig BP-transformierten) Motors kompensiert. Das resultierende lineare System bestehend aus physikalischem Motor und seiner linearisierenden Rückkopplung wird anschliessend mit einem aus der linearen Technik bekannten Regler geregelt.

Vorgängig zur formalen Entwicklung der Theorie der FBL sind eng damit verwandte Methoden der nichtlinearen Rückkopplung entwickelt worden. Erwähnt sei die feldorientierte Regelung (FOC) von Induktionsmotoren. Auch hier resultieren, nach einer BP-Transformation, durch nichtlineare Rückkopplung einfache dynamische Gleichungen: Die Rotorflussdynamik wird linear und vom Rest entkoppelt; wird der Rotorfluss zusätzlich auf einen konstanten Wert geregelt, wird auch die Geschwindigkeitsdynamik linear und entkoppelt. Damit erreicht die FOC, falls der Rotorfluss konstant geregelt werden kann, eine asymptotische Linearisierung und Entkoppelung. Die FOC wird erfolgreich eingesetzt, obwohl sie die Linearisierung und Entkoppelung nur asymptotisch erreicht.

Direct-Torque-Control-Techniken (DTC) erzeugen über äussere Geschwindigkeits- und/oder Positions-Regler (meist PI-Regler) eine Momentenreferenz. Die innere DTC-Regelung versucht, das gewünschte Moment mit einem Schaltregler im Motor einzustellen. Die DTC-Strategien gehören zur Klasse der SMC-Techniken.

Die PBC-Regelung eignet sich für Motoren, die Rückkopplungsverschaltungen von *passiven* elektrischen und mechanischen Teilsystemen sind: Werden Reglerstrukturen verwendet, die diese Passivität auch beim geregelten System beibehalten, ist die Stabilität sichergestellt. Verglichen mit den FBL-Ansätzen bleibt hier die Dynamik des geschlossenen Regelkreises nichtlinear. Der Reglerentwurf ist – vor allem für adaptive Regler – einfacher, und es resultieren robuste Regler mit globalen Regelgesetzen (keine speziellen Bedingungen zum Anfahren, für Anfangszustände und dergleichen).

## Simulation, Prototyping, Implementierung

Zum Entwurf und zur Computer-Simulation von Regelsystemen verwendet die HTI Biel vorwiegend Matlab und Simulink. Zur Echtzeit-Verifikation werden diese Simulationswerkzeuge durch dSpace-Systeme ergänzt. Diese auf Fliesskomma-Prozessoren basierenden Prototyping-Systeme erlauben ein automatisches Kompilieren von Simulink-Blockschaltmodellen und deren überwachte Echtzeitausführung zur Ansteuerung der Zielhardware.

Viele Systeme zur Motorenregelung werden in digitaler Hardware implementiert. Neben Application Specific Integrated Circuits (ASICs), die teilweise auch analog arbeiten und den Nachteil geringer Flexibilität haben, kommen vor allem Regelprozessoren verschiedener Hersteller zum Einsatz. Zur Steigerung der Verarbeitungsgeschwindigkeit kann ein Teil der Logik auf Hilfshardware ausgelagert werden, wobei meist Field-Programmable Gate Arrays (FPGAs) eingesetzt werden.

## Referenz

[1] http://labs.hti.bfh.ch/indulab

## Angaben zu den Autoren

Prof. Dr. ***Andrea Vezzini*** ist seit 1996 Dozent für Industrieelektronik an der Hochschule für Technik und Informatik der Berner Fachhochschule (ehemals Ingenieurschule Biel). Das Labor für Industrieelektronik bearbeitet in enger Zusammenarbeit mit der Industrie vor allem Projekte im Bereich Antriebs- und Leistungselektronik. 2000 erhielten er und seine Mitarbeiter den Innovationspreis des Technologiestandorts Schweiz für einen Elektroantrieb eines Segelfliegers. Seit 2002 ist er Verwaltungsratspräsident und Mitinhaber des HTI-Spinoffs Drivetek AG (www.drivetek.ch).
HTI, 2501 Biel, andrea.vezzini@hti.bfh.ch

Prof. Dr. ***Johann Kolar*** ist seit 2001 ordentlicher Professor für Leistungselektronik an der ETH Zürich. Forschungsschwerpunkte sind ultrakompakte Konverterschaltungen für Hochtemperaturanwendungen, multidisziplinäre Modellierungen leistungselektronischer Systeme, neue Kühlverfahren, aktive EMV-Filter, Power MEMS und magnetisch gelagerte (lagerlose) elektromechanische Energiewandler.
ETH Zürich, Power Electronic Systems Laboratory, 8092 Zürich, kolar@lem.ee.ethz.ch

Prof. Dr. ***Josef Goette*** ist seit 1994 Dozent für Regelungstechnik und Signalverarbeitung an der Hochschule für Technik und Informatik der Berner Fachhochschule (ehemals Ingenieurschule Biel). Neben der Lehre arbeitet er an Industrieprojekten mit, die Kompetenzen im Bereich «Signale und Systeme» erfordern.
HTI, 2501 Biel, josef.goette@hti.bfh.ch

[1] Servomotor ist ein Überbegriff für alle Motoren, deren Rotorposition mit einem Sensor gemessen wird. Dies können synchrone DC- oder AC-Motoren sein.

[2] Insulated Gate Bipolar Transistoren (IGBT)

[3] Die Schottky-Diode hat nur einen verschwindend kleinen Rückwärtserholstrom

[4] Am Power Electronic Systems Laboratory, PES, der ETH Zürich (www.pes.ee.ethz.ch) werden gemeinsam mit internationalen Partnern Lösungen zu diesen Fragestellungen erarbeitet.

[5] Im Rahmen eines Demonstratorprogrammes des European Center for Power Electronics (ECPE), an dem das PES der ETH Zürich als Kompetenzzentrum für Ultra Compact High Temperature Power Electroncis teilnimmt.

[6] Der P-Regler hat einen Ausgang proportional zum Eingang und hat damit immer einen kleinen Fehler. Der PI-Regler integriert diese Differenz und kompensiert so den Fehler.