# Dynamik und Überlastfähigkeit von sensorlosen Antrieben mit PM-Synchronmaschinen einschließlich Stillstand und tiefen Drehzahlen

# Dynamic and Overload Capability of sensorless PM Synchronous Drives including standstill and low speed range

Univ.-Prof. Dr. Manfred Schrödl, Technische Universität Wien / Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe, Wien, Österreich, manfred.schroedl@tuwien.ac.at

## Kurzfassung

Der Beitrag präsentiert die Eigenschaften sensorloser Antriebe mit Permanentmagnet-Synchronmaschinen im Hinblick auf Dynamik und Überlastfähigkeit, wobei besonders der Tiefdrehzahlbereich einschließlich des Stillstandes betrachtet wird. Dabei werden mehrere Antriebe unterschiedlicher Größe und Konstruktion präsentiert, die teilweise bereits einige Jahre im Serieneinsatz sind oder in einer Serienentwicklung stehen. Als Beispiele werden Antriebe aus verschiedenen Branchen (Medizintechnik – Antriebsdaten 20 mNm / 40.000 U/min, Traktion 3.000 Nm / 1000 U/min, Produktionstechnik 2 Nm / 4000 U/min) präsentiert, die ab Stillstand mit vollem Drehmoment bzw. Überlast betrieben werden können. Auf diese Weise ist es möglich, sehr robuste und kostengünstige Systeme zu realisieren, die sich in der Praxis bereits in hohen Stückzahlen und seit mehreren Jahren bewährt haben.
Messungen und statistische Auswertungen der sensorlos ermittelten Positionen und Drehzahlen im Vergleich mit Referenzgebern werden dargestellt, ebenso wie hochdynamische Startvorgänge und Überlastbetrieb z.B. mit 3-fachem Nennstrom.

## Abstract

The paper presents the properties of sensorless drives with permanent magnet synchronous machines with respect to dynamics and overload capability. A main aspect is the low speed range including standstill. Several drives are presented, which have already been in series applications or are going to be used in series. As examples, a medical application (20 mNm / 40.000 rpm drive), a traction application (3.000 Nm / 1.000 rpm drive) and a drive of production industry (2 Nm / 4.000 rpm drive) are presented. All of them are able to provide full starting torque or even overload. Hence, very robust and economical systems can be realized, which have already been used in practice.
Measurements and statistical evaluations of sensorless-obtained position and speed information are presented. A comparison with reference sensors is performed. Furthermore, highly dynamic starting behaviour and overload properties (e.g. with 3 times rated current) are discussed.

## 1 Einleitung

Der Einsatz von permanentmagneterregten Synchronmaschinen (PSMs) hat in den letzten Jahren einen großen Zuwachs erfahren. Hauptgründe sind ein kompakter Aufbau und ein ausgezeichneter Wirkungsgrad. Der starke Preisanstieg von Seltenen Erden in den letzten Jahren hat zu einer vorübergehenden Verunsicherung der Motorenbauer geführt, jedoch scheint diese durch Aktivierung von neuen Lagerstätten überwunden zu sein. Seit vielen Jahren wird die sogenannte „Sensorlose Regelung“ zur Einsparung von Positionssensoren propagiert [1-5], um die Robustheit des Antriebs hoch und die Kosten niedrig zu halten. An der Technischen Universität Wien wurden bzw. werden gemeinsam mit Industriepartnern eine Reihe von Projekten zur Implementierung von sensorlosen Verfahren durchgeführt, wobei einige davon bereits mehrere Jahre, teilweise in hohen Stückzahlen, im Markt sind. Dabei sind die Betriebsbereiche und Größen der Antriebe in einem weiten Bereich gestreut. Die Projekte reichen von kleinen Motoren mit Nenndrehmoment von 0,02 Nm und Drehzahlen von 40.000 U/min für Dental-Anwendungen bis hin zu großen Antrieben mit Nennmomenten von 3.000 Nm und Drehzahlen von 1.000 U/min für Bahneinsatz. Dazwischen ist eine große Bandbreite von sensorlosen Antrieben für verschiedenste Anwendungen realisiert worden. In folgenden Beispielen wird gezeigt, dass unabhängig von der Motorengröße ein sicherer sensorloser Betrieb mit hoher Dynamik und Überlastfähigkeit ab Stillstand möglich ist.

## 2 Prinzip der sensorlosen Regelung

Grundidee der sensorlosen Regelung ist, relativ leicht messbare positionsabhängige physikalische Effekte auszunutzen, um auf die Rotorposition indirekt zu schließen. Für Drehzahlbereiche über ca. 10-20% der Nenn-

ISBN 978-3-8007-3546-4 © VDE VERLAG GMBH · Berlin · Offenbach

drehzahl kann dabei vorteilhaft die induzierte Spannung ausgewertet werden. Im Bereich kleiner Drehzahlen einschließlich Stillstand werden Injektionsverfahren eingesetzt, die rotorpositionsabhängige Induktivitätsschwankungen auswerten. In den gezeigten Beispielen wird dabei das INFORM®-Verfahren („**In**direkte **F**lussermittlung durch **O**n-line **R**eaktanz-**M**essung“) [1] eingesetzt.

## 2.1 Das EMK-Verfahren

Im Drehzahlbereich über ca. 10-20% der Nenndrehzahl kann Positionsinformation aus der induzierten Spannung rein passiv gewonnen werden. Dabei wird im Prinzip die Statorflussverkettung durch Integration der Statorspanung unter Berücksichtigung des Ohm´schen Widerstandes bestimmt. Unter Berücksichtigung der Wirkung des Statorstroms auf die Flussverteilung kann daraus die Rotorposition bestimmt werden. Dieses Verfahren ist bereits seit vielen Jahren Stand der Technik und ist z.B. in [1] erläutert.

## 2.2 Das INFORM-Verfahren

Grundidee ist, durch Anlegen eines (Test-) Spannungsraumzeigers die Stromanstiegsreaktion zu erfassen. Soferne die PSM einen messbaren Unterschied zwischen d- und q-Induktivität aufweist, erfolgt der Stromanstieg in Abhängigkeit von der Rotorposition (Bild 1).

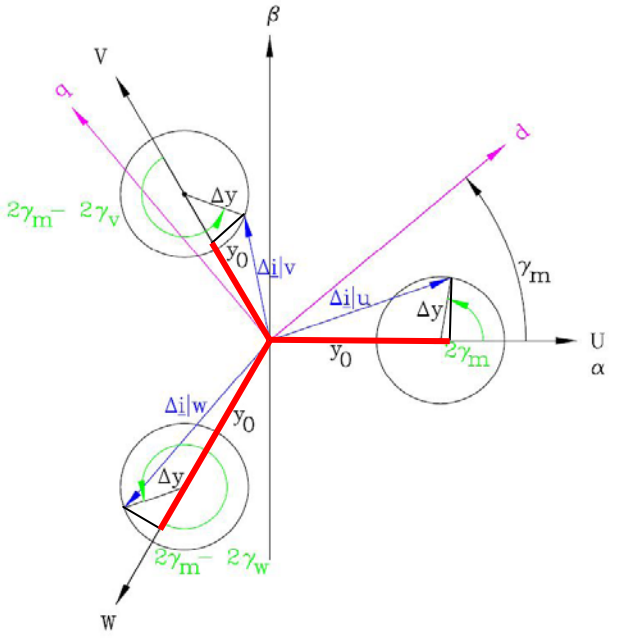


**Bild 1** Ortskurven des Stromanstiegs für 3 Testspannungsraumzeiger, abhängig von der Rotorposition $\gamma_m$.

## 2.3 Umrichter für Low-cost Regelkonzept

Ein vorteilhaftes Konzept für einen Umrichter mit guten Sensorlos-Eigenschaften kombiniert mit einem preiswerten Aufbau ist in folgendem Bild 2 dargestellt. Die gesamte analoge Messung erfolgt potenzialbehaftet, wobei die Analogmasse des Prozessors auf Zwischenkreis-Minus-Potenzial gelegt wird. Damit kann die Strommessung über einen Ohm´schen Shunt erfolgen. Alternativ kann auch eine Drei-Shunt-Messung zwischen den unteren Schalttransistoren und dem Zwischenkreis-Minuspotenzial erfolgen (Bild 4). Misst man den Strom nur mit einem Summen-Shunt, kann die Stromanstiegsmessung für die INFORM-Auswertung nur in der Testspannungszeiger-Richtung durchgeführt werden. Dies entspricht den fett ausgezogenen Linien in Bild 1. Dabei wirkt der Strommessshunt wie ein intelligenter Messstellen-Umschalter.

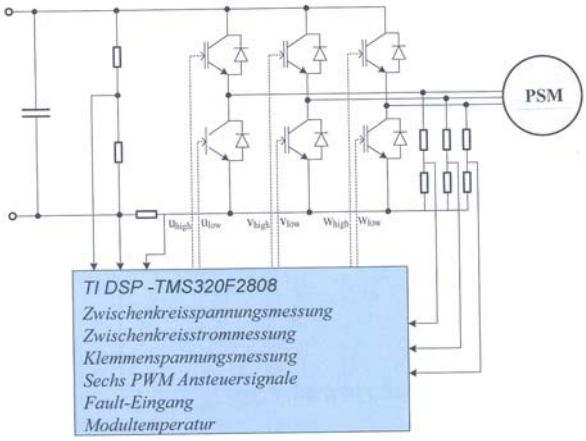


**Bild 2** Low-Cost Hardwarekonzept mit potenzialbehafteter Strom- und Spannungsmessung

Wird beispielsweise der Mess-Spannungsraumzeiger u „1/0/0“ an die PSM gelegt, so erfolgt im Shunt die Messung des Stromes $i_u$, da der gesamte Zwischenkreisstrom über den oberen Schalter der Brücke u in die PSM gelangt. In der komplexen Raumzeigerebene entspricht der Strangstrom $i_u$, der gerade über den Messshunt fließt, der fett eingetragenen waagrechten Linie. Analog erfolgt bei einem Mess-Spannungsraumzeiger v „0/1/0“ über dem Shunt die Erfassung des Stromes $i_v$, in der Raumzeigerebene als fett eingetragene Gerade nach links oben erkennbar. Der große Vorteil dieser Erfassung ist, dass ein immer vorhandener Messfehler im Shunt bei allen Teilmessungen in gleicher Art auftritt und bei der INFORM-Auswertung mathematisch eliminiert wird. Wie in Bild 3 dargestellt, werden die Teilmessungen über eine komplexe Transformation in eine offsetfreie „INFORM-Ortskurve“ übergeführt. Ein Verstärkungsfehler im Shunt verändert den Radius der INFORM-Ortskurve, ein Offset in der Strommessung ergibt ein so genanntes Nullsystem, welches bei der komplexen Transformation

ISBN 978-3-8007-3546-4
© VDE VERLAG GMBH · Berlin · Offenbach

eliminiert wird. Ähnlich wie bei einem Verstärkungsfehler bewirkt eine veränderte Zwischenkreisspannung bei sonst gleichem INFORM-Mess-Timing eine vergrößerte INFORM-Ortskurve. Üblicherweise ändert sich die Zwischenkreisspannung aufgrund des Zwischenkreiskondensators relativ langsam, sodass für die INFORM-Auswertung von einer quasistationären Zwischenkreisspannung ausgegangen werden kann. Nachdem die Winkelinformation unabhängig vom Ortskurven-Radius über eine Arcustangens-Operation gewonnen wird, geht ein geänderter Radius nicht in die Genauigkeit der Winkelerfassung ein. Damit wird die INFORM-Auswertung sehr robust gegenüber Parameterschwankungen.

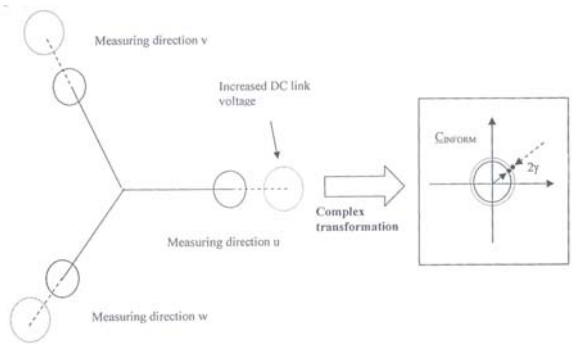


**Bild 3** Komplexe INFORM-Ortskurve, gewonnen aus Teilmessungen [6]

## 2.4 Messungen des dynamischen Verhaltens eines sensorlosen Antriebssystems

Als Beispiel für die zu erwartenden dynamischen und stationären Eigenschaften eines sensorlosen INFORM-Antriebssystems werden nachfolgend Ergebnisse an einem 20 mNm-Innenläufer (Nenndrehzahl 40.000 U/min) mit Luftspaltwicklung präsentiert. Als Variante wird die INFORM-Auswertung auf Basis einer potenzialbehafteten 3-Shunt Messung durchgeführt (Bild 4).

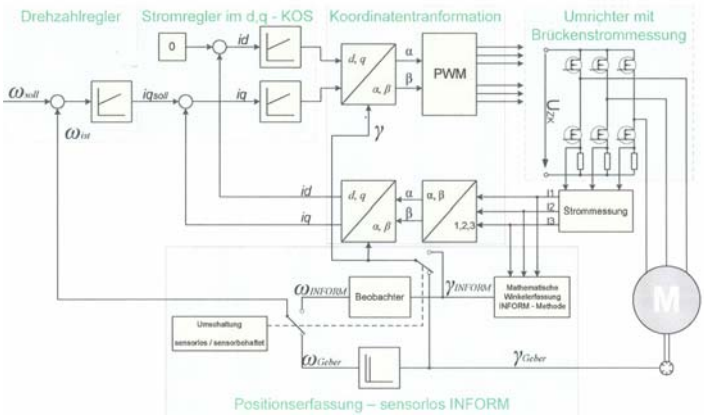


**Bild 4** Sensorloses Regelkonzept, Variante 3-Shunt-Strommessung gegen Zwischenkreis-Minuspotenzial, drehzahlabhängige Umschaltung zwischen INFORM und EMK-Modell. Geber nur zur Verifikation.

Anzumerken ist, dass die INFORM-Auswertung sorgfältig vorgenommen werden muss, da aufgrund der Luftspaltwicklung ein großer Spalt mit einer relativen Permeabilität von $\mu_R$=1 überwunden werden muss. Damit sind die Induktivitätsverhältnisse entlang des Umfanges nur sehr schwach positionsabhängig. Mit dem Konzept einer potenzialgebundenen Shuntmessung kann aber eine ausreichend gute Messqualität und damit eine gute INFORM-Auswertung sichergestellt werden. Als Beispiel ist in Bild 5 die charakteristische INFORM-Ortskurve angegeben (Vgl. Bild 3, rechts).

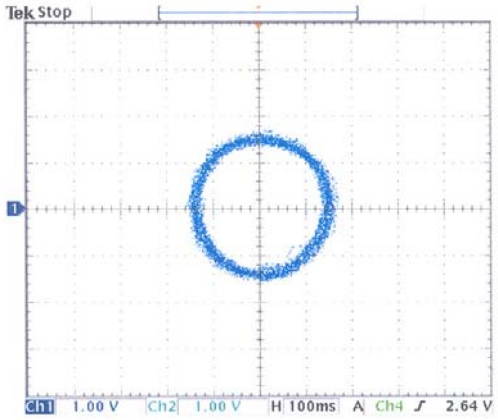


**Bild 5** Gemessene INFORM-Ortskurve $\underline{C}_{INFORM}$ des Motors mit Luftspaltwicklung

Die statistischen Eigenschaften des INFORM-Winkels können anhand von einer Fehlerverteilung im Vergleich mit einem Drehgeberwinkel beurteilt werden. Die näherungsweise Gauss´sche Normalverteilung gemäß Bild 6 weist eine Standardabweichung von ca. 6° (elektrisch) auf. Dies ist für eine Serienfähigkeit ausreichend [7].

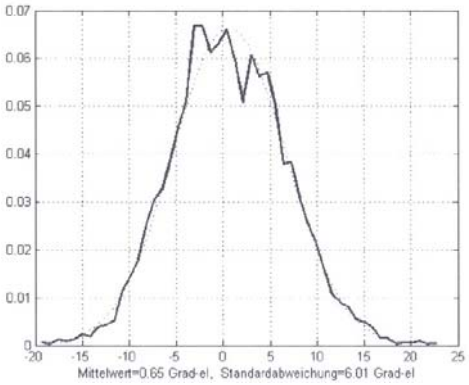


**Bild 6** Statistische Verteilung des Winkelfehlers im Vergleich mit einem Drehwinkelgeber

Das dynamische Verhalten des sensorlosen Antriebs im INFORM-Bereich ist in Bild 7 dargestellt. Dabei wird ein Reversiervorgang von 6.000 U/min (+15% der Nenndrehzahl) auf -6.000 U/min (-15%) durchgeführt.

ISBN 978-3-8007-3546-4
© VDE VERLAG GMBH · Berlin · Offenbach

Der maximal auftretende Strom ist ca. doppelter Nennstrom Das Oszillogramm zeigt den sensorlos ermittelten Winkel, einen Referenzwinkel (nur zur Verifikation) sowie den Drehzahlsollwertsprung und den (geschätzten) Drehzahlverlauf. Der geschätzte und der tatsächliche Winkel weisen nur geringe Differenzen auf. Die Drehzahländerung um insgesamt 12.000 U/min ist in ca. 50 Millisekunden durchgeführt.

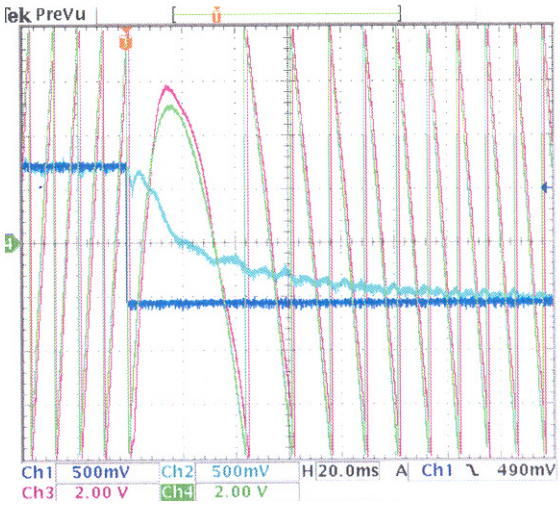


**Bild 7** Drehzahlsprungantwort des sensorlosen Antriebs von 6.000 U/min auf -6.000 U/min.

## 3 Anwendungsbeispiel: 40.000 U/min Dentalantrieb

Auf Basis der oben vorgestellten sensorlosen Regelung wird ein Anwendungsbeispiel aus der Dentaltechnik präsentiert (Bild 8). Dieser Antrieb ist bereits seit einigen Jahren in Serie.

**Bild 8** Sensorloser PSM-Antrieb für Dentalanwendungen [8]

Durch den Einsatz des sensorlosen INFORM®-Verfahrens kann der Arbeitsbereich des Dentalantriebs deutich vergrößert werden (Bild 9), da die untere Einsatzgrenze des Antriebs von 2.000 U/min auf 100 U/min bei gleicher Obergrenze (40.000 U/min) abgesenkt werden konnte und damit ein hoher Kundennutzen entsteht (Einsparung von Gerätewechseln für verschiedene Arbeitsgänge).

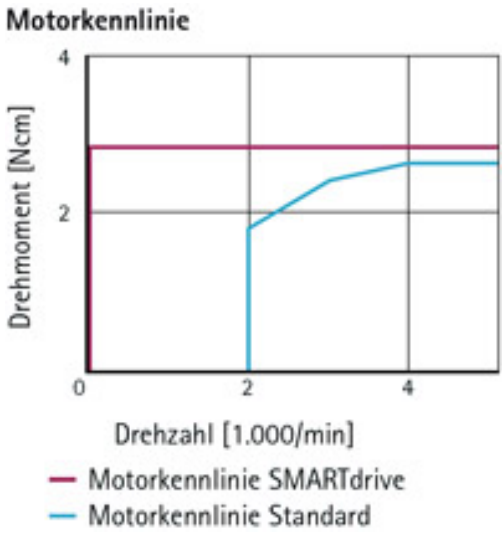


**Bild 9** Erweiterter Einsatzbereich des Dentalantriebs „SMARTdrive®“ durch INFORM®-Verfahren [9]

Ein besonderer Vorteil des sensorlosen PSM-Antriebs ist die Unempfindlichkeit gegen die häufigen Sterilisierungsvorgänge in der Medizintechnik, die bei ca. 140°C durchgeführt werden und die die Lebensdauer der Sensorik stark belasten.

## 4 Anwendungsbeispiel: Typischer Industrieantrieb 2Nm, 4.000 U/min

Seit mehreren Jahren wird das INFORM-Verfahren in typischen Industrieantrieben eingesetzt. Als Beispiel zeigt Bild 10 einen Hilfsantrieb in Druckmaschinen, wo der sensorlose PSM-Antrieb in sehr rauer Umgebung eingesetzt ist. Der Vorteil der PSM in dieser Anwendung ist der deutlich geringere Verlusteintrag in die schlecht gekühlte Umgebung und damit eine einfachere Kühlung im Vergleich zu Asynchonmaschinen, die zuvor verwendet wurden.

**Bild 10** Sensorloser PSM-Antrieb (schwarzer Motor) in einer typischen Industrieanwendung [10]

ISBN 978-3-8007-3546-4
© VDE VERLAG GMBH · Berlin · Offenbach

Die PSM ist mit einem Getriebe ausgestattet, sodass der Antrieb bei einem Durchmesser von 60 mm ein Abtriebsdrehmoment von über 20 Nm leistet. Aufgrund der Anforderung liegt bereits im Stillstand ein hohes Drehmoment an, sodass eine Überlastfähigkeit von ca. 2-fachem Nennmoment nötig und realisiert ist.

## 5 Anwendungsbeispiel: Direktantrieb für Nahverkehrszüge, 3.000 Nm, 1.000 U/min

Für Nahverkehrszüge wurde an der TU Wien im Auftrag eines Industriepartners ein getriebeloser PSM-Außenläuferantrieb gemäß Schema Bild 11 entworfen und in mehreren Varianten aufgebaut (Bild 12, [11]).

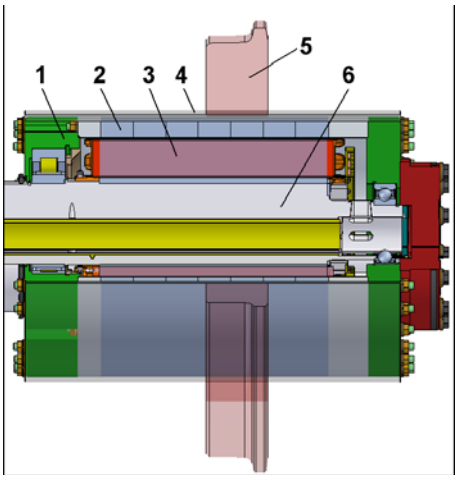


**Bild 11** Querschnitt des 3.000 Nm-Außenläufer-Direktantriebs (1..Lager, 2..PM-Rotor, 3..Stator, 4.. Gehäuse, 5..Rad, 6..Achse) [11]

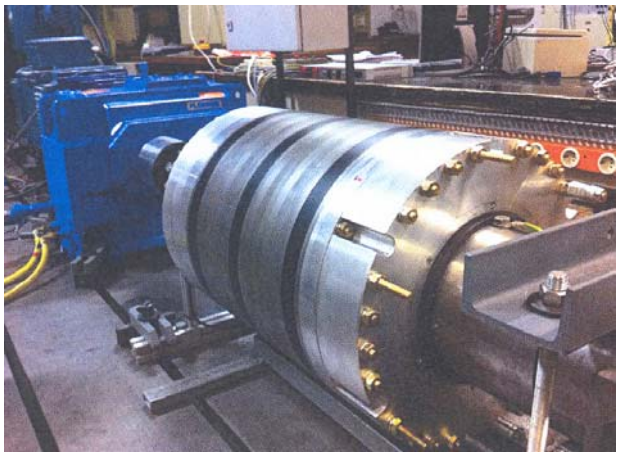

**Bild 12** 3.000 Nm-Außenläufer-Direktantrieb am Prüfstand der TU Wien [11]

Die INFORM-Teilmessungen sowie die INFORM-Ortskurve sind in Bild 13 angegeben. Sie zeigen eine deutliche Abweichung von der theoretischen Kreisform aufgrund der Magnetkreisanordnung. Mit steigendem Laststrom wird die Verzerrung der Ortskurven aufgrund von lokalen Sättigungseffekten größer, wobei die Drehmomententwicklung im sensorlosen Betrieb durch diese Oberwelleneffekte nur unwesentlich beeinflusst wird.

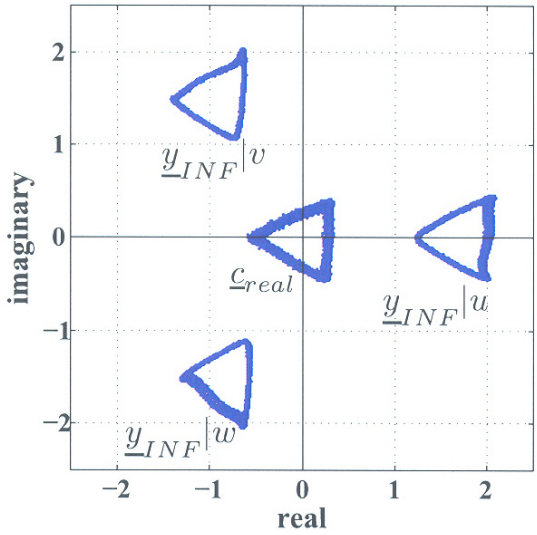


**Bild 13** INFORM-Teilmessungen (analog Bild 1) und charakteristische INFORM-Ortskurve am 3.000 Nm-Außenläufer [12]

Die Belastung wurde bis zum 3-fachen Nennstrom durchgeführt, die Drehmomententwicklung im sensorbehafteten und im sensorlosen Betrieb mit INFORM zeigen eine gute Übereinstimmung (Bild 14).

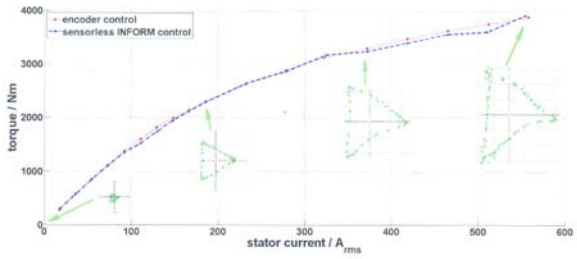


**Bild 14** Vergleich von sensorloser INFORM-Regelung mit sensorbehafteter Regelung am Außenläufer im Überlastbereich mit 3-fachem Nennstrom einschließlich einiger INFORM-Ortskurven bei verschiedenen Lastpunkten [12].

Direktantriebe mit Asynchronmotoren (ASM) sind seit längerer Zeit in Betrieb [13], z.B. in der Straßenbahn in Graz. Da in einem typischen Fahrzyklus der Antrieb über relativ lange Zeit bei geringen Drehzahlen betrie-

ISBN 978-3-8007-3546-4
© VDE VERLAG GMBH · Berlin · Offenbach

ben wird, ist im Falle der Asynchronmaschine mit hohen Verlusten zu rechnen. Vergleicht man die Verluste während eines Fahrzyklus eines PSM- und eines ASM-Direktantriebs (Bilder 15,16), so betragen sie bei der PSM nur ca. 50% im Vergleich mit der ASM-Variante [14].

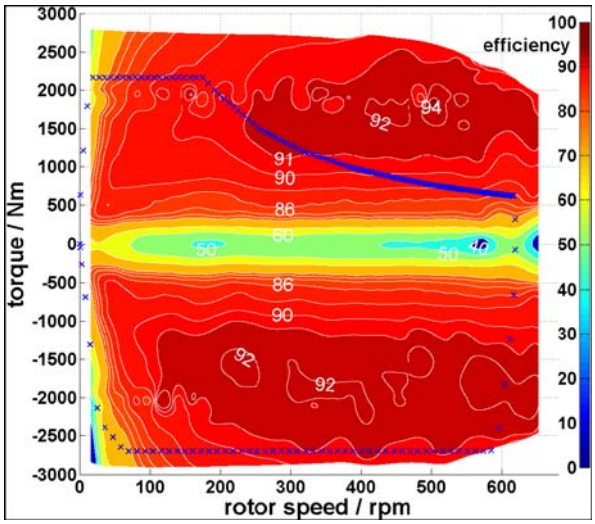


**Bild 15** Wirkungsgradfeld und Fahrzyklus (blaue Kreuze) des PSM-Direktantriebs oben: Treiben, unten: Bremsen [11]

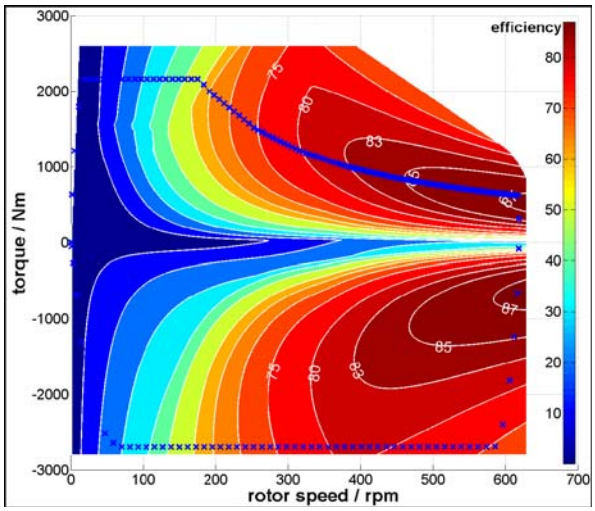


**Bild 16** Wirkungsgradfeld und Fahrzyklus (blaue Kreuze) des ASM-Direktantriebs oben: Treiben, unten: Bremsen [11]

Durch diese enorme Verlustreduktion kann ein wesentlich einfacheres Kühlkonzept realisiert werden.

# 6 Zusammenfassung

Im vorgestellten Bericht konnte gezeigt werden, dass sensorlose PM-Synchronantriebe für eine breite Zahl von Anwendungsfällen die technisch und wirtschaftlich beste Lösung des Antriebsproblems darstellen. Über einen weiten Leistungs- und Drehzahlbereich konnten hochdynamische und überlastfähige Antriebe, teilweise seit längerer Zeit in Serienanwendung, realisiert werden. Das INFORM-Verfahren wird dabei für den Tiefdrehzahlbereich und ein EMK-Verfahren für den Hochdrehzahlbereich eingesetzt. Die Antriebe weisen beste Eigenschaften im Hinblick auf Kompaktheit und Wirkungsgrad auf.

ISBN 978-3-8007-3546-4
© VDE VERLAG GMBH · Berlin · Offenbach

# 7 Literatur


[1] Schrödl, M.: Sensorless Control of A.C. Machines. Habilitationsschrift, VDI Verlag, Reihe 21: Elektrotechnik, Nr. 117, 1992.

[2] Corley, M.; Lorenz, R.: A Rotor Position and Velocity Estimation for Permanent Magnet Synchronous Machines at Standstill and High Speed. IEEE IAS Conference, San Diego (USA), S. 36-41, 1996.

[3] Schrödl, M.: Sensorless Control of AC Machines at low Speed and Standstill based on the "INFORM" method. IEEE IAS Conference, San Diego (USA), S. 270-277, 1996.

[4] Gao, Q.; Asher, G.; Sumner, M.; Makys, P.: Position Estimation of AC Machines over a wide Frequency Range based on Space Vector PWM Excitation. IEEE Trans. Ind. Appl., Nr. 43 (2007), S. 1001-1011.

[5] Linke, M.; Kennel, R.; Holtz, J.: Sensorless Position Control of Permanent Magnet Synchronous Machines without Limitation at Zero Speed. IECON 2002, Sevilla (Spanien), S. 674-679, 2002.

[6] Schrödl, M.: Sensorless Control of PM Synchronous Machines by Evaluation of dI/dt-Measurements. ECPE Workshop "eDrives", Hamburg, May 2011"

[7] Schrödl, M.: Statistic Properties of the INFORM Method in Highly Dynamic Sensorless PM Motor Control Applications Down to Standstill. EPE Journal, Vol. 13, Nr. 3 (2003), S. 22-29.

[8] KaVo Dental Gmbh, D-88396 Biberach: Firmenbroschüre zu COMFORTdrive® (www.kavo.de)

[9] KaVo Dental Gmbh, D-88396 Biberach: SMARTdrive INFORM Technology®, (www.kavo.de)

[10] Preusser, T.: Sensorless IN-FORM-Control of Permanent Magnet Synchronous Machines. EPE Journal Vol. 13, Nr. 3, 2003, S. 19-21.

[11] Schrödl, M.: Permanent Magnet Synchronous Motors in Inner- and Outer Rotor Configurations for Traction Applications. Proceedings A3PS-Conference "Eco-Mobility", Austria Center Vienna, 15. Nov. 2011.

[12] Demmelmayr, F.: Development and Sensorless Control of PM Outer Rotor Traction Machines. Dissertation, TU Wien 2013.

[13] Neudorfer, H.: Radnabenmotoren in Asynchron-Außenläufertechnik für den Antrieb von Niederflur-Straßenbahnfahrzeugen. ZEV + DET Glas. Ann. 125 6/7 2001.

[14] Demmelmayr, F.; Troyer, M.; Schrödl, M.: Advantages of PM Machines Compared to Induction Machines in Terms of Efficiency and Sensorless Control in Traction Applications. IEEE IECON, Melbourne (Australien), S. 2762-2768, 2011.


ISBN 978-3-8007-3546-4 © VDE VERLAG GMBH · Berlin · Offenbach