SENSORLOS GEREGELTE PM-SNYCHRON- UND RELUKTANZMASCHINEN BIS STILLSTAND – ERFAHRUNGEN AUS DER PRAXIS UND NEUESTE ERKENNTNISSE

Manfred Schrödl
Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe
Technische Universität Wien
Österreich

INHALT

- **Inhalt der Präsentation**

  - Einleitung
  - Prinzip der sensorlosen Regelung
    (INFORM®, EMK-Verfahren, geeignete Umrichter)
  - Eigenschaften der sensorlosen Regelung (Genauigkeit, Parameterumempfindlichkeit, Dynamik, Überlastfähigkeit)
  - Anwendungsbeispiele PSM und RM
    (Industrie, Traktion, Medizin,..)
  - Zusammenfassung und Ausblick

EINLEITUNG

- **Einleitung**
  - Großes Potenzial von **SENSORLOSER Antriebstechnik**
  - Stand der Technik: EMK-basierte Verfahren über gewisser Mindestdrehzahl
  - Neueste Erfahrungen im Tiefdrehzahlbereich und Stillstand: **INFORM®-Verfahren**
    (INFORM = INdirekte **F**lusserfassung durch **O**nline **R**eaktanz-**M**essung
  - Innenläufer – Außenläufer /
  - Verteilte Wicklung (genutet und LUFTSPALTWICKLUNG) – Einzelzahnwicklung
  - Höchste Dynamik und Überlastfähigkeit möglich
  - PM-Synchronmaschinen (PSMs):Vorteile betreffend
    - Kompaktheit, Gewicht, Wirkungsgrad
  - (Synchron-) Reluktanzmaschinen (RMs):Vorteile betreffend
    - Robustheit, Materialkosten
  - Anwendungsbeispiele für PSMs, RMs, Magnetlager inklusive Serienanwendungen

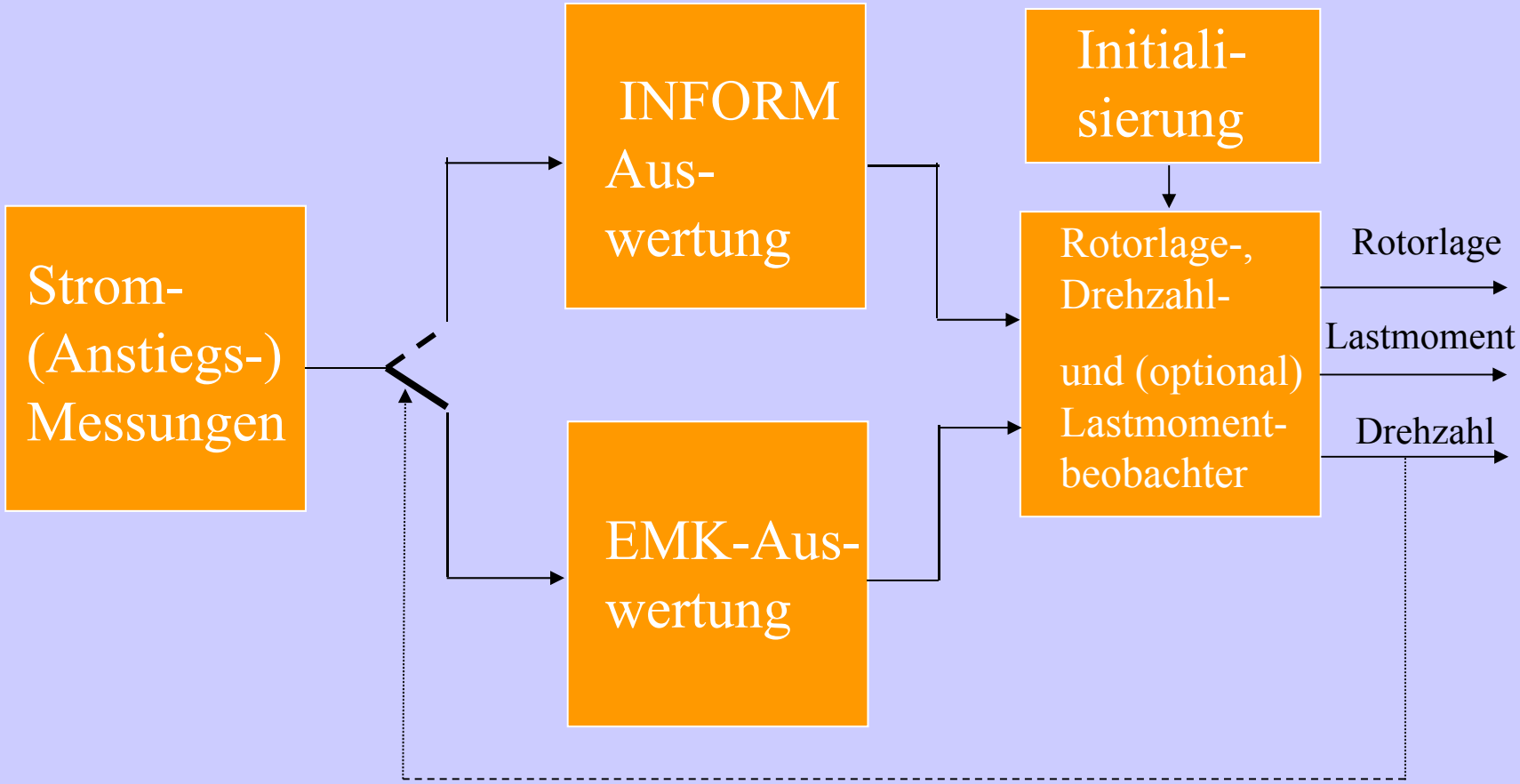
- Prinzip der SENSORLOSEN REGELUNG

Höhere und hohe Drehzahlen (ab ca. 10% der Nenndrehzahl): **EMK-Verfahren**
- Basierend auf induzierter Spannung
- Stand der Technik

Tiefere Drehzahlen und Stillstand: **INFORM®-Verfahren**
- Basierend auf Induktivitätsunterschieden
- Neueste Erkenntnisse und Erfahrungen an Serienprodukten

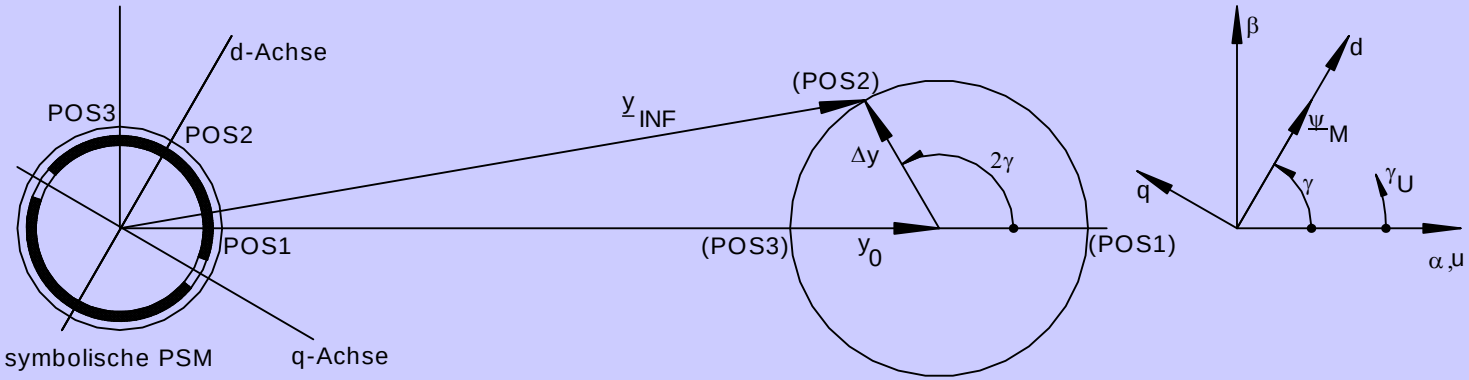
Zusammenwirken von EMK-Modell und INFORM®-Verfahren

unter Verwendung eines einfachen mechanischen Beobachters



• Grundsätzliche Idee des INFORM®-Verfahrens

Anlegen eines Spannungsraumzeigers (betriebsmäßig auftretend oder extra in die PWM eingefügt)
Messung der Strom(anstiegs-)reaktion di/dt
Wir finden eine positionsabhängige Stromreaktion of $\underline{y}_{INF} = d\underline{i}/dt$ aufgrund unterschiedlicher Induktivitäten in d- und q-Achse
Die Stromreaktion hängt von der doppelten Rotorposition 2γ ab (Nord- und Südpol wirken sich gleich auf die Induktivitätsverteilung aus)
Aus den gemessenen Stromantworten (in verschiedenen Raumrichtungen) kann die (doppelte) Rotorposition berechnet werden.



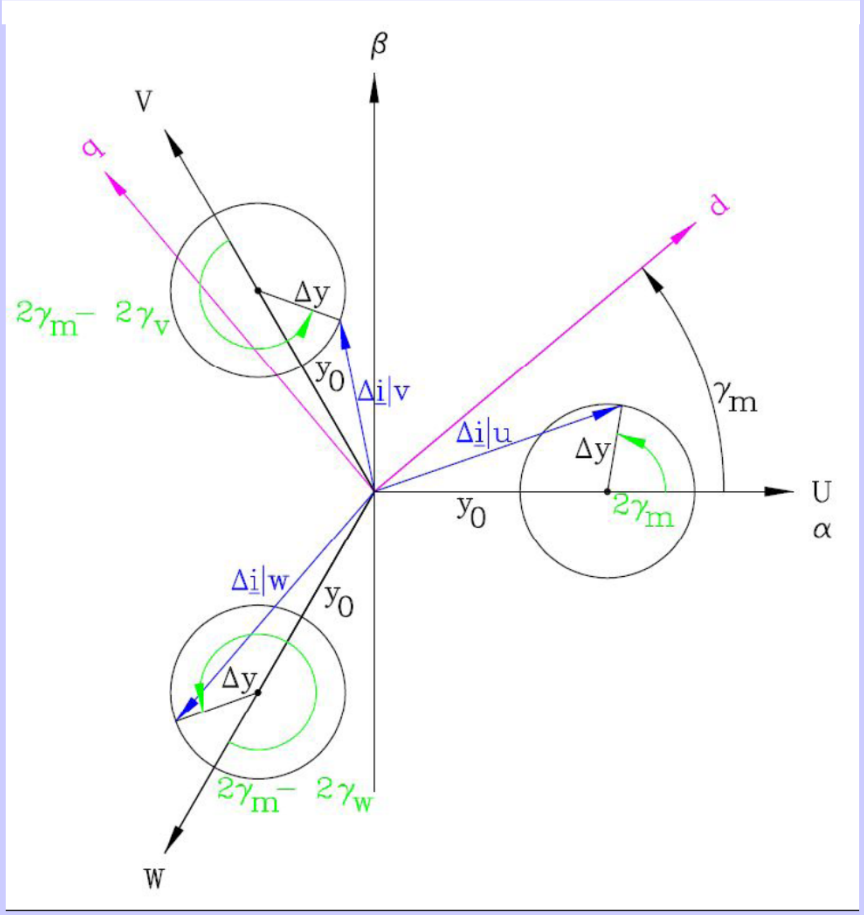
THEORIE INFORM

- Kombination mehrerer INFORM-Messungen in verschiedenen Raumrichtungen

Wir können Test-Spannungsraumzeiger in verschiedene Raumrichtungen (U,V,W) aufbringen.

Aus den Messungen der Stromanstiegsreaktionen di/dt in U,V und W erhalten wir bis zu 6 Gleichungen für die 3 Variablen y_o, Δy and 2γ (bei Verwendung 3er Raumrichtungen)

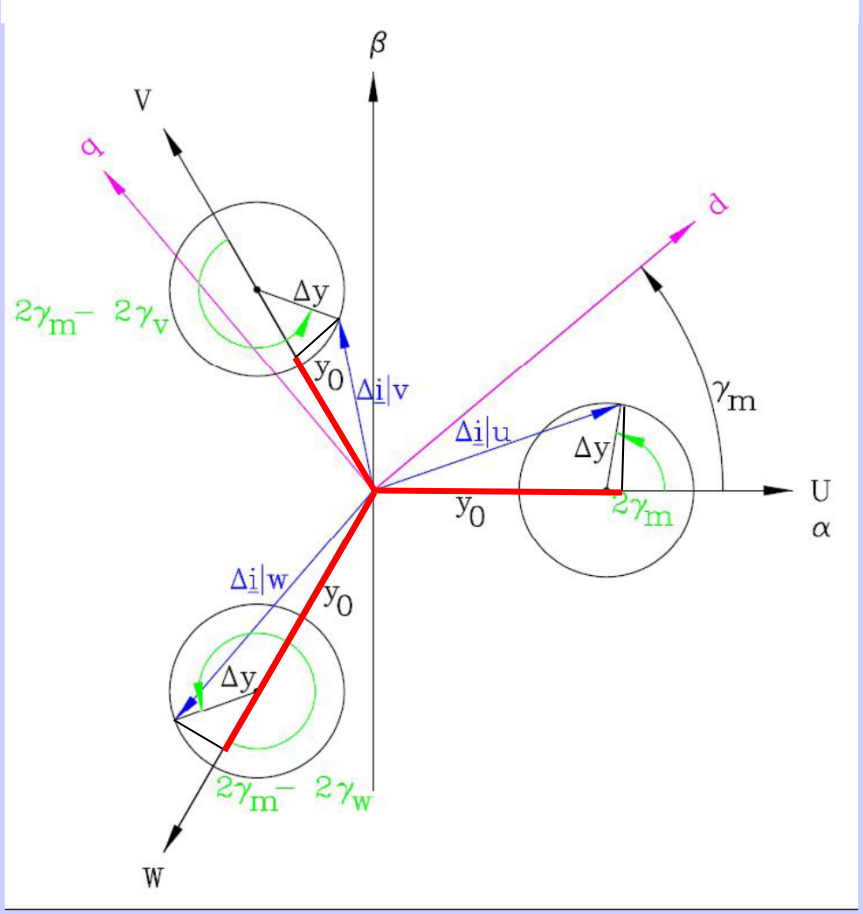
Verschiedene Auswertungen aus einer Untermenge der Gleichungen sind möglich.



- Beispiel: Verwendung einer Untermenge von 3 di/dt-Messungen: „Realteil-Auswertung“

(Es werden nur die Strangströme in Testrichtungen benötigt)

Stromanstiegsmessungen in Testrichtung (Strangstrom u bei Testspannung u usw. – siehe rote Linien im Bild) liefern ausreichende Information zur Berechnung der doppelten Rotorlage 2γ.

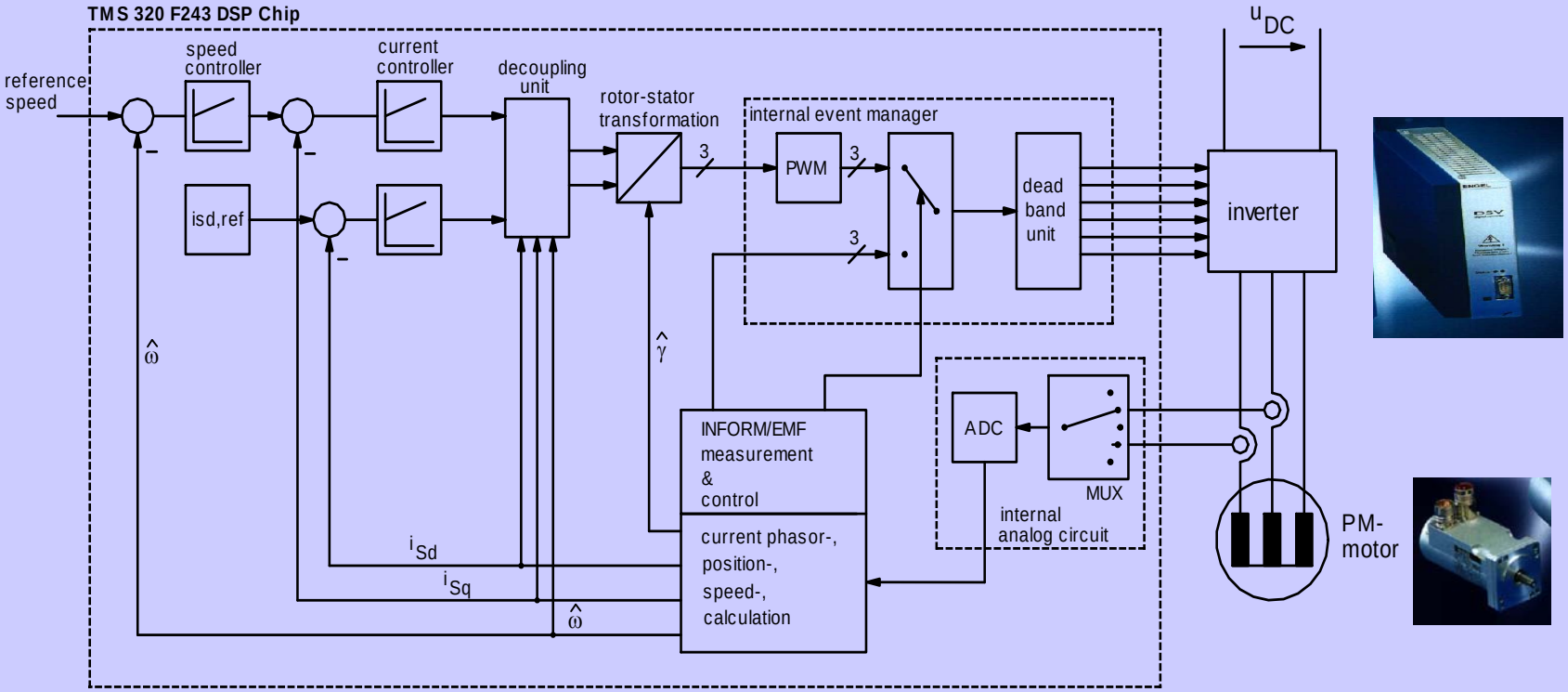


INFORM-HARDWARE: VARIANTE STRANGSTROMMESSUNG

Aufwand der nötigen Steuerungselektronik :

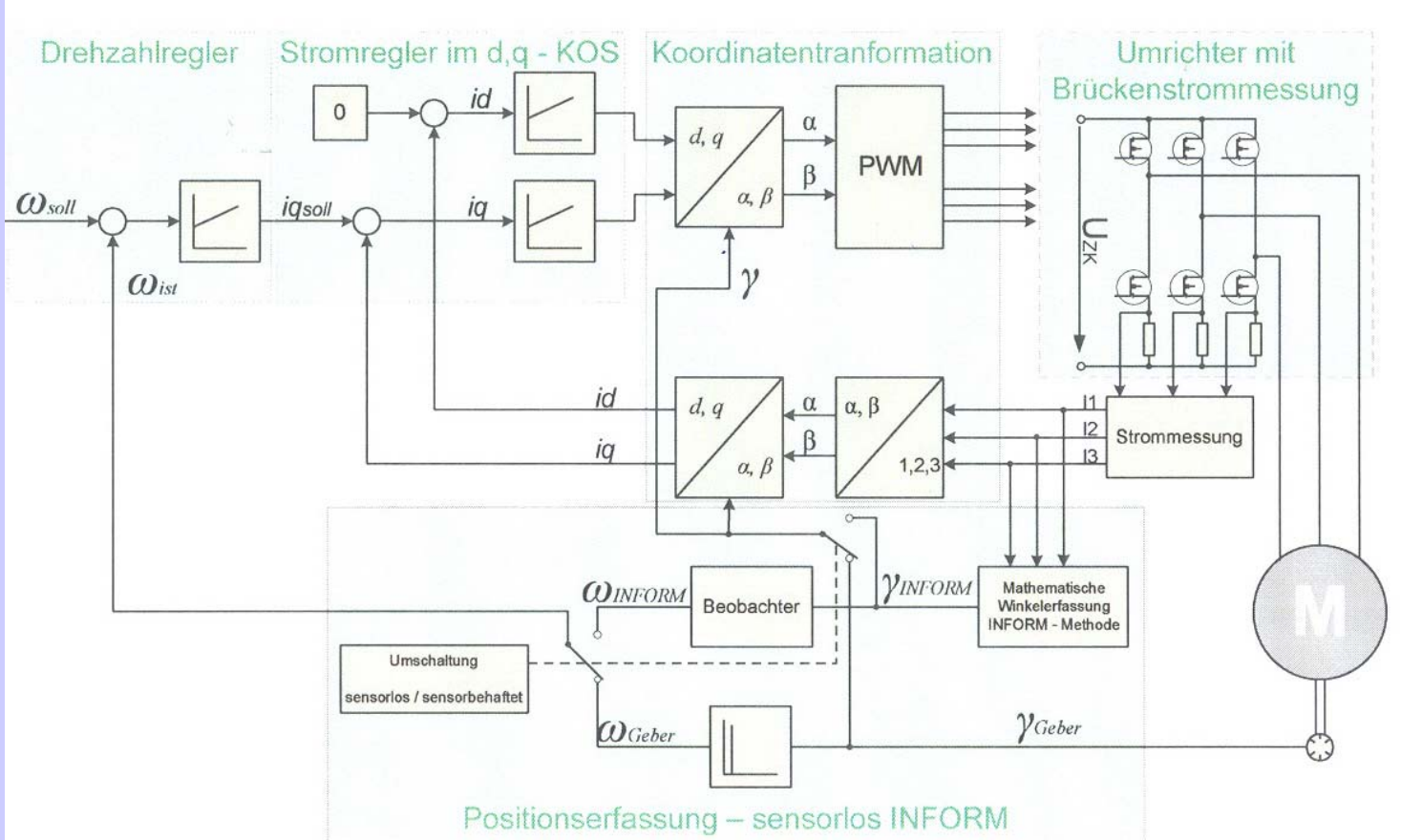
Steuerung im Scheckkartenformat mit 5 Euro-Signalprozessor als „Gehirn“

16-bit Festkomma DSP Rechenleistung sowie 10-bit ADC für Strommessung empfohlen (on-chip am DSP)



Beispiel für drehzahlgeregeltes INFORM-System mit hohem Startmoment und hoher Dynamik

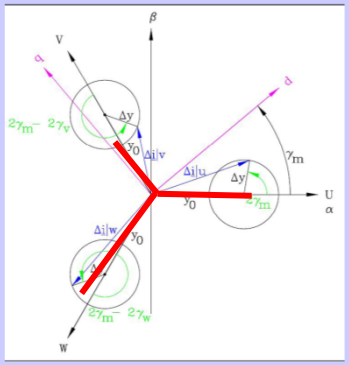
Sensorloses Regelkonzept mit INFORM®, Variante 3-Shunt



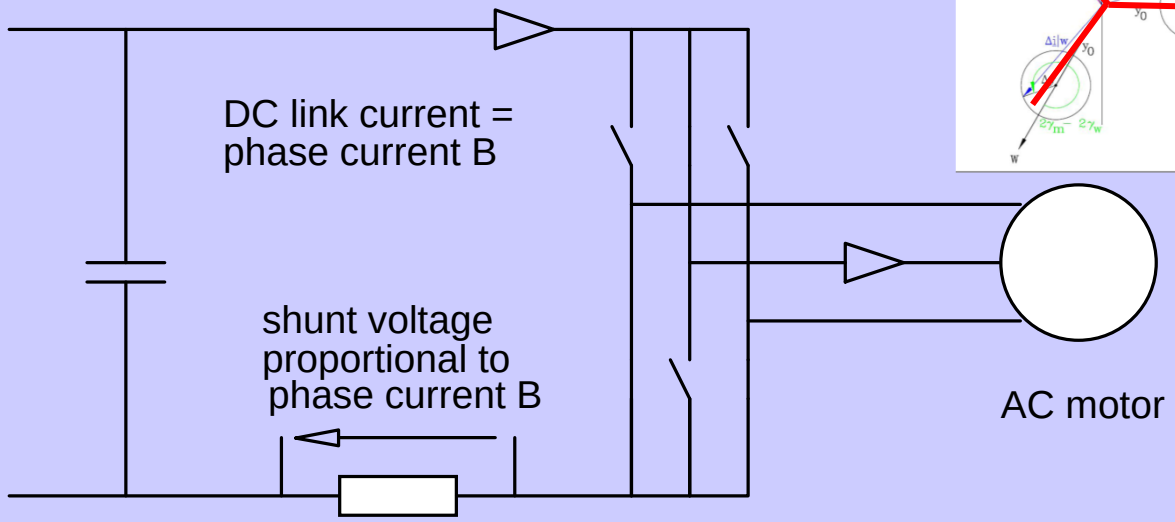
Sensorlose Regelung mit klassischer Feldorientierung,
Variante 3-Shuntmessung potenzialbehaftet gegen Zwischenkreis-Minus.
Geber nur zur Verifikation

- Umrichter für Low-Cost Regelkonzept aufbauend auf der „Realteil-Auswertung“, notwendige Hardware-Struktur

Ein bedeutender Vorteil der INFORM-Variante „Realteil-Auswertung“ ist die einfache Umrichter-Struktur (wie in folgendem Bild dargestellt). Ausschließliche Messung des Zwischenkreisstromes ist ausreichend, weil der Zwischenkreisstrom immer dem Strangstrom in Testrichtung entspricht.
(Es kann natürlich auch eine Hardware mit z.B. 3-Shunt nach Zwischenkreis-Minus verwendet werden)



Beispiel:
Testspannungszeiger B
ist ein 0,1,0-Zeiger



INFORM-HARDWARE: VARIANTE 1-SHUNT- + SPANNUNGSMESSUNG

- Ausgeführte Hardware mit potenzialbehafteter Strom- und Spannungsmessung

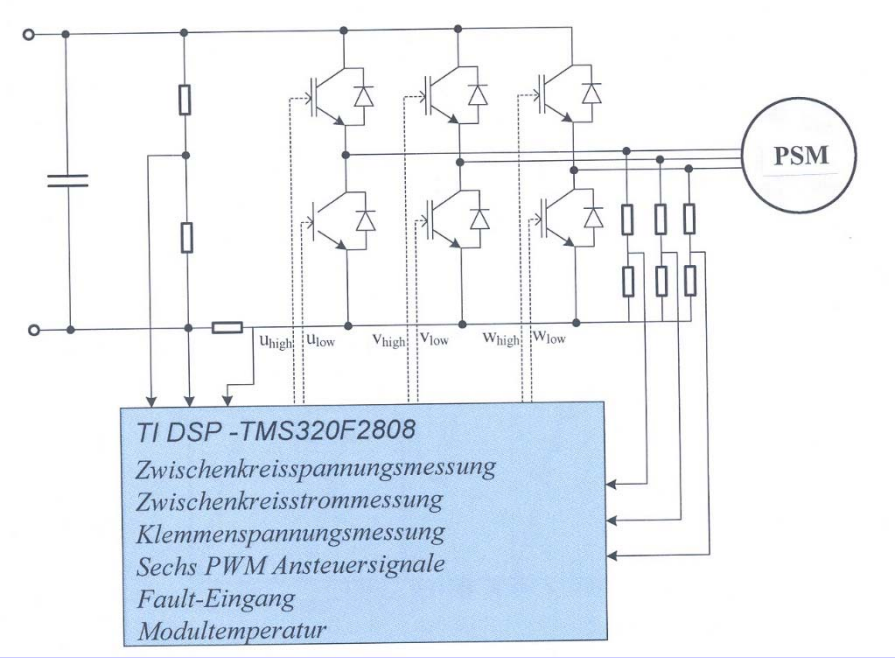
Gesamte analoge Messung potenzialbehaftet

Analogmasse des DSP auf ZK-Minus.

Spannungsmessungen über Spannungsteiler.

Strommessung über ohm´schen Shunt.
(Es kann natürlich auch eine Hardware mit z.B. 3-Shunt nach Zwischenkreis-Minus verwendet werden)

Low-Cost 16 bit DSP, (10-) 12 bit ADC.



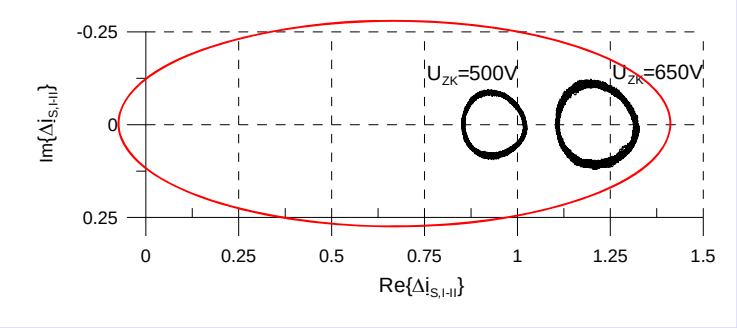
ROBUSTHEIT INFORM

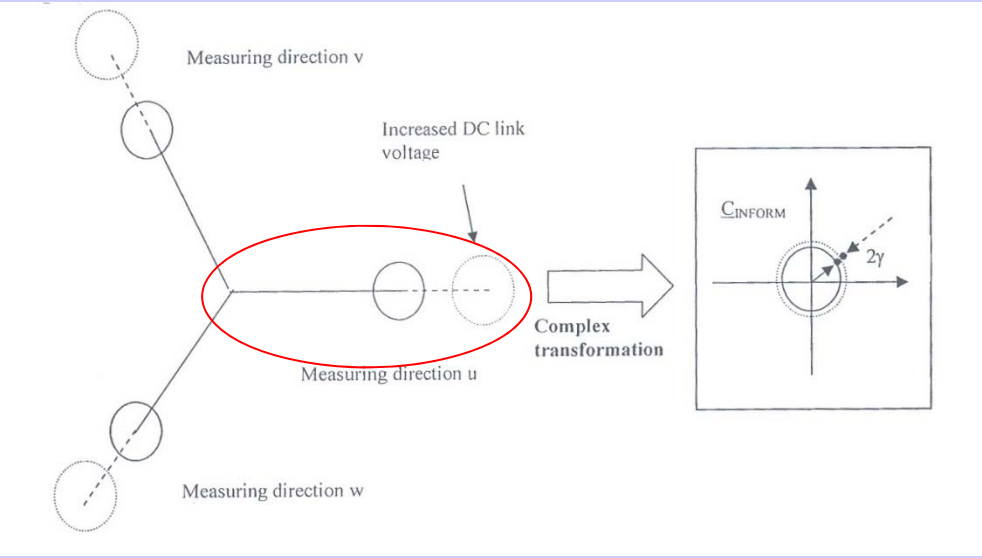
- Unempfindlichkeit von INFORM Messungen gegenüber variierenden Parametern (Zwischenkreisspannung, Temperaturen, Widerstände, Induktivitäten)

Nächstes Bild: 3 INFORM-Stromanstiegsauswertungen bei 2 Zwischenkreisspannungs-Niveaus (100% und 130% U_{ZK}). Durch eine komplexe lineare Transformation der INFORM-Gleichungen wird eine offset-freie INFORM-Ortskurve $\underline{C}_{INFORM}$ erzeugt. Das Argument dieser Ortskurve ist die doppelte Rotorposition 2γ. Dieses Argument wird NICHT BEEINFLUSST durch variable Zwischenkreisspannungen, Induktivitäten, Temperaturen, Widerstände etc.!

Rechtes Bild: Theoretische Kurve $\underline{C}_{INFORM}$.

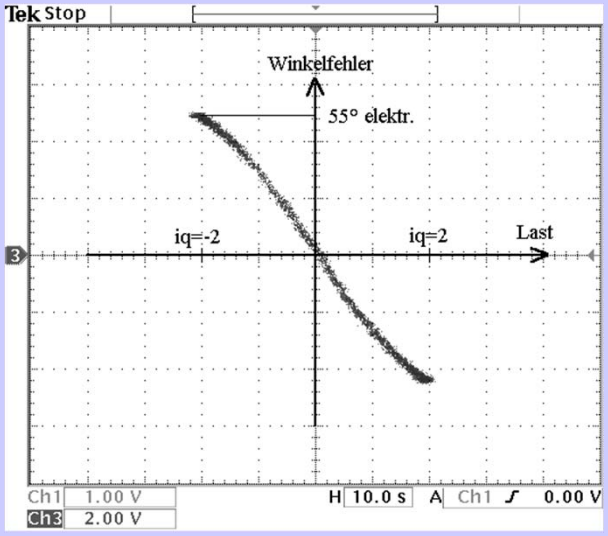
Unteres Bild: $\underline{y}$-Messungen bei Zwischenkreisspannungen von 500 V und 650 V.





LASTABHÄNGIGKEIT INFORM (PSM)

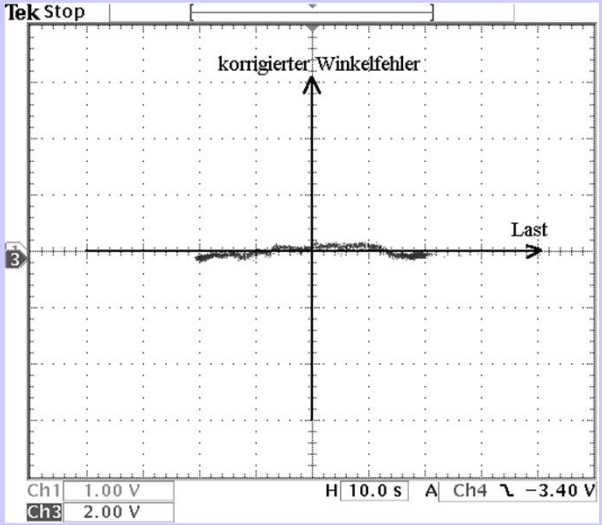
- Lastabhängigkeit der aus INFORM ermittelten Rotorposition



Unter Last: Einfluss der q-Stromkomponente auf die Flussdichteverteilung in der PSM. Dadurch wird die Achse minimaler Induktivität von der d- in Richtung q-Achse verdreht.

Dieser Effekt kann einfach kompensiert werden

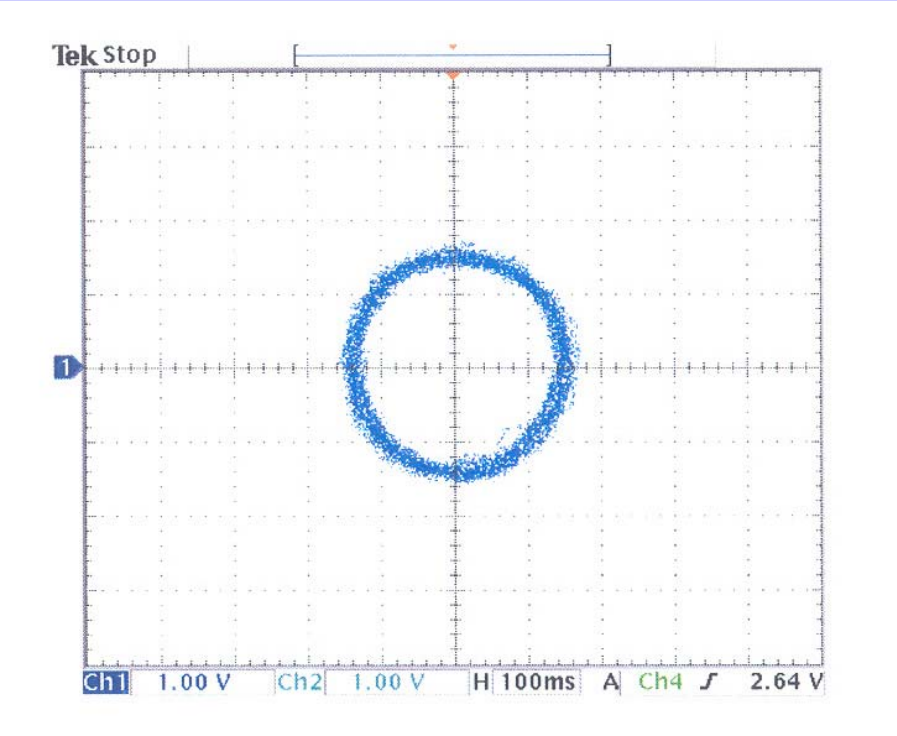
– mit einem q-Strom- abhängigen Korrekturwinkel $\Delta\gamma(i_q)$.

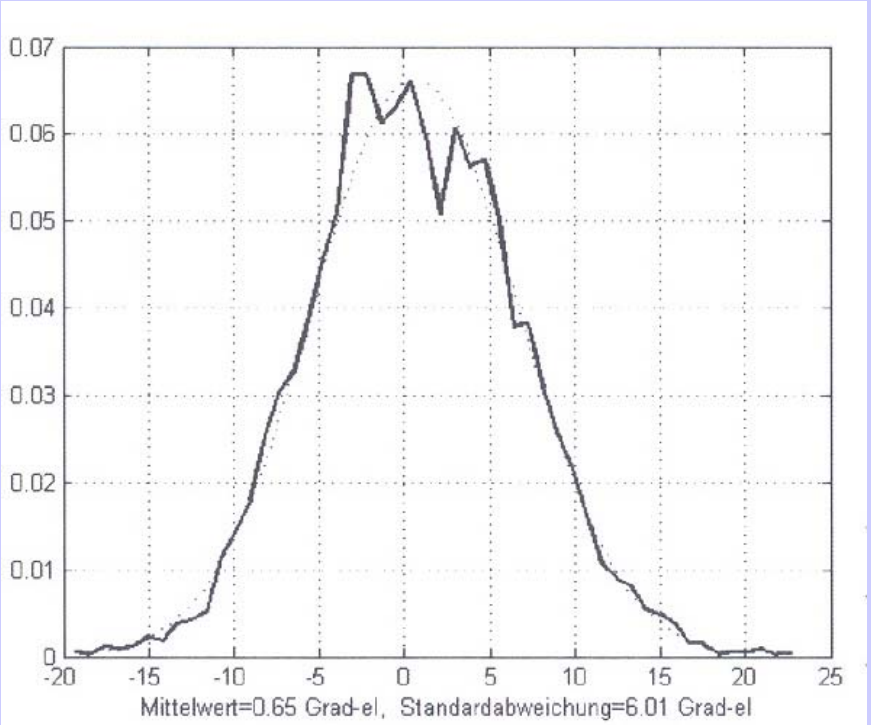


Oberes Bild: Winkelverdrehung 55° (el.) bei doppeltem Nennstrom $i_q = 2$

Unteres Bild: Winkelfehler nach Korrektur ~0° (el.)

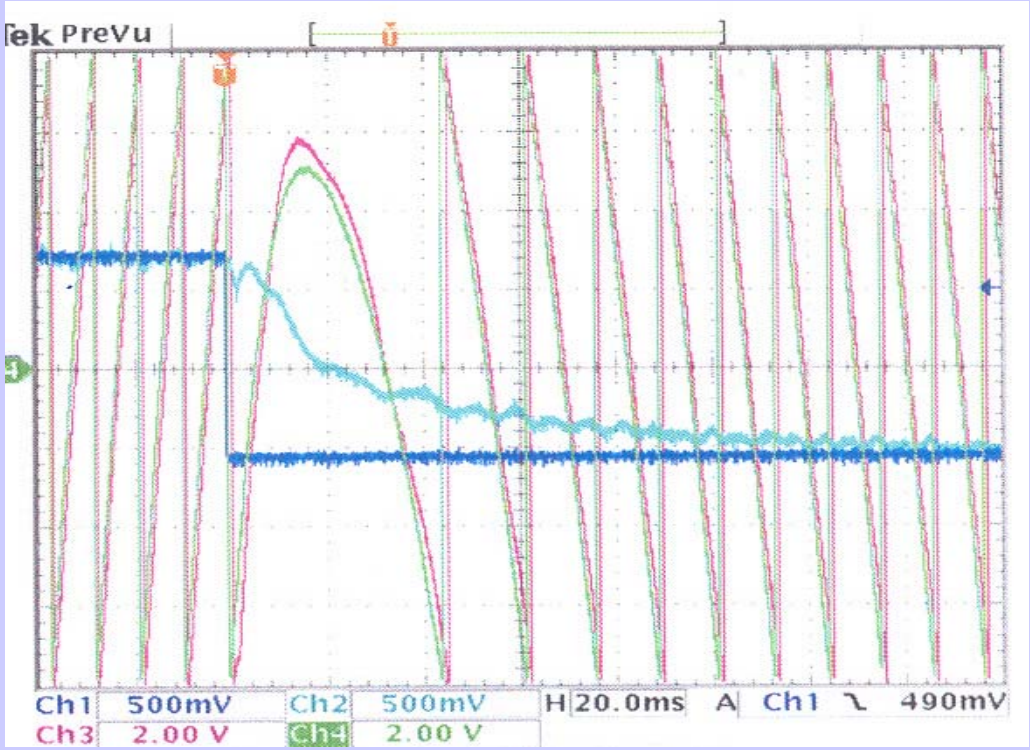
- Erwartete Genauigkeiten des INFORM-Winkels





Links: Gemessene INFORM-Ortskurve $\underline{C}_{INFORM}$ eines Motors mit LUFTSPALTWICKLUNG.
Rechts: Statistische Verteilung des INFORM-Fehlers, Erwartungswert 6 Grad (elektrisch).

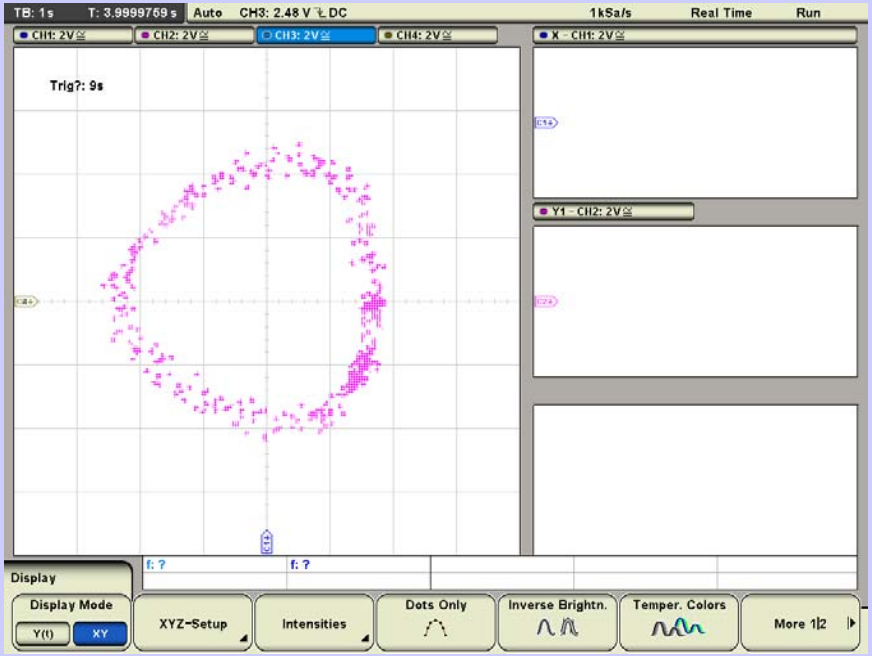
Beispiel für erreichbare Dynamik: Drehzahlsprung von 6.000 U/min auf -6.000 U/min in 50 Millisekunden – Motor mit Luftspaltwicklung, doppelter Nennstrom

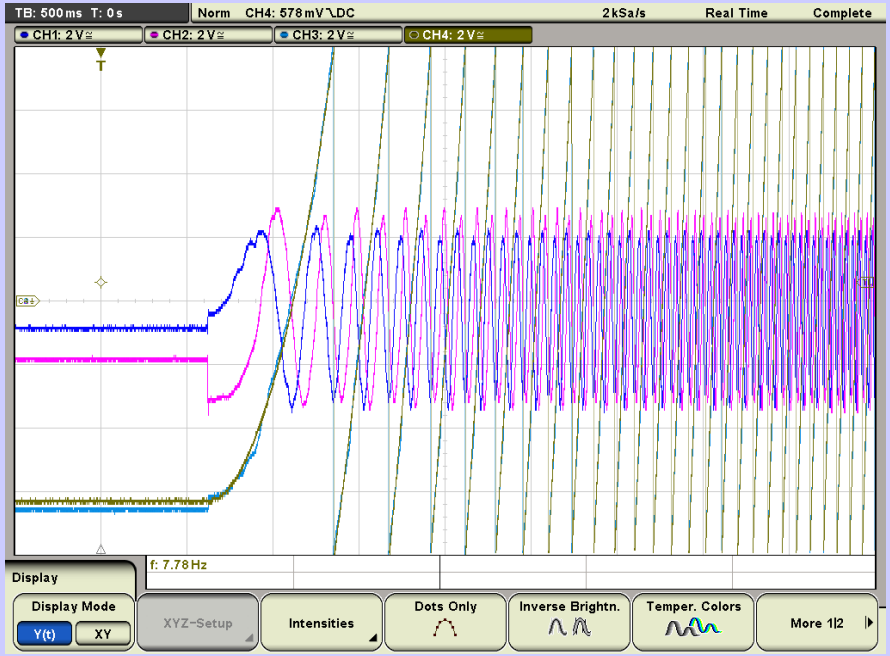


Links: Drehzahl + 6.000 U/min (Sollwert dunkelblau, Istwert aus Beobachter hellblau), Rechts: Drehzahl -6.000 U/min.
Geschätzter (rot) und zwecks Verifikation gemessener Winkel (grün)
Reversiervorgang mit doppeltem Nennstrom i_q=2, Dauer ca. 50 Millisekunden

EIGENSCHAFTEN INFORM UND DYNAMIK BEI DER RM

- Verlauf der INFORM-Ortskurve (links) und Winkel während Hochlauf (rechts)





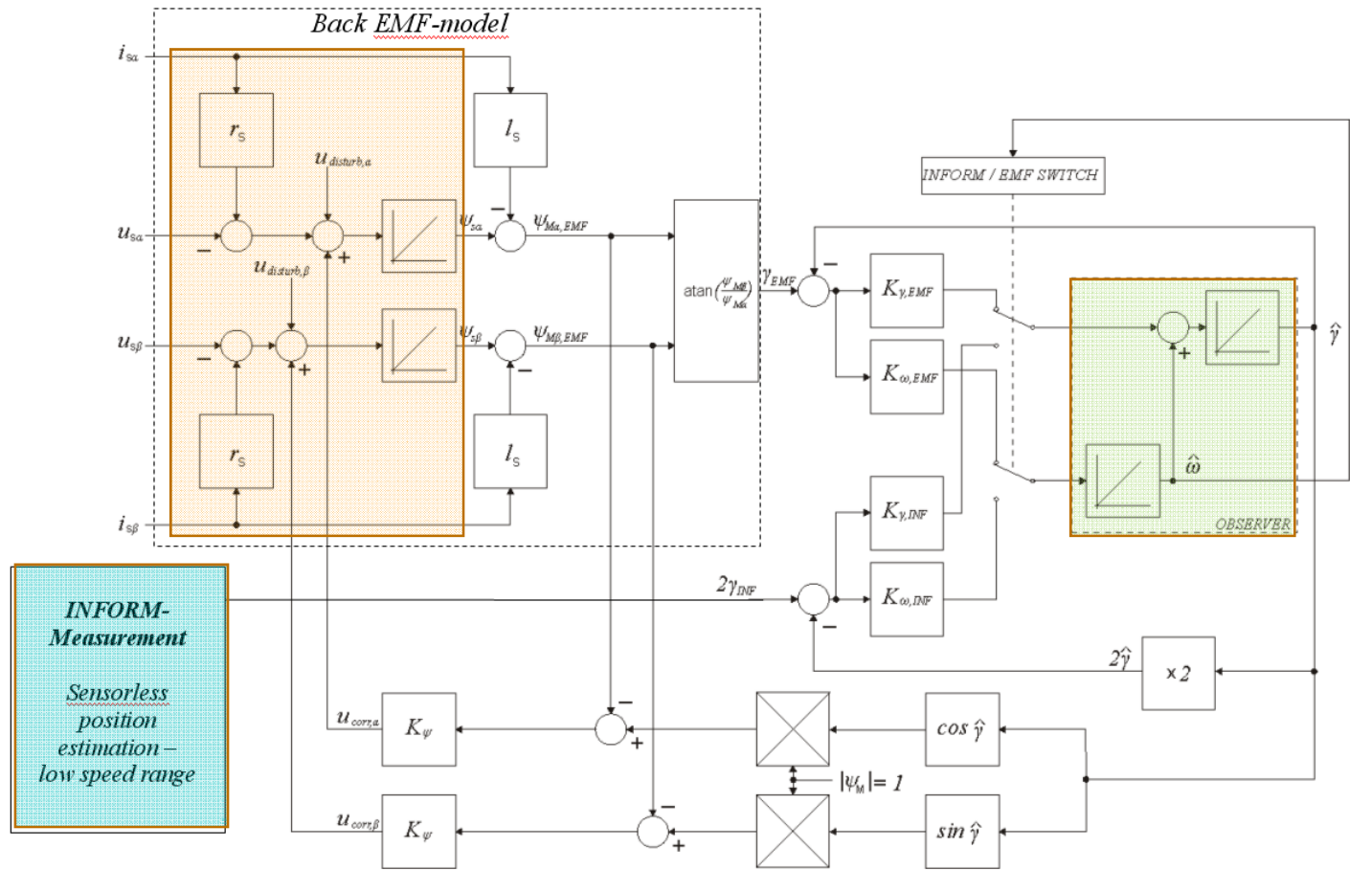
Links: Gemessene INFORM-Ortskurve $\underline{C}_{INFORM}$ eines 80 Nm-Reluktanzmotors
Rechts: Regelung auf INFORM / EMK, Vergleich mit Geberwinkel sowie Komponenten der Ortskurve

Prof. M.Schrödl
TU Wien

INFORM-EMK-BEOBACHTER (PSM)

Praxisforum
Elektrische
Antriebstechnik
Würzburg
25.3.2015

Struktur des Zusammenwirkens INFORM – EMK-Modell – Beobachter

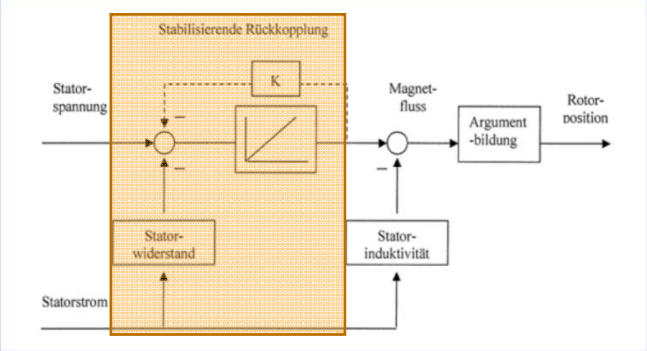


Prof. M.Schrödl

TU Wien

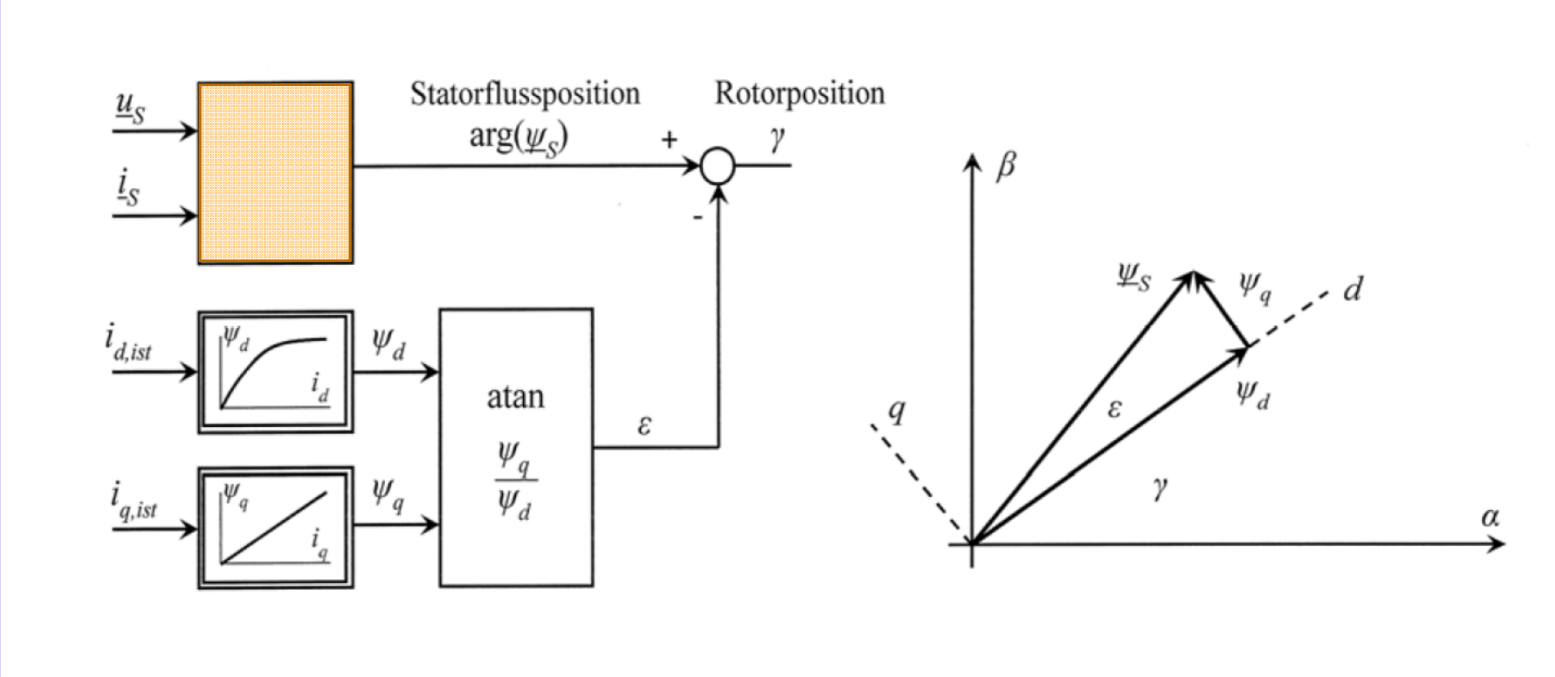
EMK-MODELL BEI RELUKTANZMASCHINEN

Praxisforum Elektrische Antriebstechnik Würzburg 25.3.2015



Bei PSM: Bestimmung der Statorflussverkettung (orange), daraus Permanentmagnetfluss, daraus Rotorposition (links)

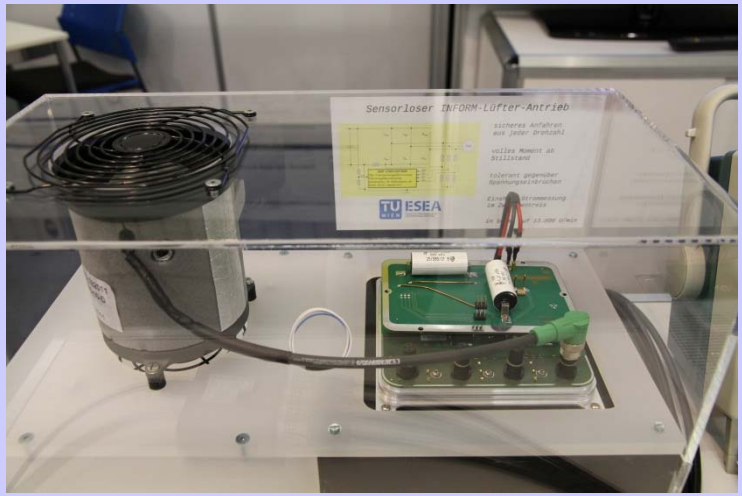
Bei RM: Bestimmung der Statorflussverkettung (orange), dann aus Induktivitäten und Stromkomponenten: Bestimmung des Winkels ε, daraus Rotorposition (unten)



HOCHDYNAMISCHE INFORM DRIVES (PSM)

- **Hochdynamischer INFORM Drive**:
  - Hochlauf aus Stillstand mit höchster Dynamik
  - Z.B. 0-14.000 U/min in 100 Millisekunden
  - Beliebiges Aufsynchronisieren auf jede Drehzahl inkl. Stillstand
  - Volles Losbrechmoment (mehrfaches Nennmoment)
  - **Strommessung über Ein-Shunt** im Minuszweig des Zwischenkreises

Oben: Hochdynamischer INFORM-Antrieb mit Ferrit-Glockenläufer



Rechts: Hochdynamische Industrieanwendung mit professioneller Elektronik

INFORM FÜR NIEDERSPANNUNG BATTERIEANWENDUNG 48 V /40 A

Low-Cost-Lösung mit Einshunt-Strommessung

Volle Stromrekonstruktion

Umrichter auf Uzk- - Potential

Volles Drehmoment ab Stillstand

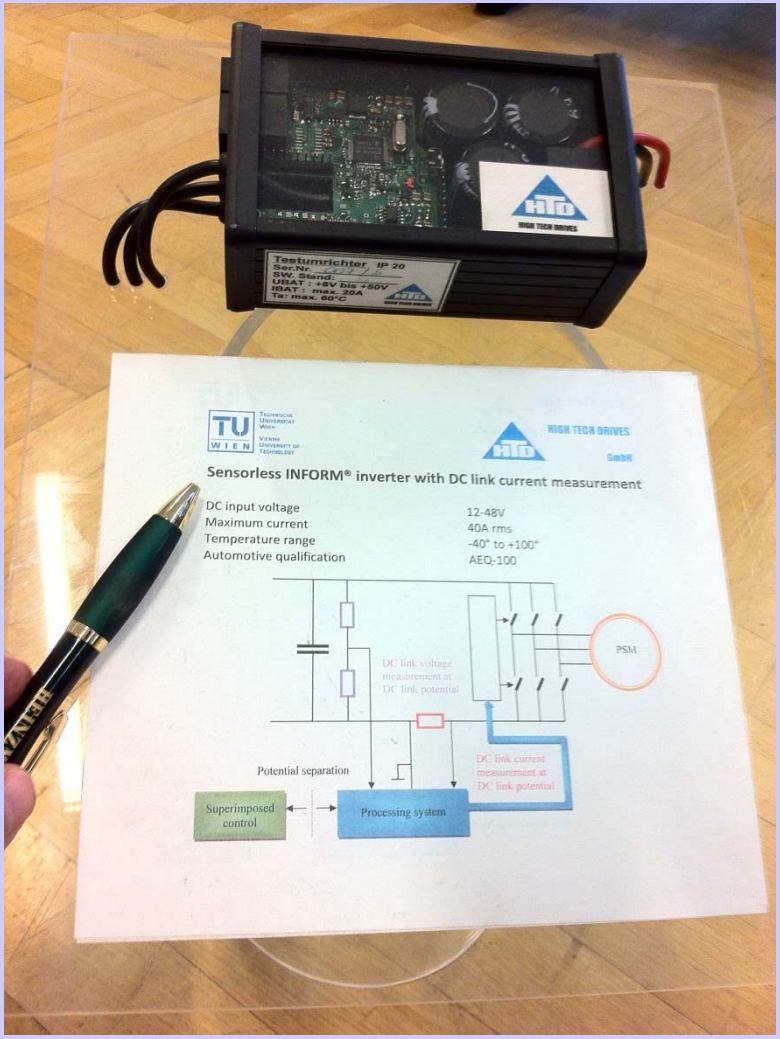
Anwendung:

Automotive und Industrie

-Aufschalten auf rotierende Maschine möglich

-BLDC- oder Sinus-Stromführung

Kombination INFORM + EMK

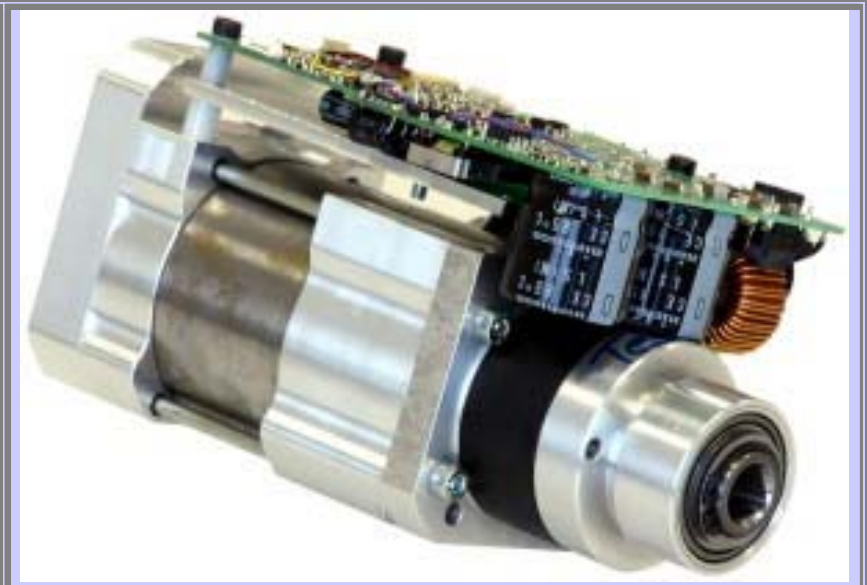


INFORM-KOMPAKTANTRIEB FÜR WERKZEUGE

- **Kundenanforderung**:
  - Möglichst kompakter, drehzahlregelbarer Getriebemotor
  - volles Moment im Stillstand
  - höchste Verfügbarkeit
- **Lösung**:

Antriebssytem für handgeführtes Werkzeug

Dargestellt ist ein Getriebeantrieb basierend auf den Standardprodukten BSR3750 und GP56. Gewicht zu sparen wurde in dieser Ausführung auf das Druckgußgehäuse des Motors verzichtet. Das Getrieb wurde auf mit einer Polygon- Innenverzahnnug nach DIN32711 ausgeführt. Der ebenfalls kundenspezifisch realisierte digitale Umrichter betreibt den Motor im sensorlosen "INFORM"- Betrieb nach Prof. Schrödl.

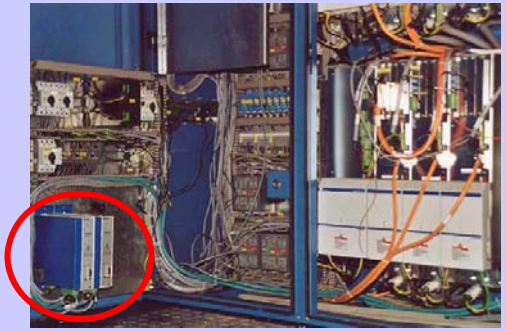


Anwendungsbeispiel: 20 Nm @ 0-200 U/min Industrieantrieb (Hilfsantrieb in Druckmaschinen)

PSM mit Getriebe (schwarzer Motor im mittleren Bild) Motordurchmesser <63 mm, Drehzahlbereich 0-200 U/min, Drehmoment ab Stillstand über 20 Nm

Klassischer Industrieumrichter, adaptiert für INFORM

Vorteil: Betrieb in rauer Umgebung ohne gute Kühlung, volles Drehmoment ab Stillstand, bester Wirkungsgrad, geringste Verluste im Antrieb.

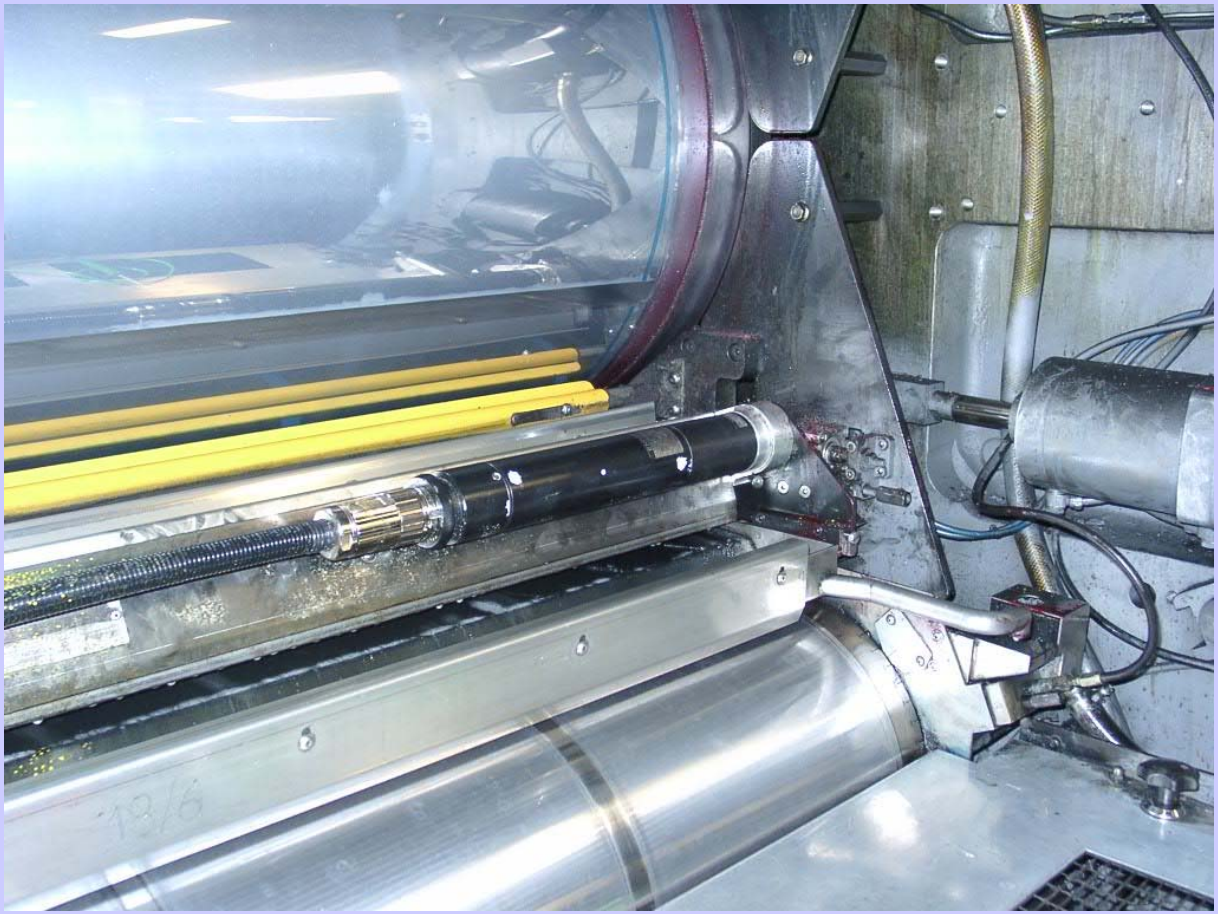


Prof. M.Schrödl

TU Wien

BLICK HINTER DIE KULISSEN (Druckmaschine - Hilfsantrieb)

Praxisforum Elektrische Antriebstechnik Würzburg 25.3.2015

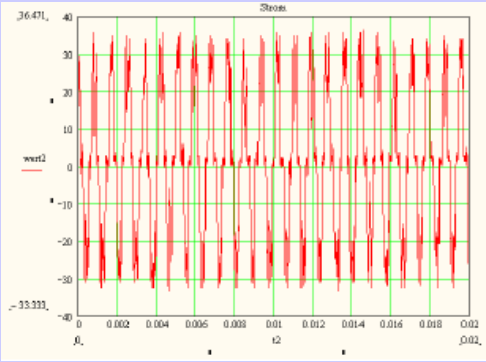


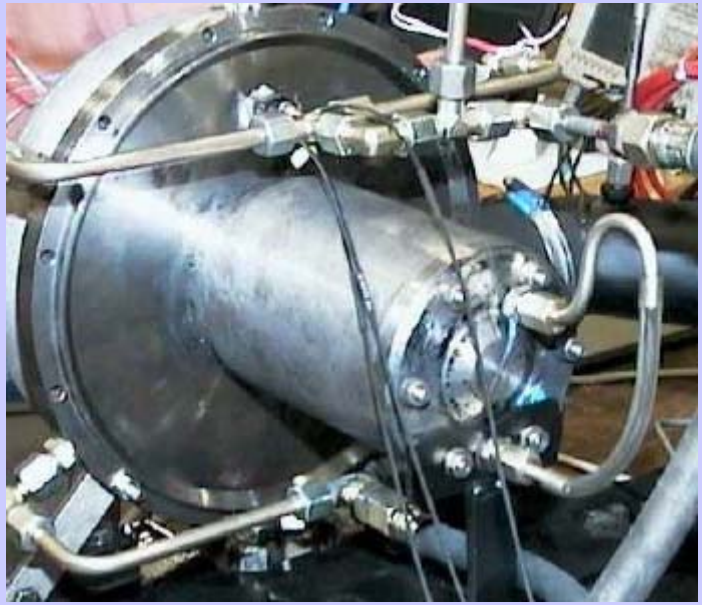
HOCHDREHZAHLANTRIEB FÜR AUTOMOTIVE-ANWENDUNG

- **Kundenforderung**:
  - Sensorloser Antrieb für Strömungsmaschine
  - Drehzahl : >80.000 U/min
  - Leistung: >10 kW

Rechts:
Strom bei

80.000
U/min



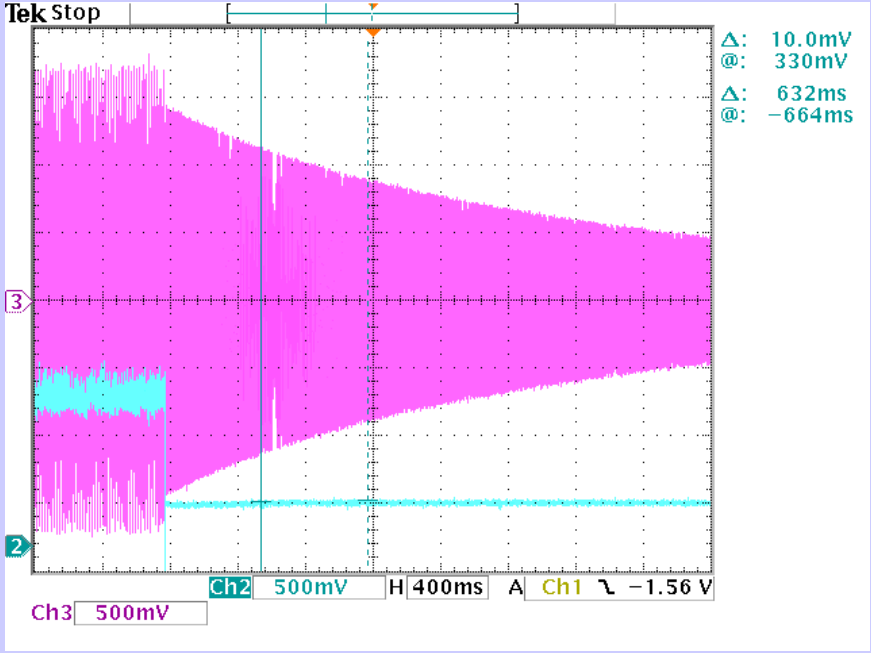


Zusammengebautes High-Speed-Aggregat

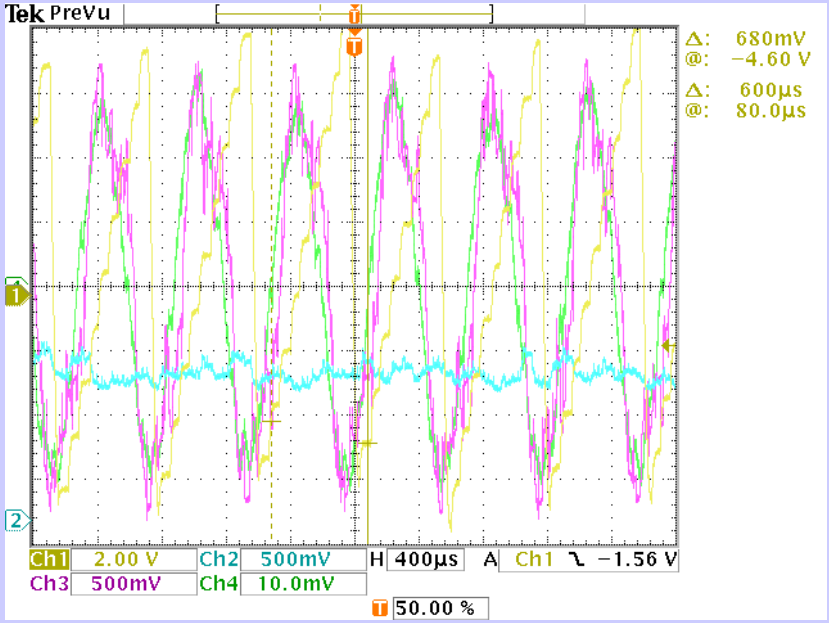
Entwickelter Rotor ohne Armierung

HOCHDREHZAHLANTRIEB: BETRIEB BEI 100.000 U/MIN

- **Test bei 100.000 U/min**
  Leistung 14 kW



Auslaufversuch von 100.000 U/min



Induzierte Spannung, Strangstrom und geschätzte Lage bei 100.000 U/min

- **Test bei 105.000 U/min**

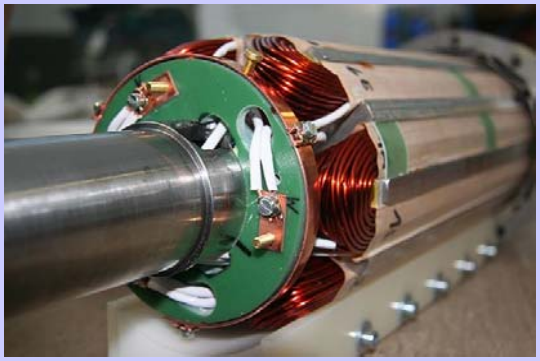
.. Grenze erkannt

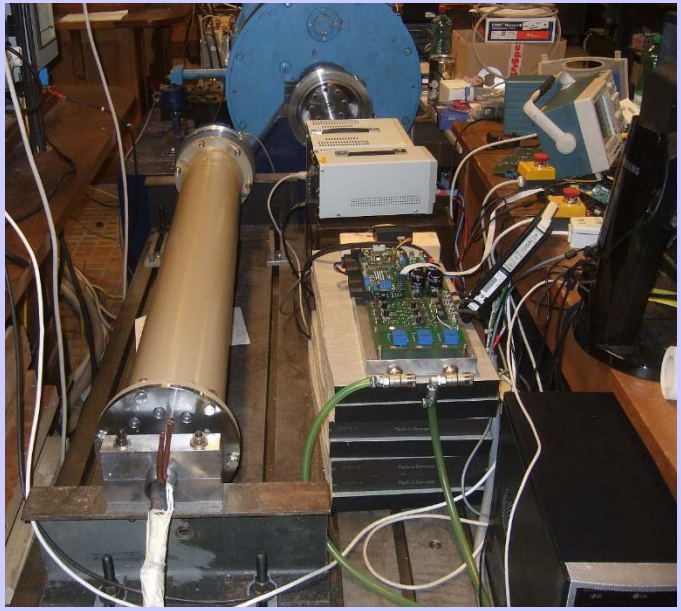
Prof. M.Schrödl

TU Wien

ROHRANTRIEB FÜR GETRIEBELOSEN AUSSENLÄUFER

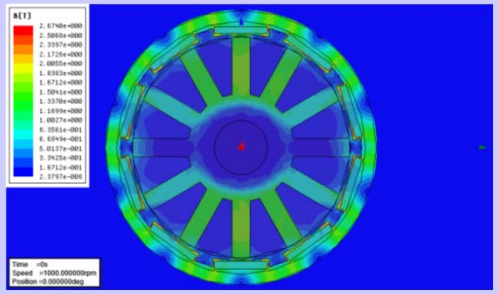
Praxisforum Elektrische Antriebstechnik Würzburg 25.3.2015





Volles Moment von 0-1.000U/min
200 Nm ab Stillstand
Getriebelose Lösung
20 kW bei 1000 U/min

Links: Umrichter (wassergekühlt)
Rechts: FEM-Motorauslegung (Heissenberger et al.)



DIREKTANTRIEB FÜR RADNABENMTOROREN

Drehmoment ab Stillstand ca. 600 Nm mit INFORM Konstantleistung ab. ca 300 U/min (Feldschwächung bis ca. 1000 U/min) – EMK-Bereich

Spannung ca. 400 V
Steuerung: TU Wien
Motor: TU Wien

Außenläuferbauform

Getriebeloser 3000 Nm Direkt-antrieb für Nahverkehrszüge

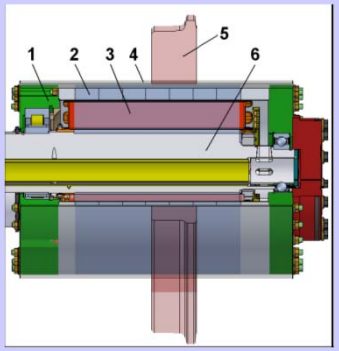
Konstruktion und Aufbau an der TU Wien

Außenläufer mit Einzelzahnwicklung
Betriebsbereich 0..200..(800) U/min
Feldschwächung ab ca. 400 U/min

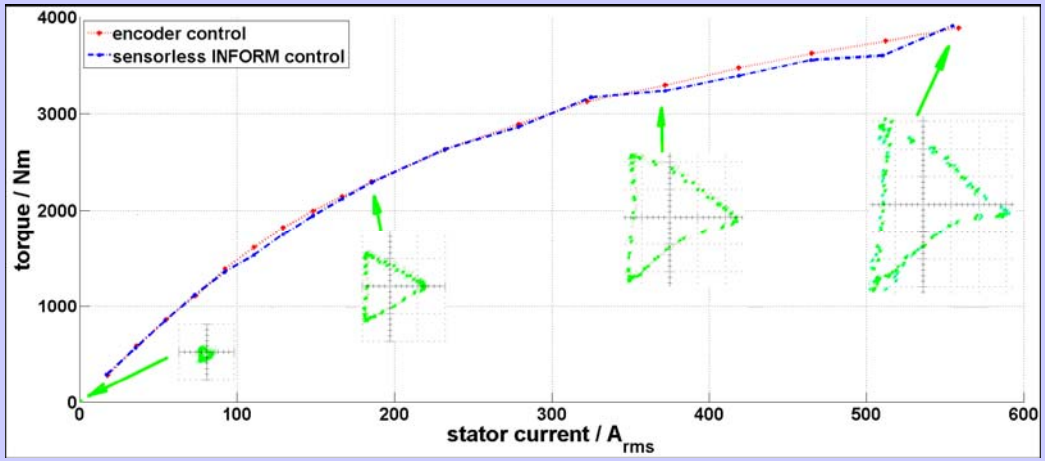
Drehmoment bis 4.000 Nm ab Stillstand (Gefahrenbremse)

Rechts unten: INFORM-Kurven bis zu 3-fachem Nennstrom, sowie

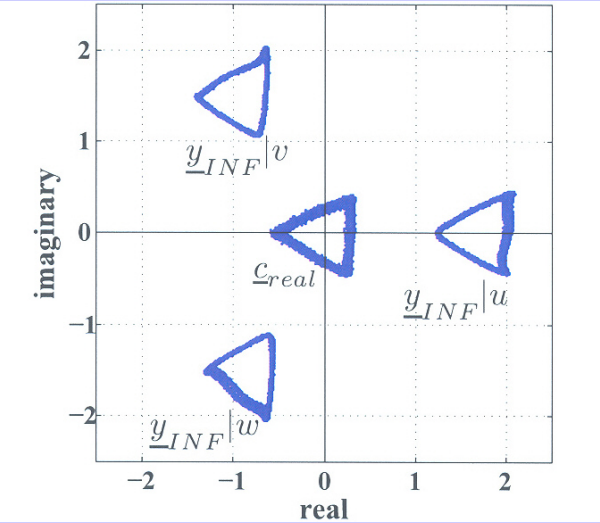
Vergleich Geberregelung / INFORM



Querschnitt und Aufbau der 3.000 Nm-Außenläufer-PSM



3000 Nm Direktantrieb Vergleich der Verluste mit Asynchronmotor-Variante



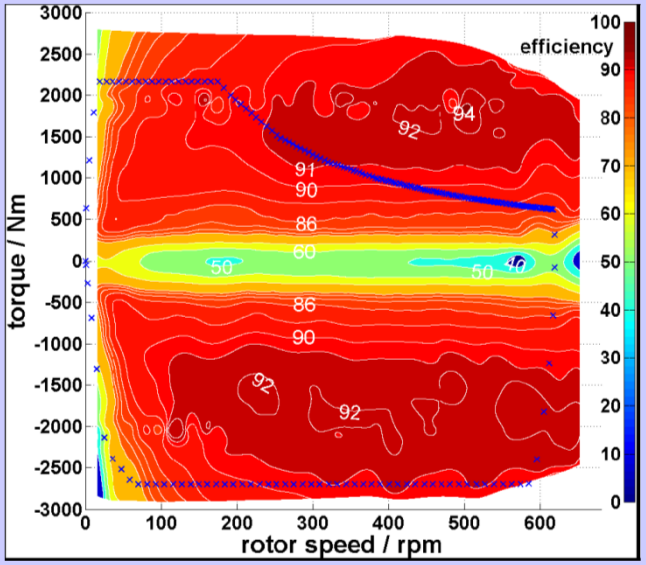
INFORM-Teilmessungen und charakteristische INFORM-Ortskurve

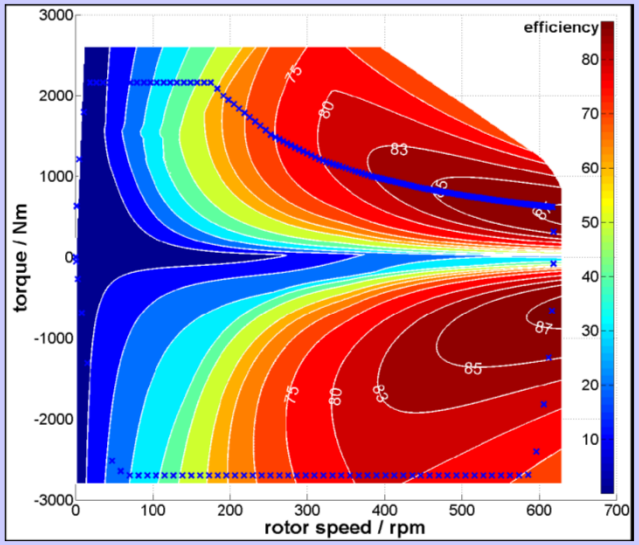
Oben: Wirkungsgradkurve PSM über gesamtem Betriebsbereich

Unten: Wirkungsgradkurve einer analogen Asynchronmaschine

Blaue Betriebspunkte: Übertragung eines gegebenen Fahrspiels in die Drehmoment/Drehzahl-Ebene (oben Treiben, unten Bremsen)

Vergleich der Verluste:
ASM:= 100%
PSM ca. 50%
über das Fahrspiel integriert



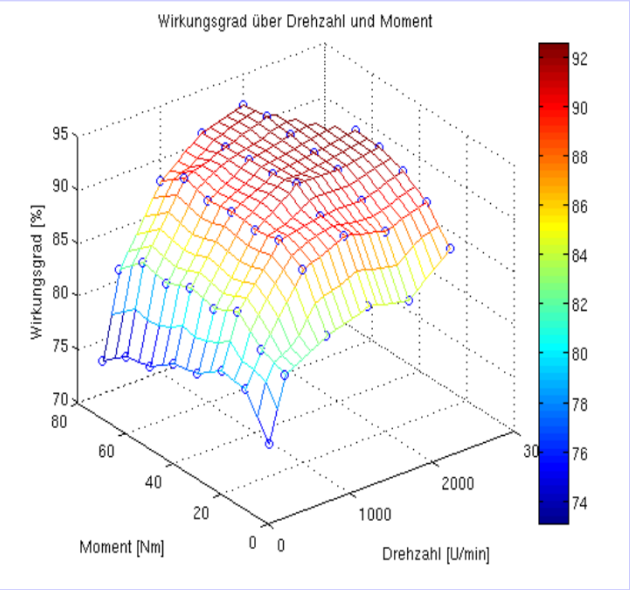


FÜR GERÄUSCHKRITISCHE ANWENDUNGEN: **SILENT INFORM**

- **Lautloser INFORM Drive**:
  - Pulsmuster so gewählt, dass die INFORM-Auswertung keine Anregungen im hörbaren Frequenzspektrum erzeugt.
  - Volles Losbrechmoment ohne Geräuschentwicklung
  - Anwendung z.B. für geräuschsensitive Lüfter- und Pumpenanwendungen mit hohen Anforderungen an den Start
  - Strommessung über Shunts an Zwischenkreispotenzial
  - Demonstrator ist Low-Cost-Glockenläufer (praktisch keine Achsigkeit)
  - Blockiererkennung
  - Aufsynchronisieren aus jeder Drehzahl und Drehrichtung mit vollem Moment

SILENT-INFORM-Demonstrator mit Ferrit-Glockenläufer

Anwendungsbeispiel: 80 Nm Reluktanzmotor-Antrieb



Gemessener Wirkungsgrad des sensorlosen Reluktanzmotors – über 90% in weitem Betriebsbereich

Sehr guter Wirkungsgrad in weitem Betriebsbereich verglichen mit Asynchronmotor

Einfacher und robuster Motoraufbau

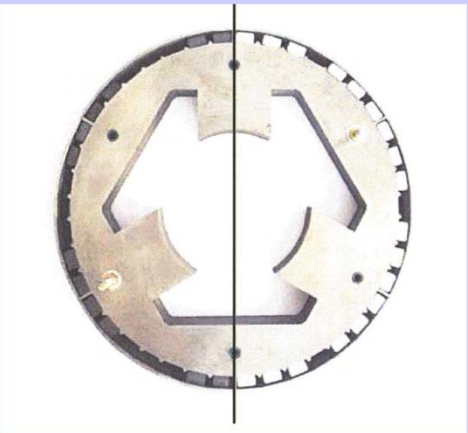
Geringe Materialkosten

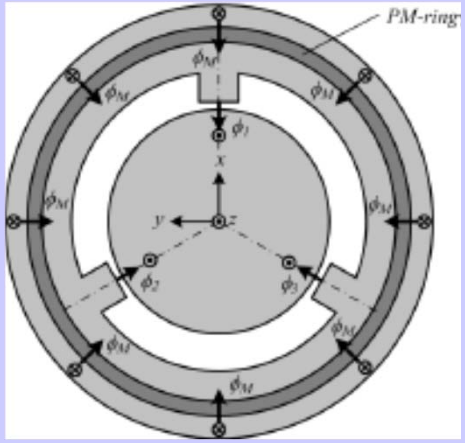
INFORM-Verfahren durch ausgeprägte Unterschiede in d- und q-Achse sehr gut implementierbar.

Rechts: Sensorloser Reluktanzmotor am TU-Prüfstand

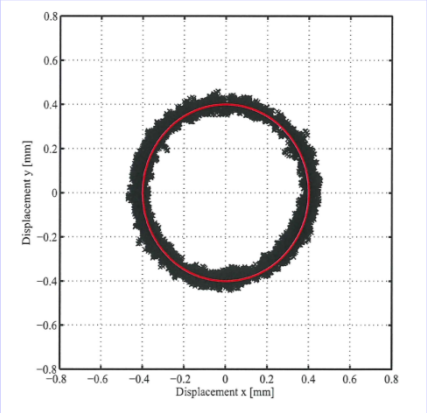
INFORM FÜR MAGNETLAGER

Anwendungsbeispiel: INFORM für Magnetlager liefert x- und y-Auslenkung aus Mittelpunkt

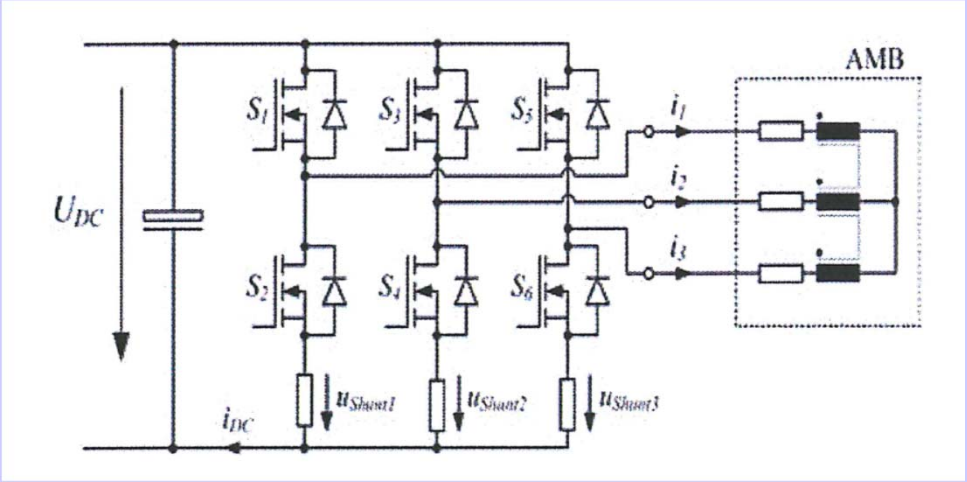




Sensorlose xy-Regelung



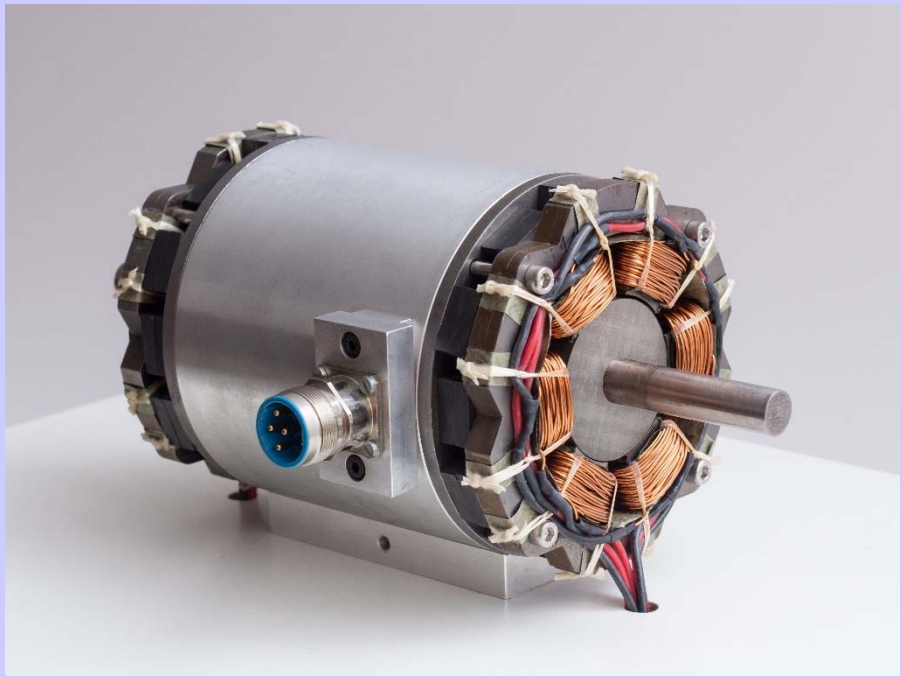
INFORM-Ortskurve des Magnetlagers bei definierter Exzentrizität (rot)



RELUKTANZMOTOR MIT ZWEI MAGNETLAGERN

Mittelteil: Synchron-Reluktanzmotor mit INFORM (ersetzt Winkelgeber)

Außen links und rechts: Hybrid-Magnetlager mit Vormagnetisierung und INFORM (ersetzt x/y-Positionsgeber)



Präsentation des Antriebs im Betrieb auf der Hannover Messe (4/2015)

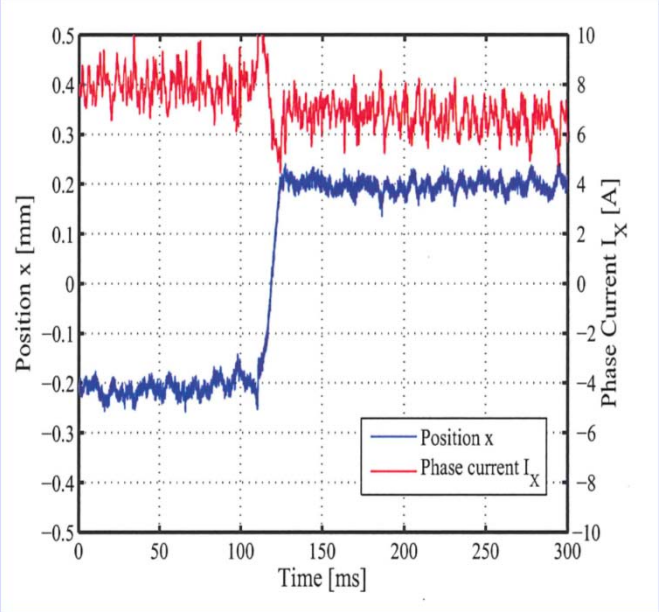
INFORM ermöglicht mechanisch geberloses magnetgelagertes System!

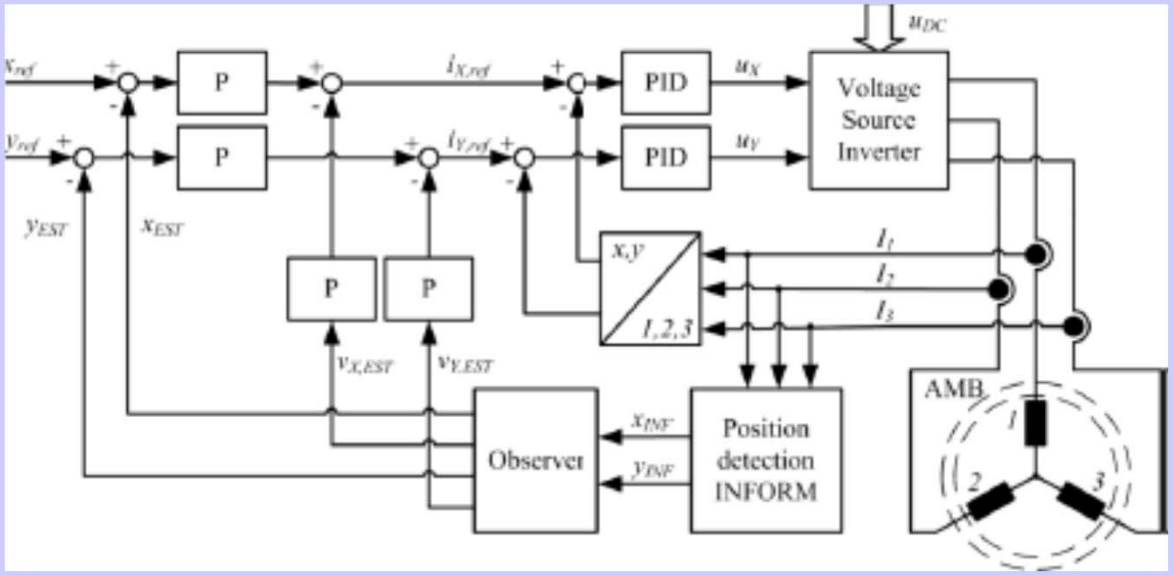
Prof. M.Schrödl
TU Wien

INFORM FÜR MAGNETLAGER REGELUNG

Praxisforum
Elektrische
Antriebstechnik
Würzburg
25.3.2015

Basierend auf INFORM-ermittelter x- und y-Auslenkung wird mittels Beobachter die Exzentrizität und Geschwindigkeit ermittelt und ausgeregelt.





Oben: Sprungantwort auf einen Positions-Sollwertsprung (Sensorlos geregelt).

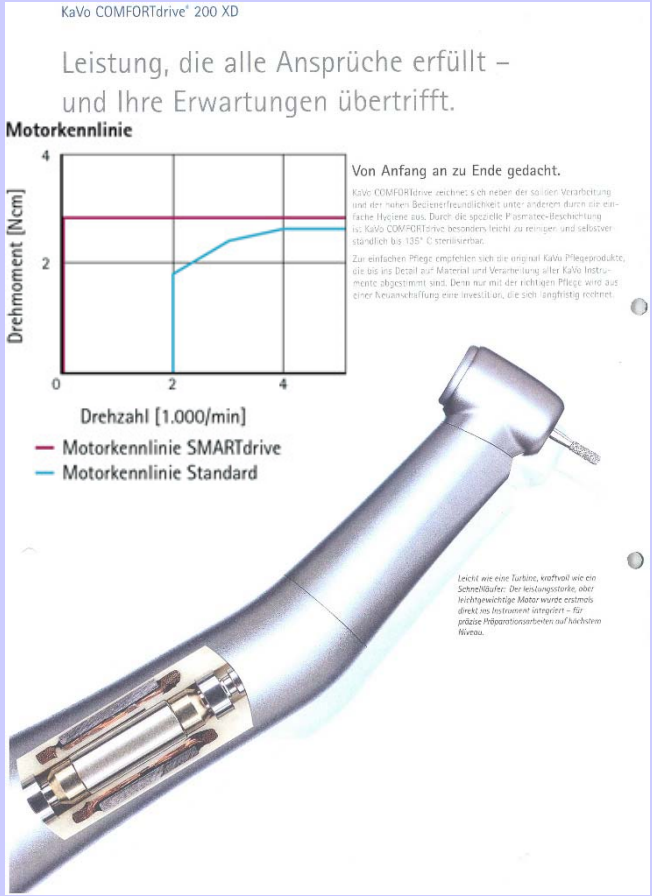
Links: x/y-Magnetlager-Regelung mit INFORM-Positionsermittlung.

Anwendungsbeispiel: 40.000 U/min Dentalantrieb

Extrem kompakte PSM mit Luftspaltwicklung und zylindrischem Rotor.

Betriebsbereich:

100 U/min (Endodontie) bis 40.000 U/min (bis 200.000 U/min in anderen Produkten)



NEUESTE SERIENANWENDUNG INFORM IM AIRBUS A 350

Extrem kompakte, leichte und effiziente PSM-Antriebe mit INFORM-Verfahren für diverse Aufgaben (über 20 Antriebe pro Flugzeug)

Zweiter Airbus, fliegt
Frankfurt – Doha ab 7.3.2015

Erster Airbus A350, in Betrieb seit 12/2014
Enthält über 20 INFORM-Antriebe (Foto: Airbus)

Beispiel: INFORM Air cooling
Unit (Foto: Diehl/AOA GmbH.)

ZUSAMMENFASSUNG

Zusammenfassung und Ausblick

Diskussion der Vorteile von sensorlosen PM-Synchron- und Reluktanzmaschinen

Präsentation des sensorlosen Regelkonzepts ab Stillstand

- Erwartete Genauigkeit, Dynamik, Überlastfähigkeit

Anpassung des INFORM-Verfahrens für Magnetlager-Regelungen

Anwendungsbeispiele aus verschiedenen Einsatzgebieten

Hohe Dynamik und Überlastfähigkeit konnte gezeigt werden

Diverse Anwendungen bereits seit einigen Jahren in Serie

INFORM ist geeignet für Serienanwendungen

Die TU Wien freut sich auf Kooperationsprojekte!

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!