

Sensorlose Antriebe mit Permanentmagnetmotoren

Vortrag im OVE, Wien

05.10.2007

Manfred Schrödl

Institut für Elektrische Antriebe und Maschinen, TU Wien

Gusshausstraße 25/372

A-1040 WIEN.



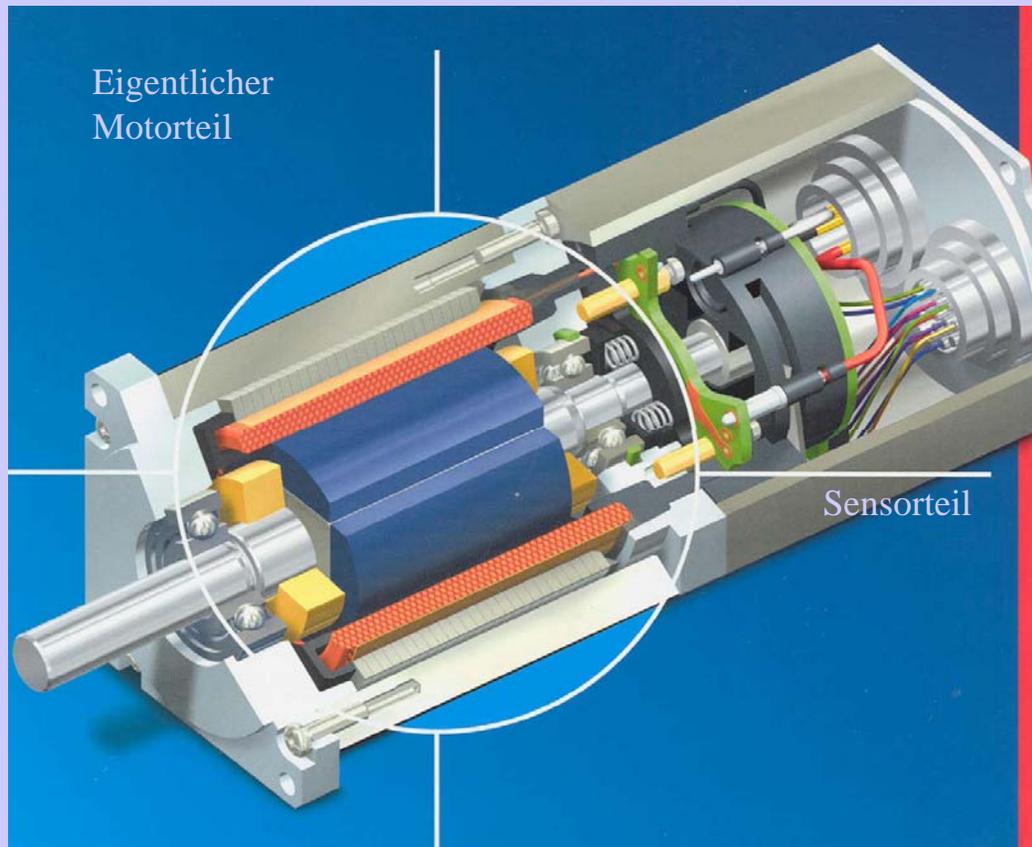
TU WIEN, Okt 2007

- INHALT DER PRÄSENTATION
 - Der Permanentmagnetmotor - Innovation bei Antrieben
 - „Sensorlose“ Regelverfahren - Prinzip, Eigenschaften
 - Hardware und Reglerstruktur von INFORM Drives
 - Beispiel für Serienanwendungen mit Industriepartnern
(Drehzahlgeregelte und lagegeregelte Applikationen)
 - Ausblick über weitere Applikationen

- **Der Permanentmagnet-Synchronmotor (PM-Motor):**

Ein innovativer Motortyp mit hervorragenden Eigenschaften!

Mechanischer Sensor (rechter Teil) erfordert hohen Aufwand und ca. 30 % Motorraum !



Sensorteil:

Platzbedarf typisch 30%
Mehrkosten bis ca. 30%
Aufwendige Verkabelung
Zusatzanschluss

Störungsanfällig

Bruch, Temperatur, Staub
Elektromagnetische
Einstreuung

Zusatzaufwand

für Montage

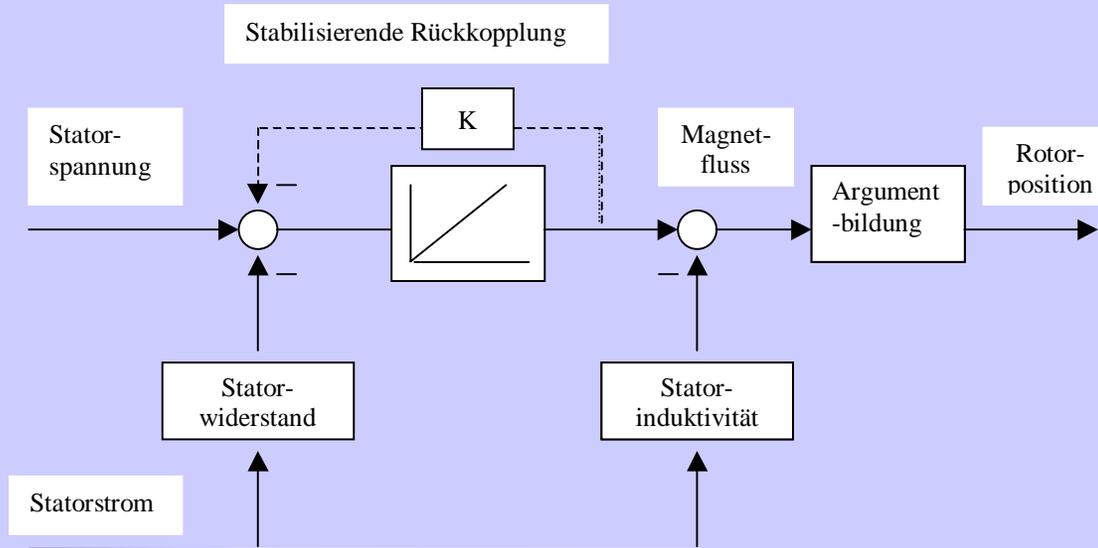
VORTEILE PM-MOTOR



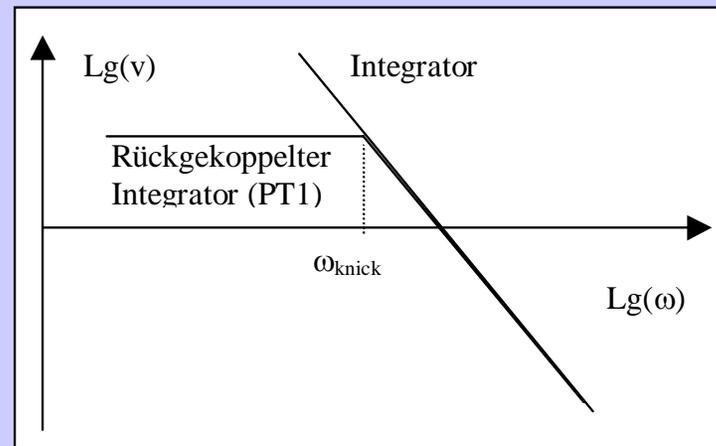
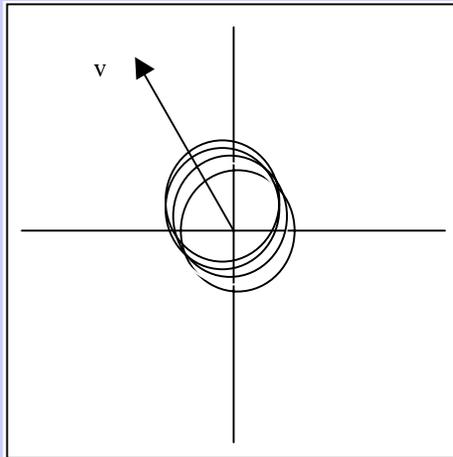
- Höhere Leistungsdichte als Asynchron- und Gleichstrommotor
- d.h. kleinerer Motor bei gleicher Leistung!
- sehr gute Regeleigenschaften
- bestens für Servo- und Positionierantriebe!
- Bester Wirkungsgrad aller Motoren!
- **Ziel: Regelung ohne mechanische Sensorik bis Stillstand!**

- Stand der Technik bei sensorlosen Verfahren
 - für **hohe Drehzahlen** über ca. 10 % der Nenndrehzahl:
EMK-basierende Verfahren
(sind Stand der Technik, Serienprodukte laufen)
 - für **tiefe Drehzahlen** einschließlich Stillstand:
INFORM®- Verfahren
(On-Line Auswertung von Reluktanz und Sättigung)

INFORM = “Indirekte Flusserfassung durch On-line Reaktanz-Messung”

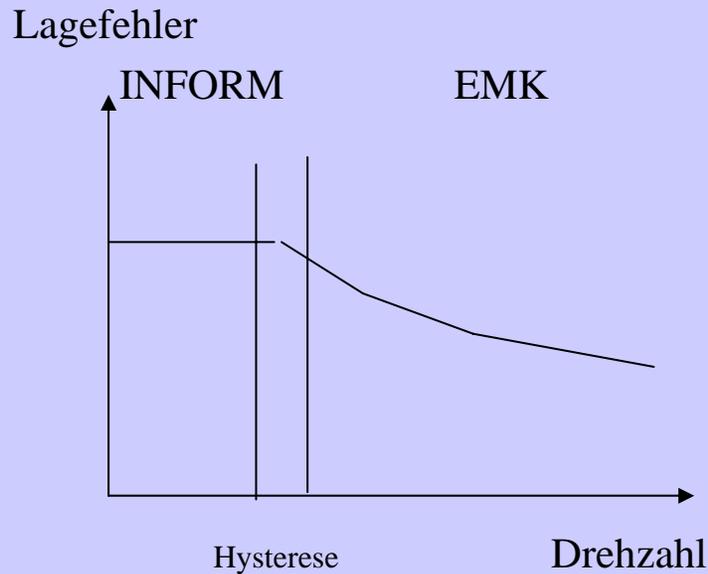


- **Integration** der Statorspannung „hinter dem Statorwiderstand“ liefert Flussverkettung
- Subtraktion des Statorstromanteils liefert **Verkettung zufolge Dauermagnet**
- Diese ist an die **Rotorposition** gekoppelt
- Stabilisierende **Rückkopplung** nötig – Verfälschung bei kleinen Frequenzen
- Widerstand (**Temperatur!**) beeinflusst Qualität

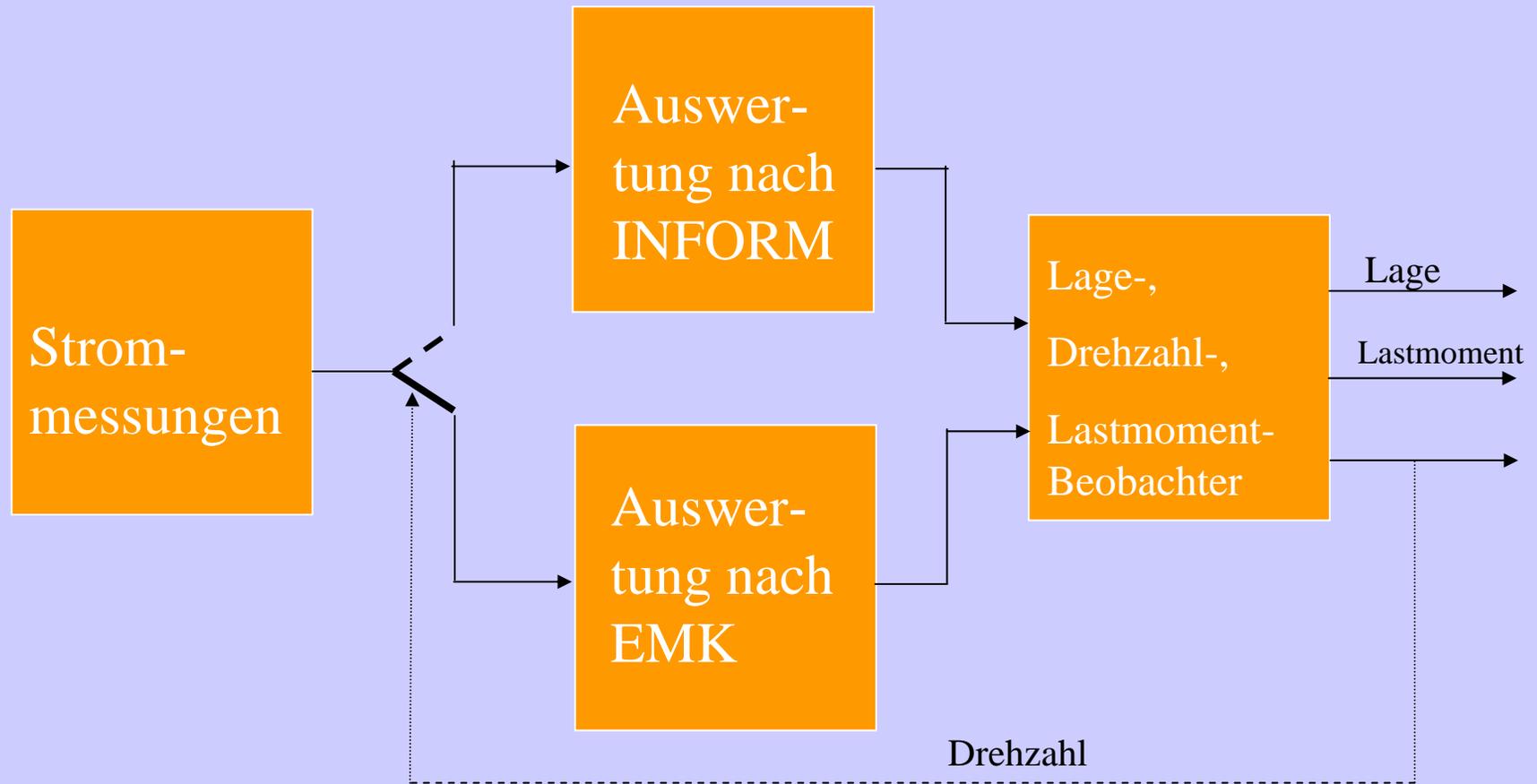


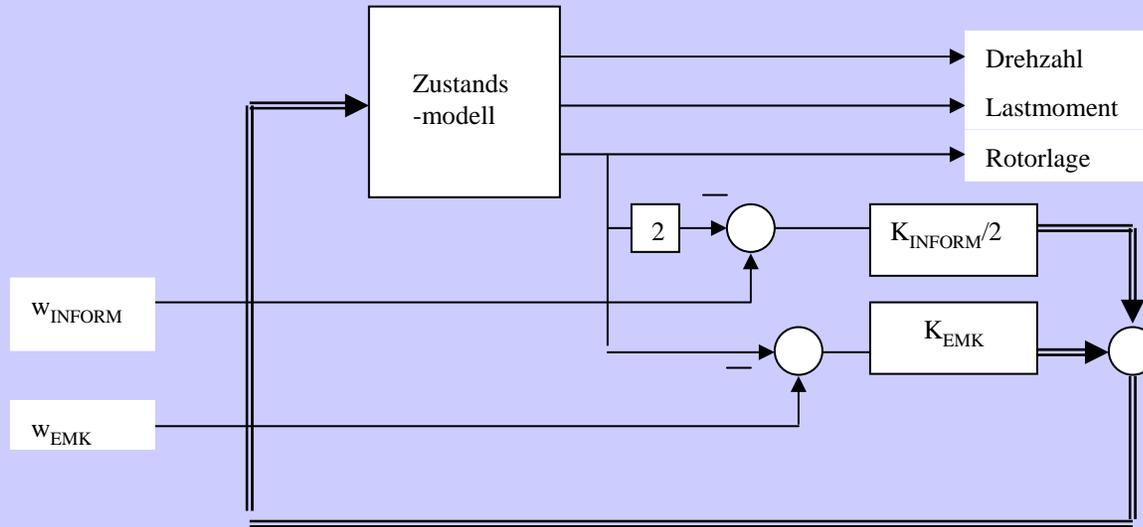
Links: Integratorausgang driftet davon durch nicht ideales Modell

Rechts: Einschränkung des Betriebsbereichs des EMK-Modells durch Rückkopplung des Integratorausganges

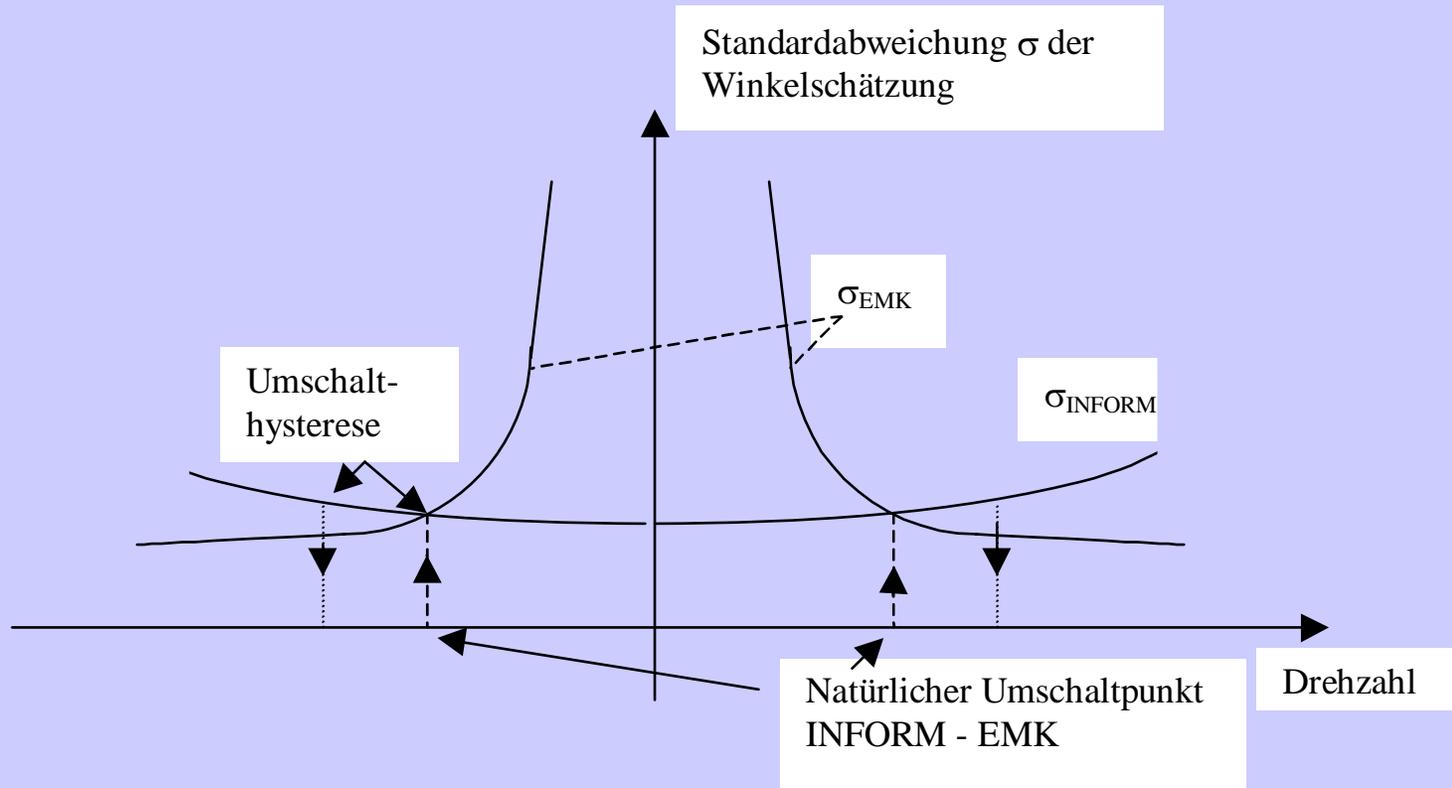


- INFORM basiert auf Sättigung und Reluktanz
- bei ca. 20 % der Nenndrehzahl:
 - Lagefehler von INFORM und EMK etwa gleich
 - deshalb wechseln auf EMK
 - darüber nimmt EMK-Fehler ab
- Hysterese vorsehen (sonst Grenzyklen)
- Wichtig: EMK-Modelle brauchen gleiche Hardware wie INFORM
- beide Modelle sind Softwaremodule

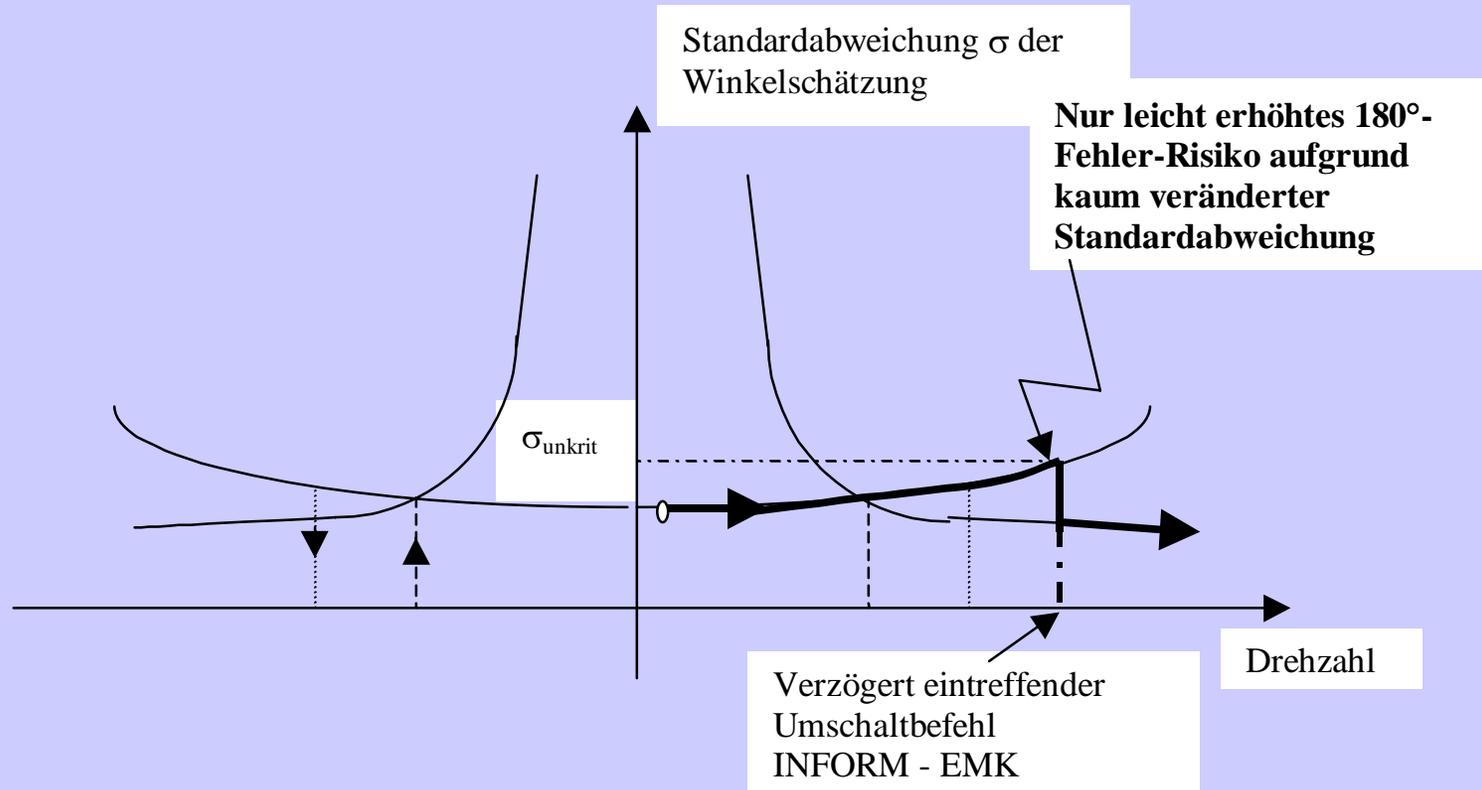




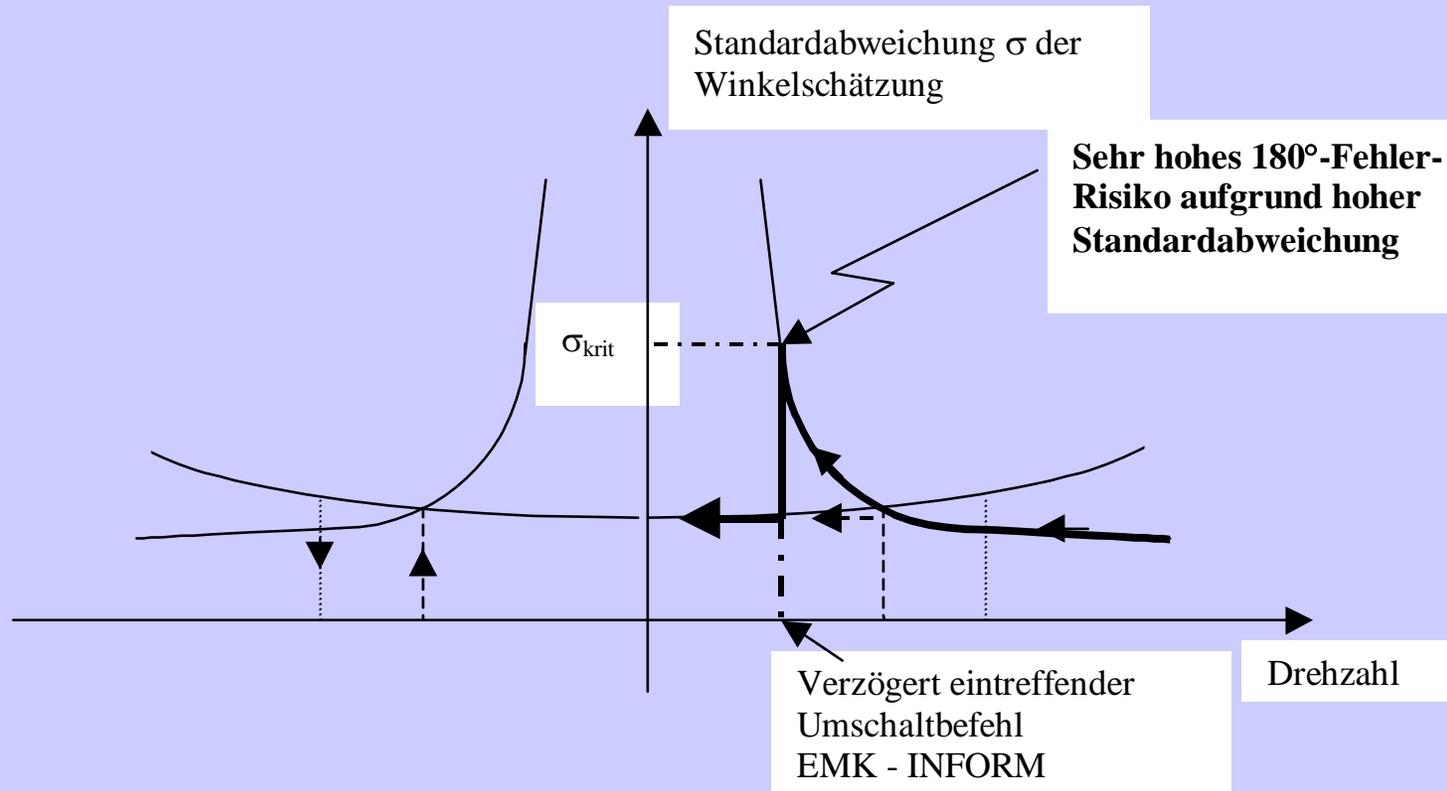
- **Mechanisches Parallelmodell** mit Ausgangsfehlerückführung
- Auslegung der Rückführung über Polvorgabe („Luenberger-Beobachter“) oder statistisches Gütekriterium („Kalman-Filter“)
- **Getrennte Mess-Eingänge** für INFORM und EMK-Modell
- **Gemeinsames Zustandsmodell** („nur ein Gedächtnis“)



Umschaltstrategie zwischen INFORM und EMK-Modell aufgrund der Fehlervarianz der beiden Verfahren

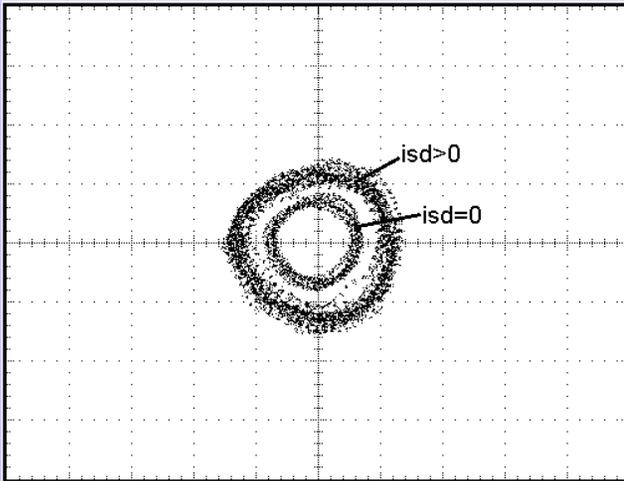
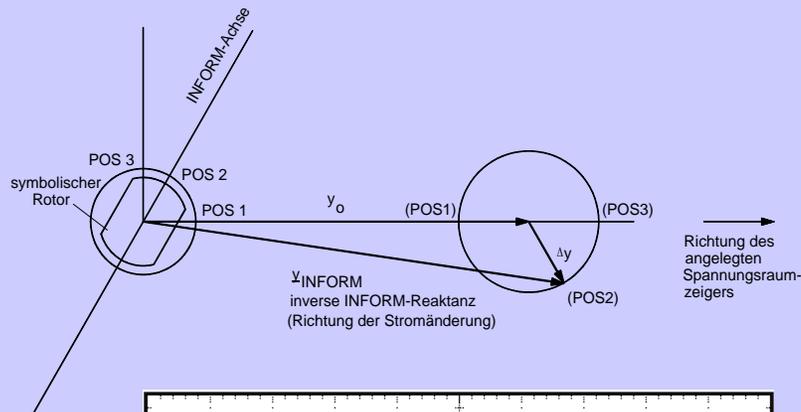


Unkritischer Sprung von niedriger zu hoher Drehzahl mit hoher Dynamik



Kritischer Sprung von hoher zu niedriger Drehzahl mit hoher Dynamik

INFORM = Indirekte Flussermittlung durch On-line Reaktanz-Messung



Messung der charakteristischen INFORM-Kurve

- Auswertung von Stromanstiegen zufolge Umrichter-Spannungen
- Stromänderungszeiger bewegt sich bei drehendem Rotor entlang einer offsetbehafteten Kreisbahn
- Bahngeschwindigkeit = doppelte Rotorgeschwindigkeit
- Durch Kombination von Messungen: Offsetfreie Kreisbahn

3.3. THE INFORM-METHOD ¹⁾

Indirect Flux detection by On-line Reactance Measurement

As shown in the previous section, all proposed "sensorless" control methods have disadvantages. No method has been presented which works well over the full operating range. Hence, the author presents a new method overcoming the troubles arising especially at low speed. The first approach /33/, operating at standstill, is now generalized to arbitrary working conditions.

3.3.1. Developing a simple machine model for studying the INFORM method

3.3.1.1. Geometrical assumptions

In Fig. 23a the cross-section of the model is depicted. The rotor and the stator yoke are assumed to have infinite permeability. The ring representing the permanent magnets including the air-gap has permeability μ_M (ring M), the ring representing the slots and the (more or less) saturated stator teeth (ring S) has an average differential permeability $\mu_S(\beta)$ depending on the angular position β relative to the rotor. For studying the global relations between the armature quantities $\underline{i}_S(\tau)$ and $\underline{i}_S(\tau)$ a model with a single permeability parameter $\mu_e(\beta)$ within ring ϵ is recommended (Fig. 23b). μ_e can be interpreted as the effective permeability of model Fig. 23 a) at angular position β . The simplified model combines a correct modelling of the INFORM effect with a simple mathematical description. A rough coherence between μ_M and $\mu_S(\beta)$ on the one hand and $\mu_e(\beta)$ on the other hand is given by

$$\mu_e(\beta) = \frac{\ln(r_A/r_i)}{\mu_M^{-1} \cdot \ln(r_Z/r_i) + \mu_S(\beta)^{-1} \cdot \ln(r_A/r_Z)}$$

The following calculations are based on the simplified model Fig. 23 b). The armature winding is assumed to be an ideal three-phase winding (winding coefficient is zero for the harmonic space waves). For simplicity no parallel circuits are assumed. The windings are distributed within ring ϵ so as to cause a radially oriented H-field as described in eqs. (3.23 a-c).

¹⁾ Patent application was made for IM, synchronous and reluctance motors.

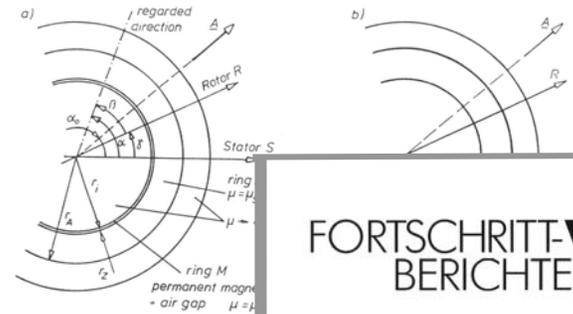


Fig. 23. Cross-section of the model

In the first step we need not consider the armature current as we assume the armature current to be considerably (linearization in current).

3.3.1.2. Mathematical description

Our intention is to calculate the induced voltage by applying a voltage to the machine. The induced voltage is induced in the winding by the armature current.

Because of the ideal three-phase winding the induced voltage in the model can be described as

$$A(\alpha) = \int_{r_1}^{r_A} S(r, \alpha) \cdot r \cdot dr = \hat{A} \cdot \cos(\alpha - \alpha_0)$$

or, in complex notation,

$$A(\alpha) = \text{Re} [\hat{A} \cdot \exp(-j\alpha)] ,$$

with the complex quantity ("space vector")

$$\hat{A} = \hat{A} \cdot \exp j(\alpha_0) .$$

FORTSCHRITT-
BERICHTE **VDI**

Dipl.-Ing. Dr. techn. Manfred Schrödl, Wien

Sensorless Control of A.C. Machines

Reihe **21**: Elektrotechnik

Nr. **117**

VDI VERLAG

	Europäisches Patentamt	European Patent Office
---	-------------------------------	-------------------------------

Urkunde	Certificate
---------	-------------

Es wird hiermit bescheinigt, daß für die in der beigefügten Patentschrift beschriebene Erfindung ein europäisches Patent für die in der Patentschrift beschriebenen Vertragsstaaten erteilt worden ist.	It is hereby certified that a European patent has been granted in respect of the invention described in the annexed patent application for the Contract States designated in specification.
---	---

Europäisches Patent Nr.	European Patent No.
1051801	

Patentinhaber	Proprietor of the Patent
Schrödl, Manfred Ultere Hauptstrasse 9 7223 Siegraben/AT	

München, den 10.04.02
Paris & Munich, le

The United States of America



The Director of the Patent and Trademark Office

Has received an application for a new and useful invention. The claims of the invention are elements of law have been examined and it has been determined that the invention shall be granted as a patent.

Therefore, this

United States Patent

Grants to the person(s) having the right to exclude others from offering for sale, or using, throughout the United States, the invention into America for the term set to the payment of maintenance by law.

If this application was filed on or after September 8, 1995, the term of this patent shall be the term of the patent or twenty years from the date of the first U.S. filing date of the application, whichever is later, subject to any statutory extension of term.

If this application was filed on or before August 22, 1995, the term of this patent shall be the term of the patent or sixteen years from the date of the first U.S. filing date of the application, whichever is later, subject to any statutory extension of term.


Director of the United States Patent and Trademark Office

REPUBLIC ÖSTERREICH



PATENTURKUNDE

GEMÄSS DEM PATENTGESETZ IST FÜR DIE IN DER ANGEFÜHRTEN PATENTSCHRIFT BESCHRIEBENE ERFINDUNG EIN PATENT UNTER DER

№ 406722

ERTEILT WORDEN.

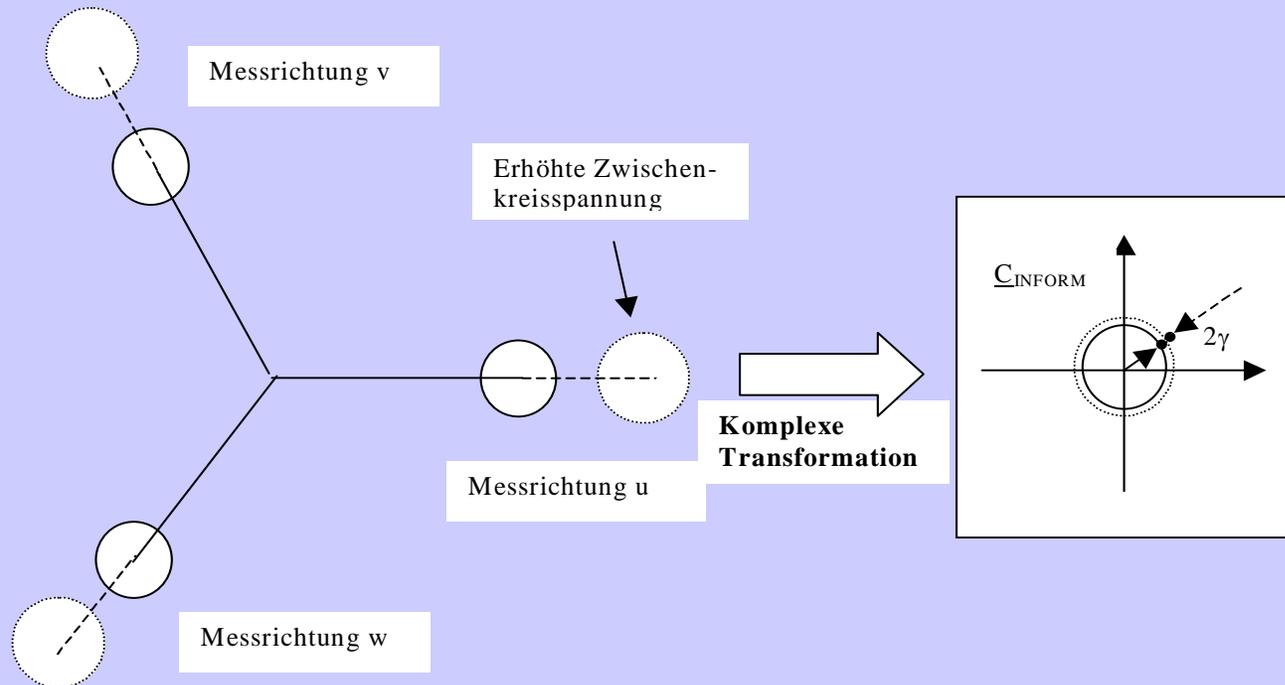
WIEN, DEN 25. Aug. 2000

ÖSTERREICHISCHES PATENTAMT
PATENTREGISTER



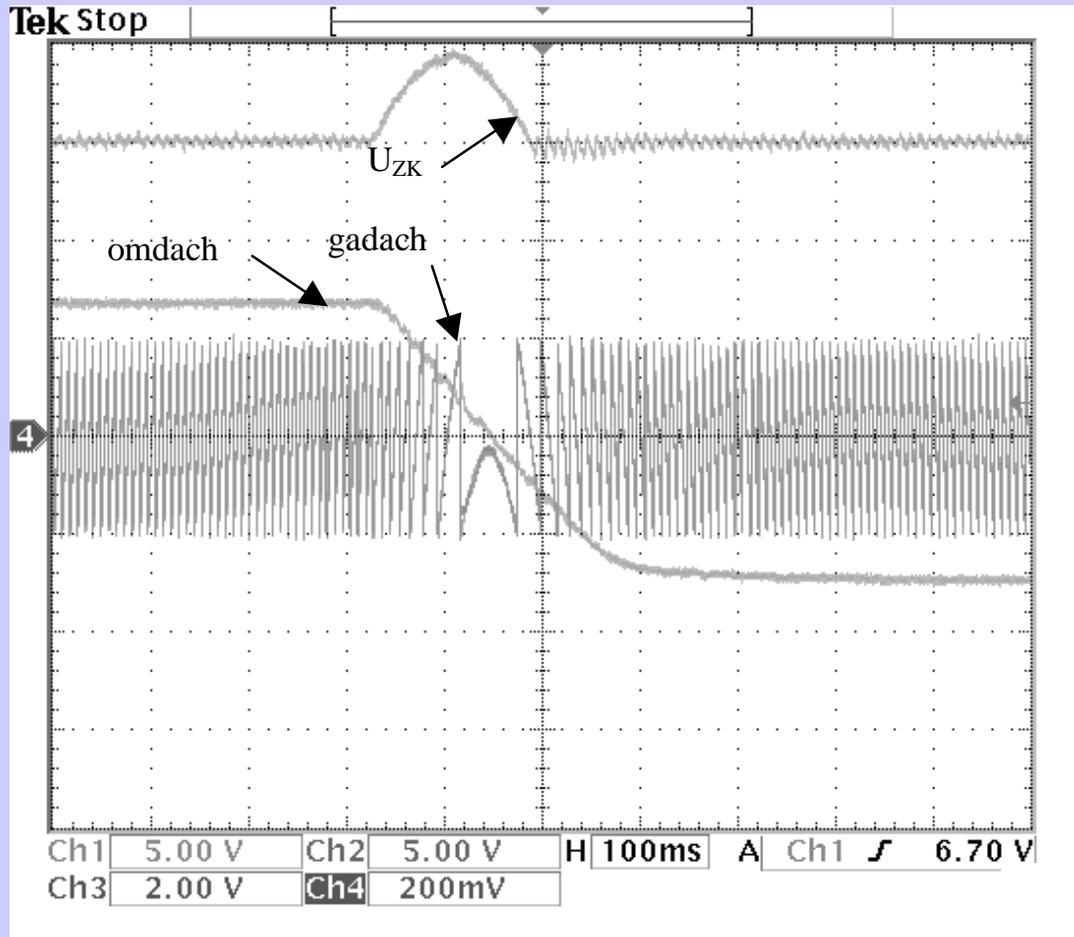


DIE JAHRESGEBÜHREN WERDEN JÄHRLICH FALLIG AM 15. DEZEMBER

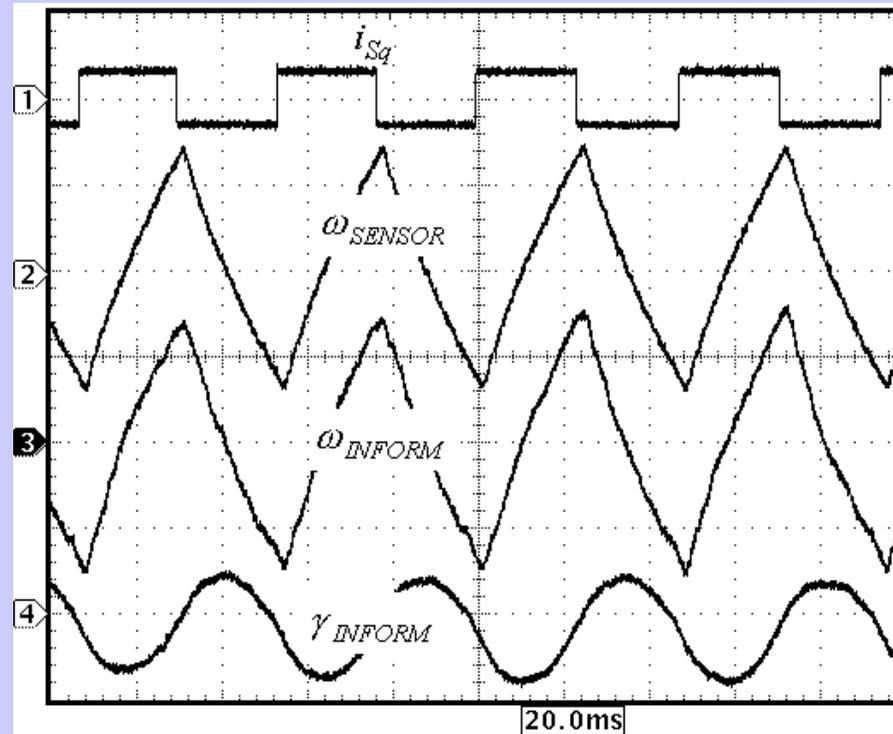


Kombination mehrerer Testspannungsrichtungen zu einer parameterunabhängigen Auswertung

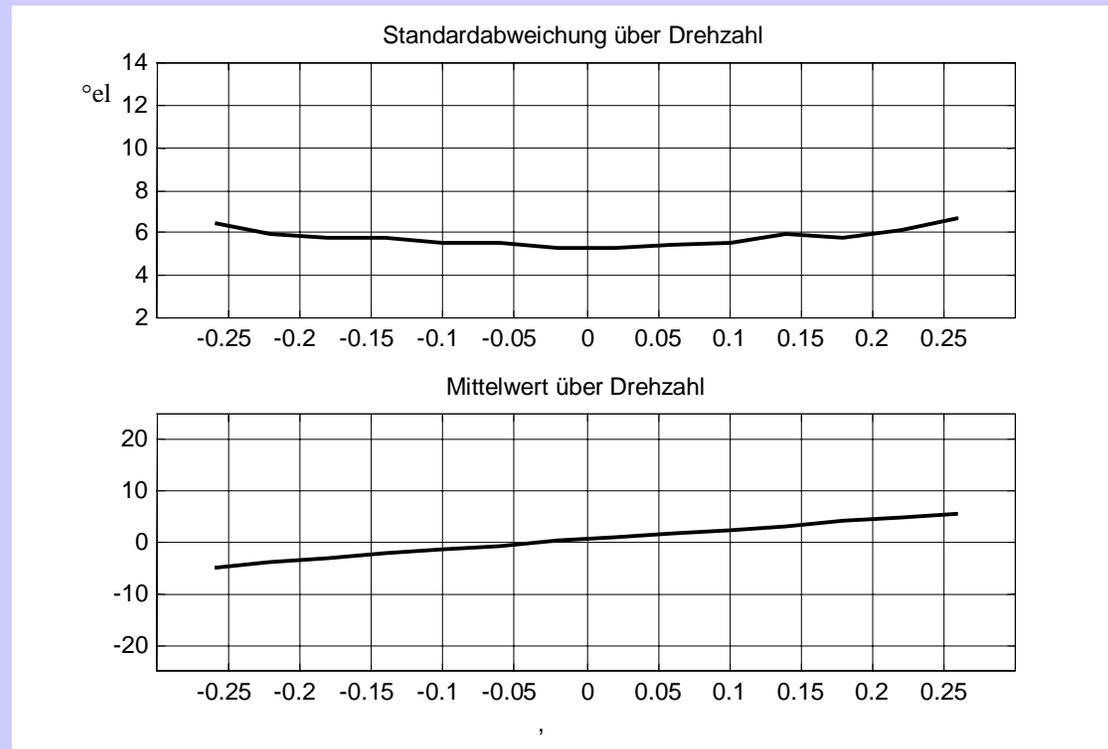
INFORM-Unempfindlichkeit gegen Zwischenkreisspannung



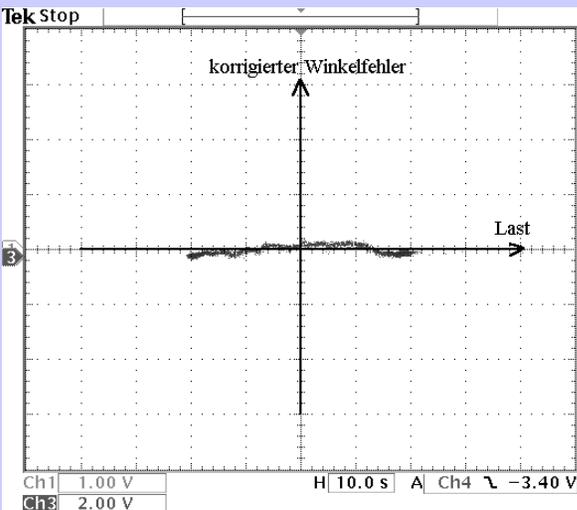
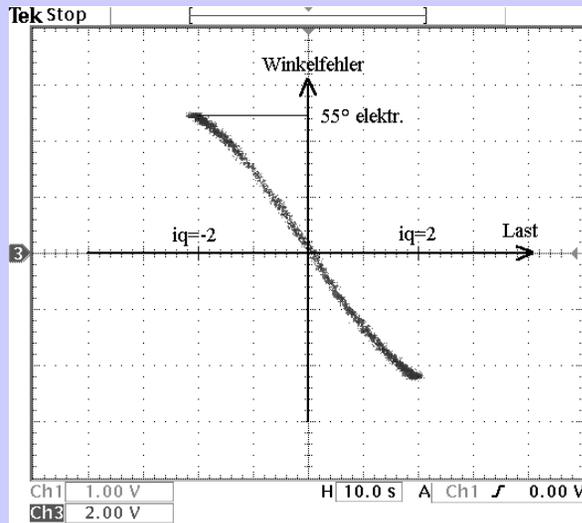
Hochdynamischer Reversiervorgang mit 30% U_{zk}-Anhebung
(Drehzahlprung von -70% auf +70% der Nenndrehzahl)



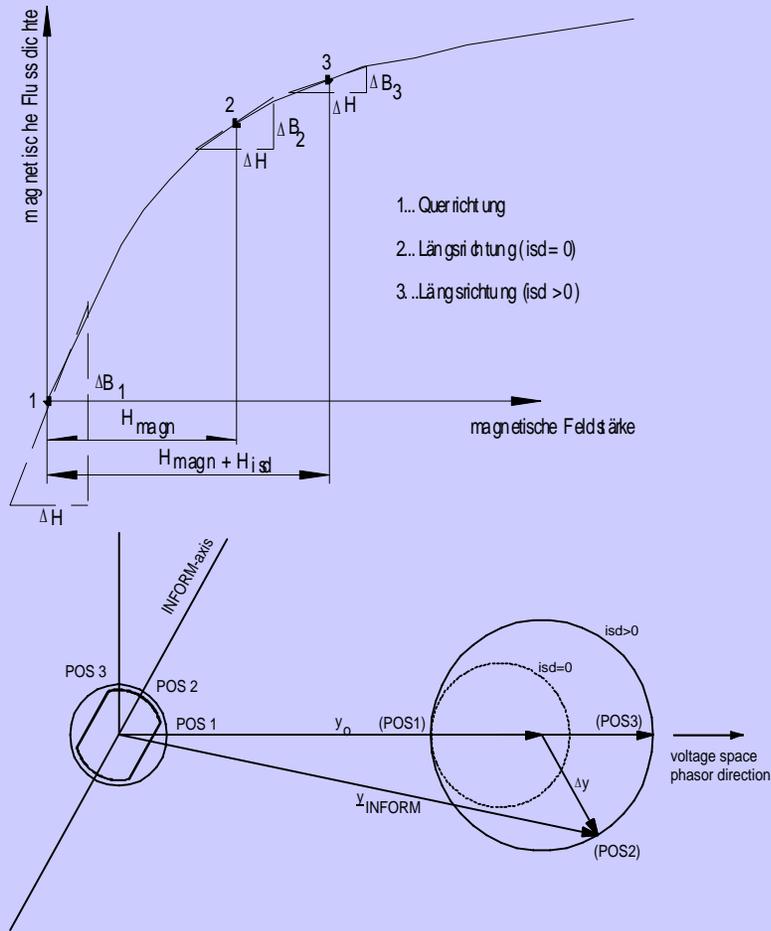
Wechsel +/- Nennmoment in ca. 3 Millisekunden (periodisch alle 25 ms) führt zu Drehzahländerungen von +/- 50% und Winkeloszillationen um ca. +/- 120 Grad el.)



INFORM wird mit steigender Drehzahl schwach ungenauer und hat eine leicht korrigierbare systematische Abhängigkeit



- Keine Temperaturempfindlichkeit
 - $I_x R$ -Term durch Messung eliminiert
 - ebenso Temp.abhängigkeit der EMK
- Keine direkte Drehzahlabhängigkeit
 - durch Messung eliminiert
 - nur sekundäre Auswirkung auf Strom
- Unabhängigkeit von magn. Arbeitspunkt
 - mittlere Induktivität wird kompensiert
 - Induktivitätsschwankung liefert INFORM-Kreis, Einfluss nur auf Radius
 - bei Winkelbildung aus INFORM-Kreis fällt Radius heraus
- Abhängigkeit des INFORM-ermittelten Winkels vom Laststrom (links)
 - gesteuert kompensierbar (links unten)

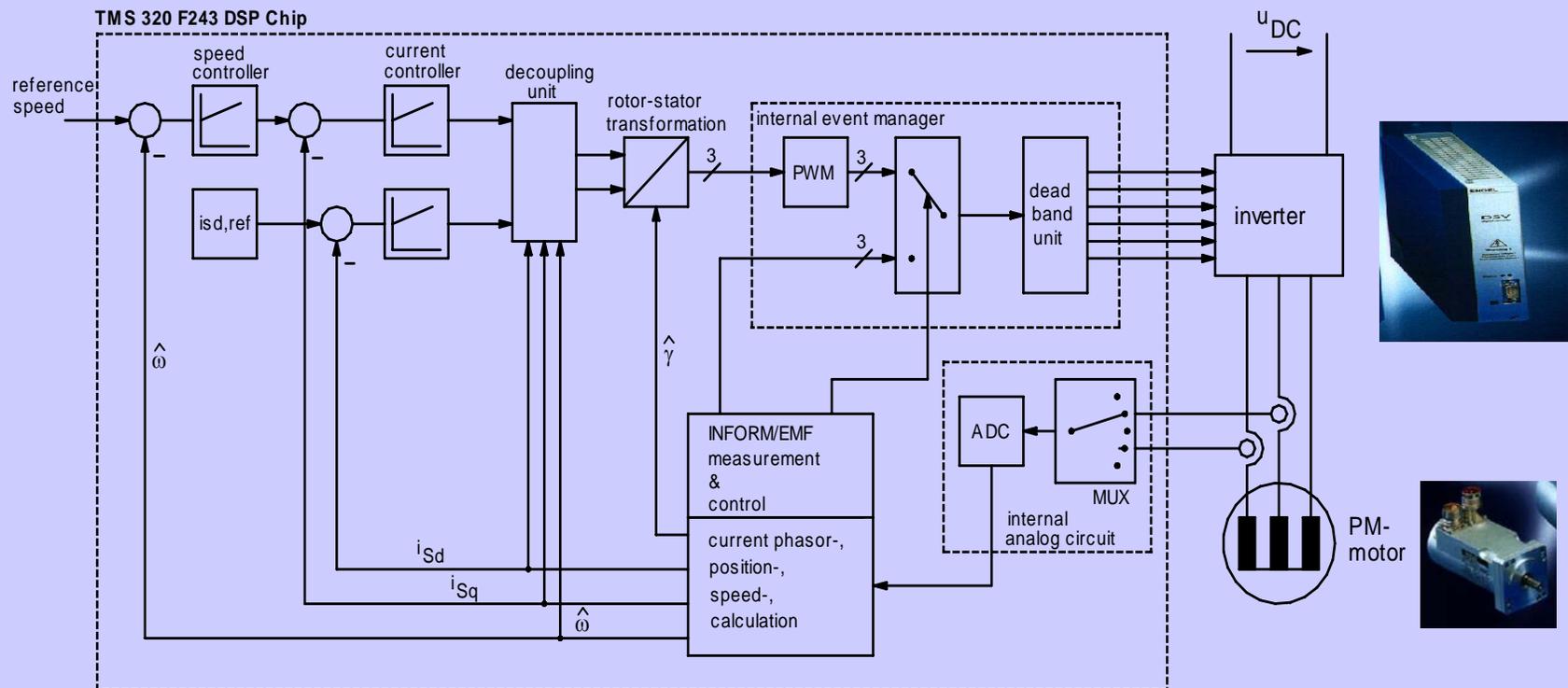


- **A) GROSSIGNAL-INFORM**
Zweimal Verschieben des magn. Arbeitspunktes in entgegengesetzte Richtungen mit Statorstrom verändert INFORM-Ortskurve
- Dauer des Tests: einige Millisekunden
- Vorteil: Eindeutige Startinfo!
 - Kein Ruckeln beim Start
- Nachteile dieses Großsignaltests:
 - Zusätzliche Verluste, Geräusche
- Danach deshalb normaler INFORM
- **B) alternativ: GESTEUERTE POSITIONSINITIALISIERUNG**
- Nachteil: Ruckeln beim Start
- Versagt bei hohem Losbrechmoment

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)

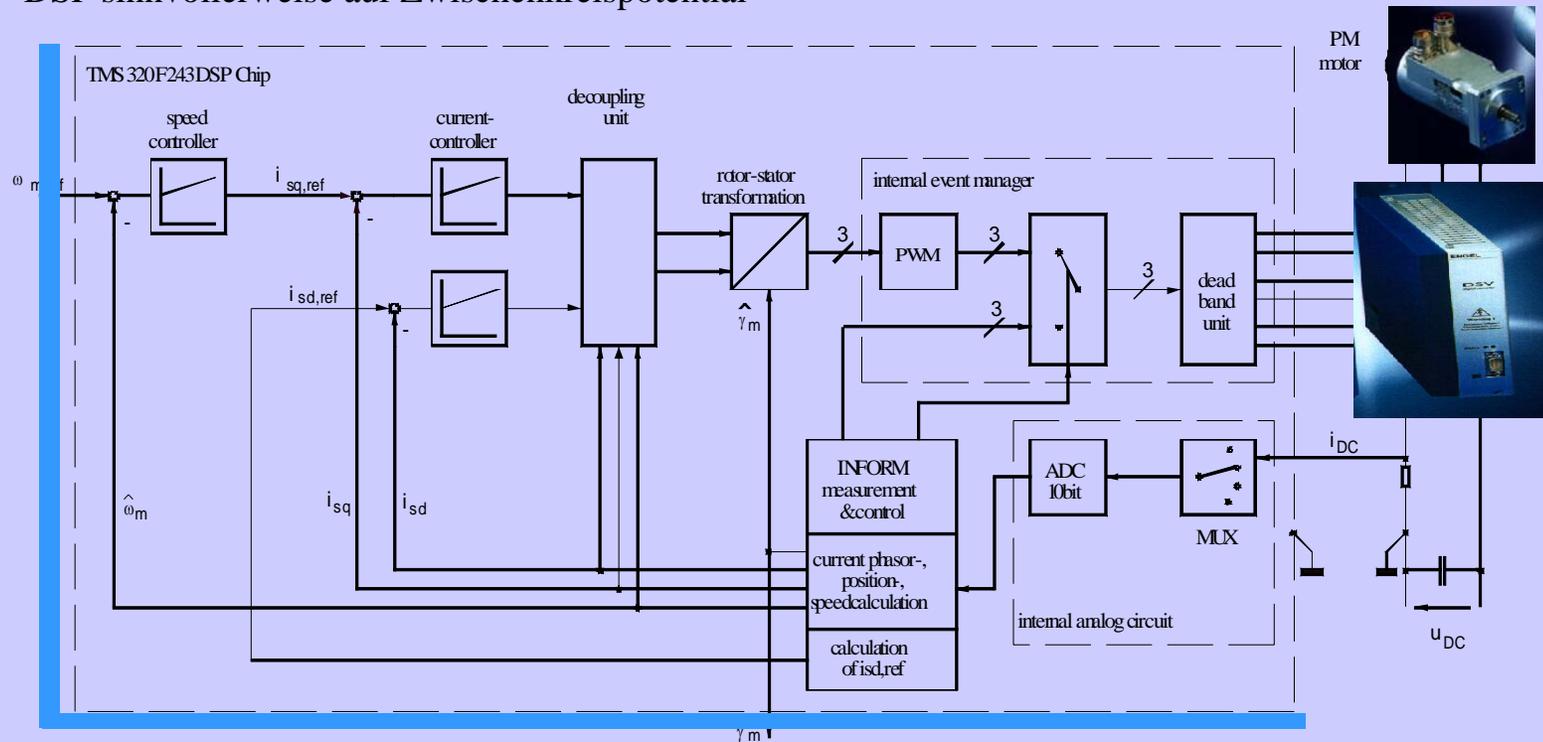


Beispiel für drehzahlgeregeltes INFORM-System mit hohem Startmoment und hoher Dynamik

Variante mit Zwischenkreisstrommessung:

Billige ohmsche Shuntmessung möglich

DSP sinnvollerweise auf Zwischenkreispotential



Beispiel für drehzahlgeregeltes INFORM-System mit ausschließlicher Zwischenkreisstrommessung

Stochastische Eigenschaften des INFORM-Rohwinkels

Abweichungen praktisch unabhängig von Betriebsparametern (z.B. Temperatur, Widerstand) und Fertigungstoleranzen

A) **lastabhängiger deterministischer** Anteil $\Delta\gamma(i_{sq})$, der durch eine monotone Korrekturfunktion, oft durch eine Gerade, korrigiert werden kann.

B) **drehzahlabhängiger deterministischer** Anteil $\Delta\gamma(\omega_m)$, der von der Abtastrate der INFORM-Tests abhängt, der einfach vorausberechenbar ist und entweder vernachlässigbar klein ist oder durch eine einfache Funktion korrigiert werden kann.

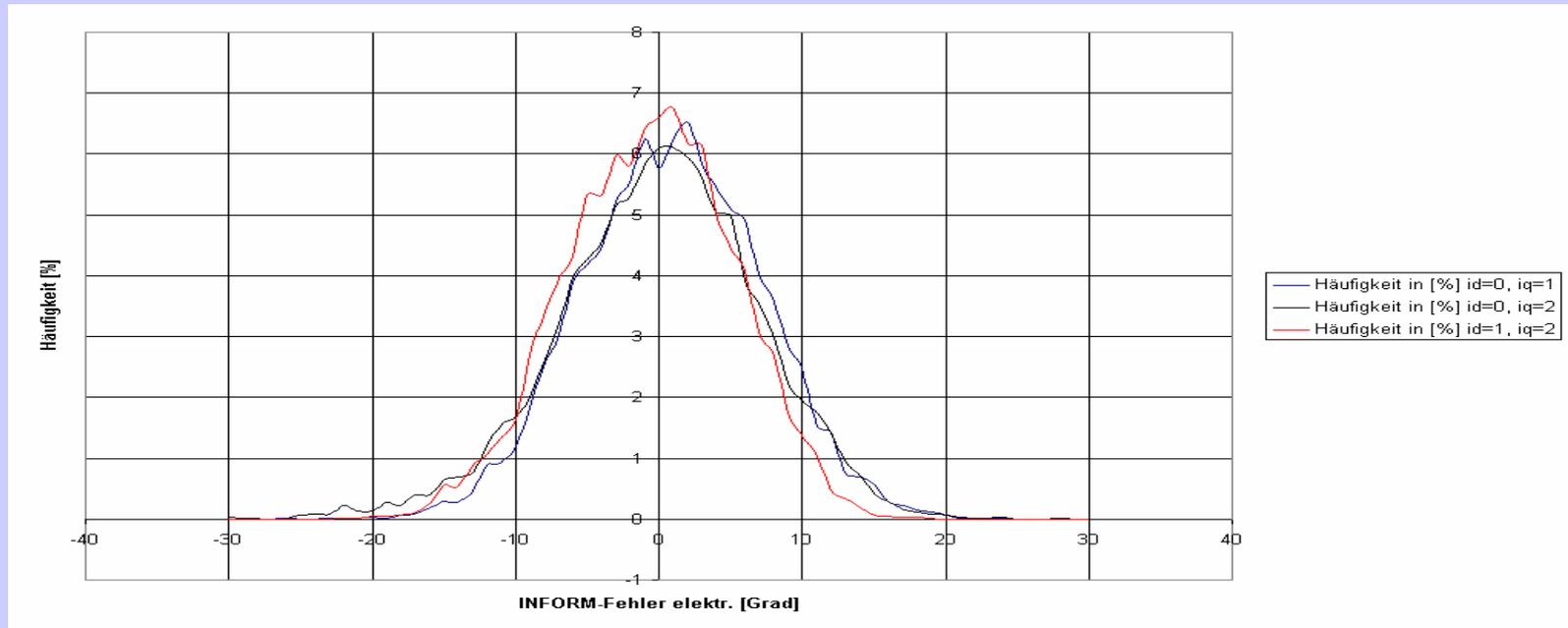
C) **stochastischer Anteil im INFORM-Winkel**, gekennzeichnet durch die Standardabweichung σ vom wahren Wert:

$$\sigma = \text{sqrt} \sum [1/2 (y_{\text{INFORM}} - \gamma_m)^2]$$

D) **mit der Belastung steigende Zunahme des Erwartungswertes** $\sigma = \sigma(|i_{sq}|)$, bildet neben thermischen oder magnetischen Grenzen eine weitere Grenze der Überlastfähigkeit Erfahrungsgemäß ist eine zwei- bis dreifache Überlastfähigkeit zulässig.

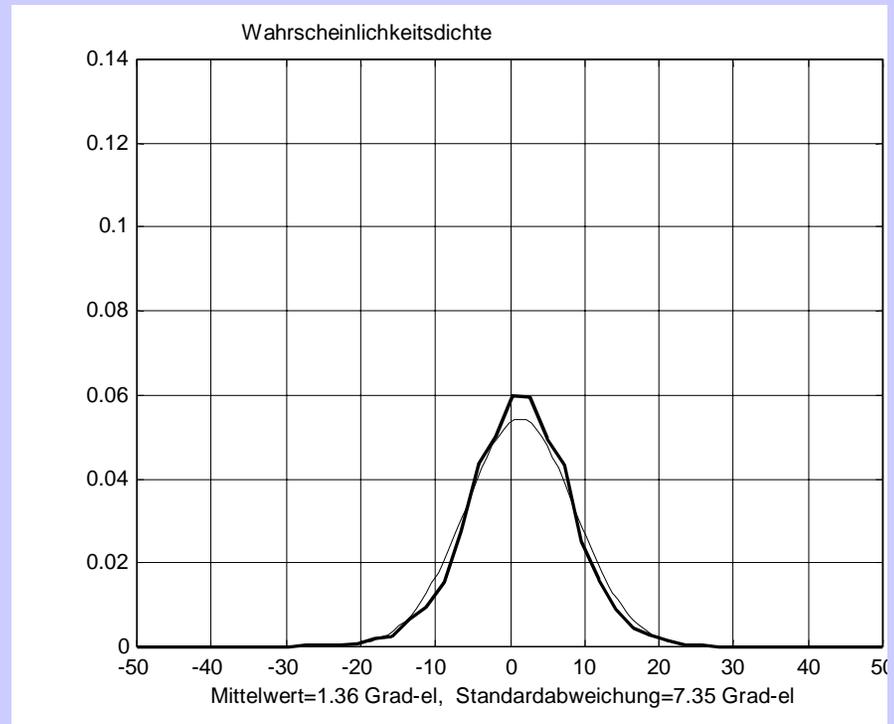
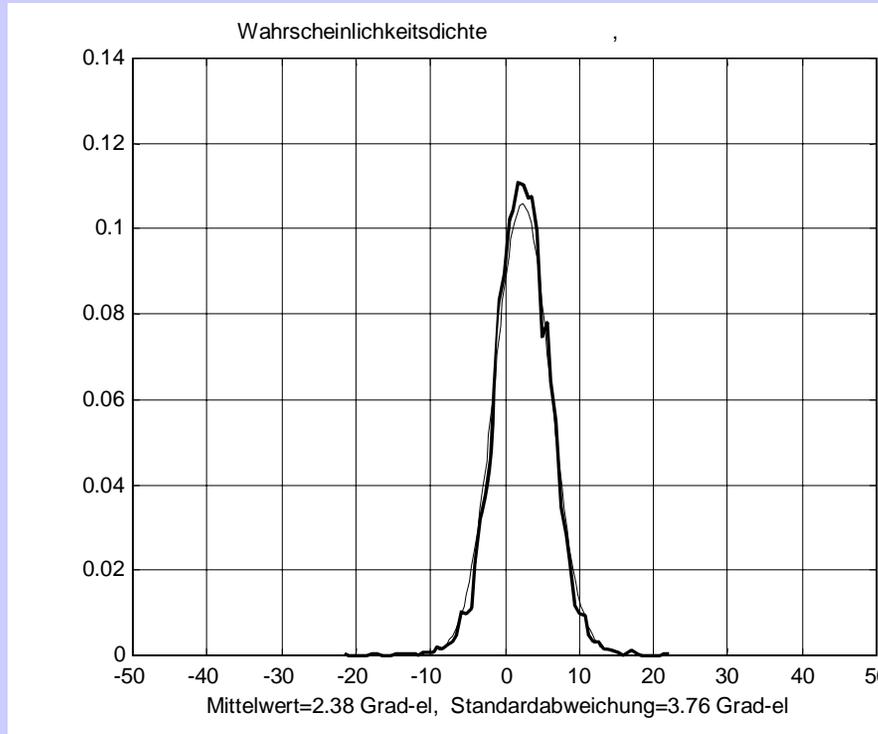
Anwendungen aus der Industrie mit überlastfesten INFORM-Antrieben aus der Industrie bekannt.

E) Eine über eine positive flussparallele Stromkomponente i_{sd} **steuerbare Verringerung der unerwünschten Effekte** der Punkte A), C) und D).



Betriebszustand der obigen Verteilungen:	$i_q=1, i_d=0$ Nennmoment	$i_q=2, i_d=0$ doppeltes Nennmoment	$i_q=2, i_d=1$ doppeltes Nennmoment mit Sättigungsverstärkung
Standardabweichung σ (Grad el.)	6.2	7.0	5.8

Verteilung $\Delta\gamma$ (stationär) bei verschiedenen i_{sd} - und i_{sq} -Strömen.. (30.000 Messpunkte)

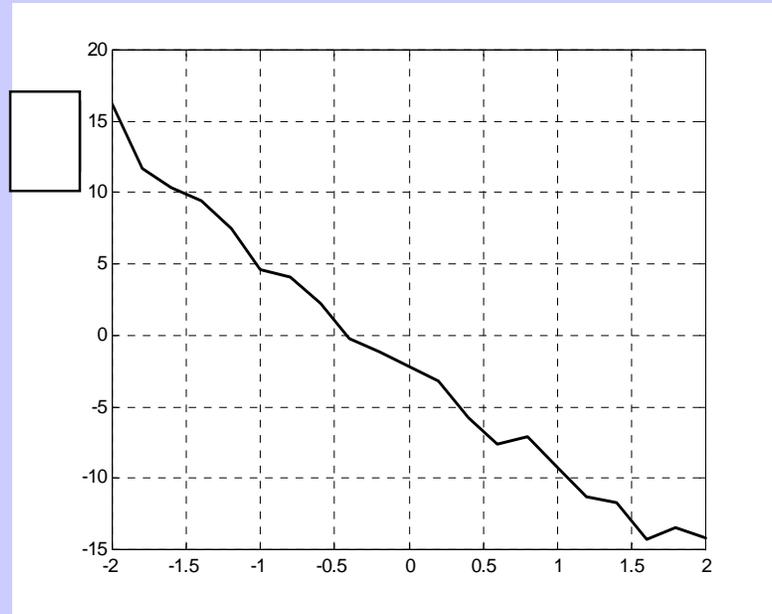


a) *Winkelfehlerverteilung für Motor A*

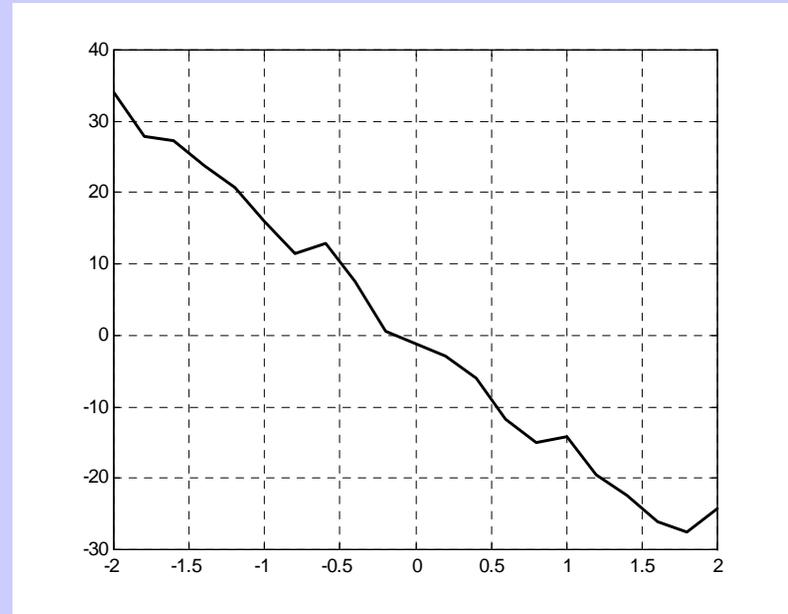
b) *Winkelfehlerverteilung für Motor B*

Maschine mit hoher und mäßiger INFORM-Tauglichkeit

(Fehler unter 5° : „Tauglich“ Fehler über 10° : „Untauglich“)



a) Lastabhängigkeit für Motor A

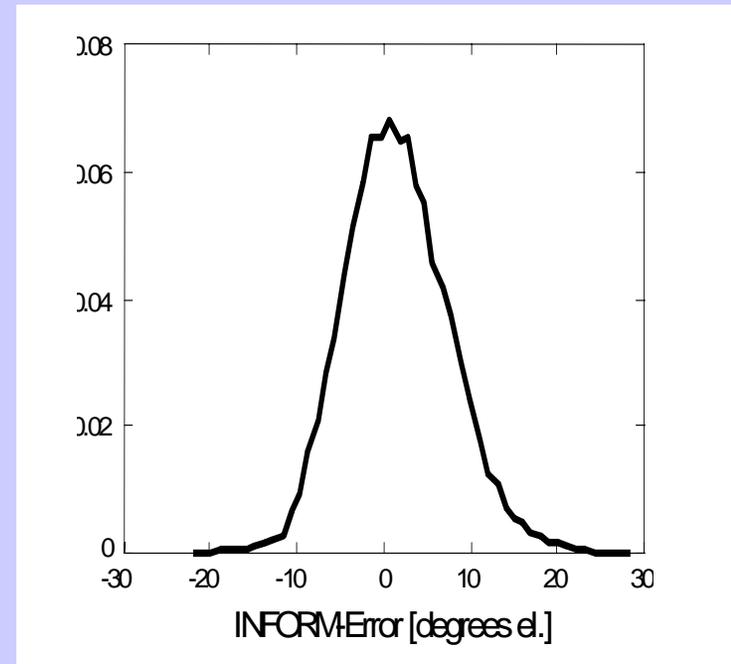
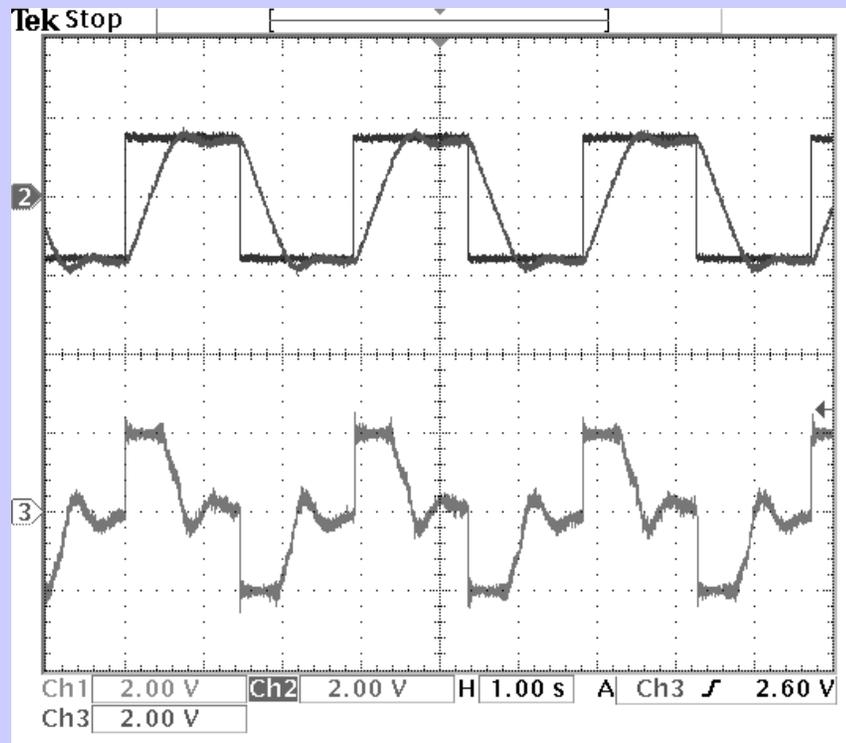


b) Lastabhängigkeit für Motor B

(Anderer y-Maßstab als Motor A)

Typisches Verhalten: Gut INFORM-taugliche Maschine (links) hat schwächere Lastabhängigkeit des systematischen Winkelfehlers

(links: Fehlererwartungswert 4° , Lastabhängiger Fehler 7° /Nennstrom
rechts: Fehlererwartungswert 8° , Lastabhängiger Fehler 15° /Nennstrom)

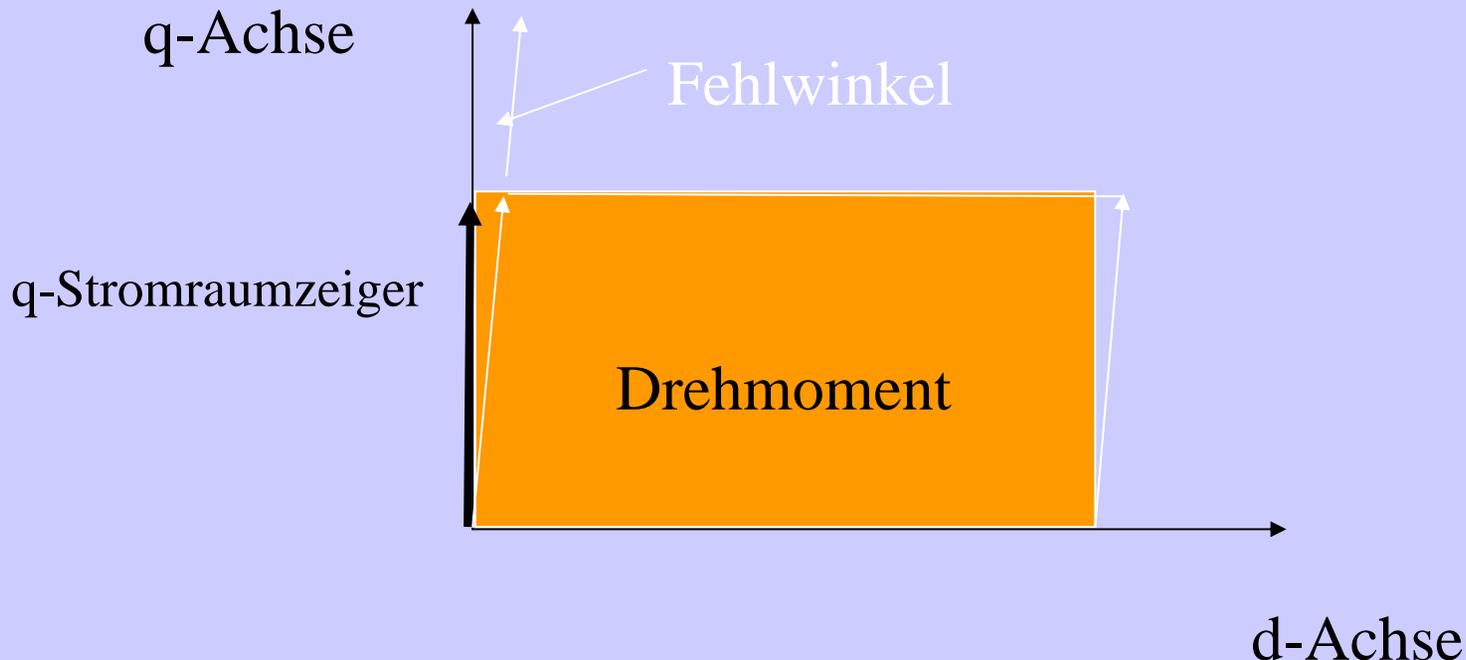


Messung zur Bestimmung der dynamischen $\Delta\gamma$ -Verteilung:

*obere Kurven: ω_{soll} und geschätztes ω_{ist} ($\pm 0.3 \cdot n_{nenn}$), Untere Kurve: $i_{q,ist} \in [-2 \dots +2]$
Testzyklus mit ca. einem Lastwechsel/sec. **Regelung auf INFORM sensorlos mit Beobachter, drehzahl geregelt.***

Rechtes Bild: Statistische INFORM-Fehlerverteilung (praktisch gleich wie stationär)

INFORM in drehmomentgesteuerten Anwendungen



Fläche entspricht dem Drehmoment und wird bei reiner q-Stromsteuerung praktisch nicht vom INFORM-Fehlwinkel verändert

INFORM in drehzahlgeregelten Anwendungen

Drehzahl wird integralgenau eingehalten

Stochastischer Drehzahlrippel aus Beobachteraussgang wenige Prozent

Drehzahlregler-P-Anteil etwas geringer einzustellen als bei geberbehafteten Systemen (Wegen Istwerttauschens)

Der unterlagerte Stromregelkreis bleibt bei INFORM praktisch gleich schnell wie mit Geber (typische Stromregelzeiten in wenigen Millisekunden)

INFORM in lagegeregelten Anwendungen

Istlage ist leicht verrauscht (Standardabweichung einige Grad el.)

Daher ist Lageregler-P-Anteil deutlich geringer einzustellen als bei geberbehafteten Systemen

Der geschlossene Lageregelkreis ist daher deutlich weicher als vergleichbare geberbehaftete Systeme. Die Istlage wird aber im Bereich der Standardabweichung gut eingestellt.

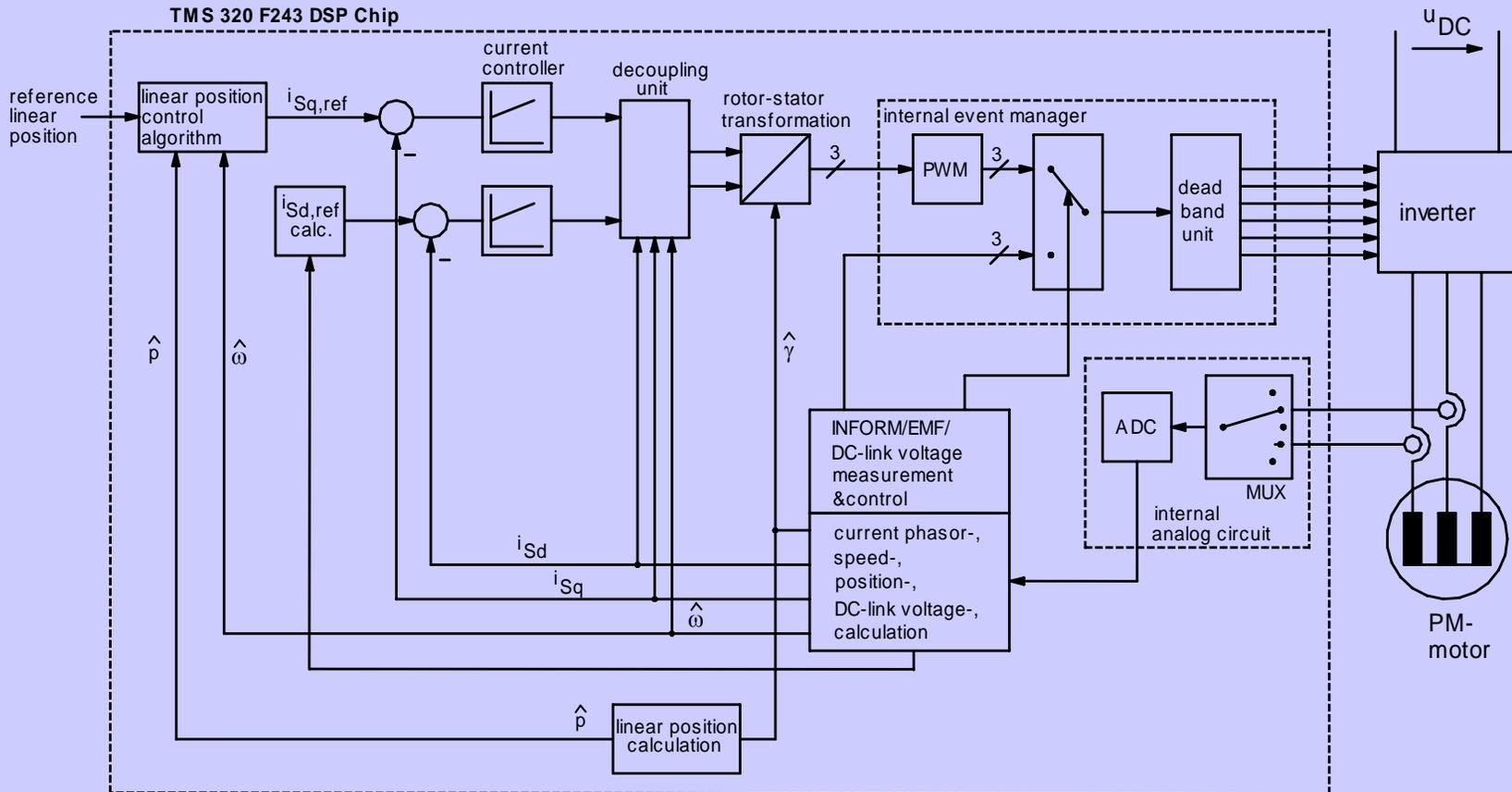
Daher für Lageregelssysteme mit mittlerer Dynamik und Genauigkeit einsetzbar.

- **Kundenanforderung:**
 - Durchmesser Motor < 63 mm
 - Drehzahl : 0 - 200 U/min
 - Drehmoment: 22 Nm
 - volles Moment im Stillstand
 - stark verschmutzte Umgebung
 - höchste Verfügbarkeit
- **Lösung:**
 - Serien-PM-Motor + Planetengetriebe
 - Serienumrichter
 - **INFORM-Software integriert in Standardsoftware**
 - Beibehaltung der Bedienoberfläche und Reglersoftware

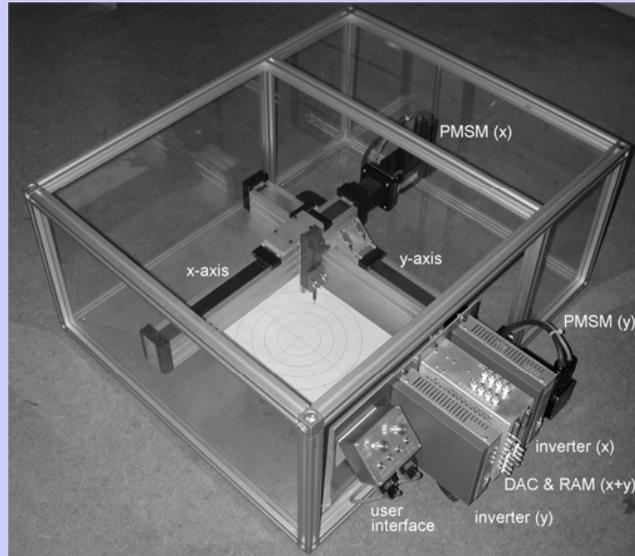


BLICK HINTER DIE KULISSEN (Druckmaschine - Hilfsantrieb)

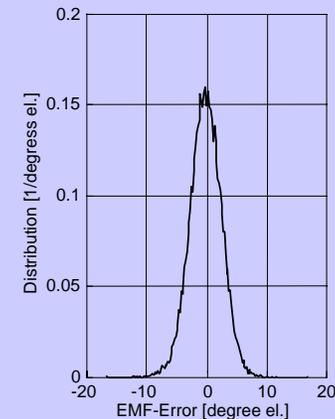
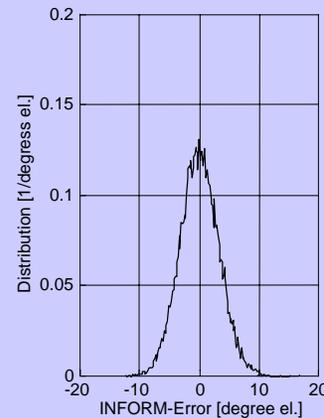
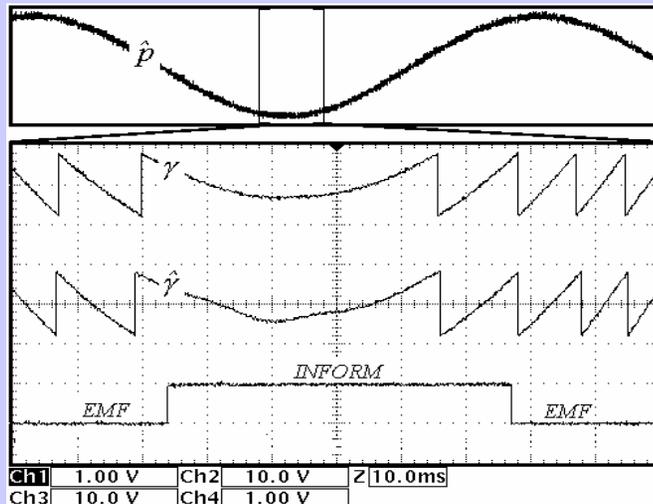




Positionsvorgabe p / Unterlagerte Drehzahlregelung liefert Sollmoment bzw. $i_{sq,ref}$
Unterlagerte Stromregelung in Rotorkoordinaten liefert Spannungsvorgabe
INFORM- und EMK-Algorithmen unterbrechen PWM und liefern Position u. Drehzahl



- Hochdynamische Verfolgung einer Sollbahn
- Ruckfreie Initialisierung mit Großsignal-INFORM-Testimpulsfolge
- Umschalten zwischen INFORM und EMK-Modell bei ca. 20 % der Nenndrehzahl
- Kopplung der beiden Achsen über CAN-Bus



INFORM-Fehler: 4Grad EMK-Fehler: 3 Grad

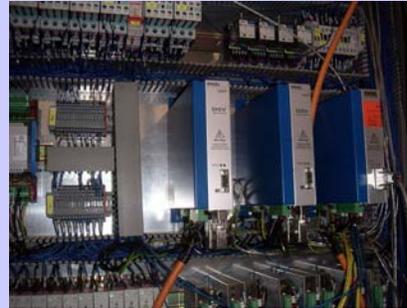
Links: Hochdynamische sinusförmige Wegvorgabe \hat{p} , Tatsächlicher (nur für Verifikation) und geschätzter Winkel sowie aktives Modell

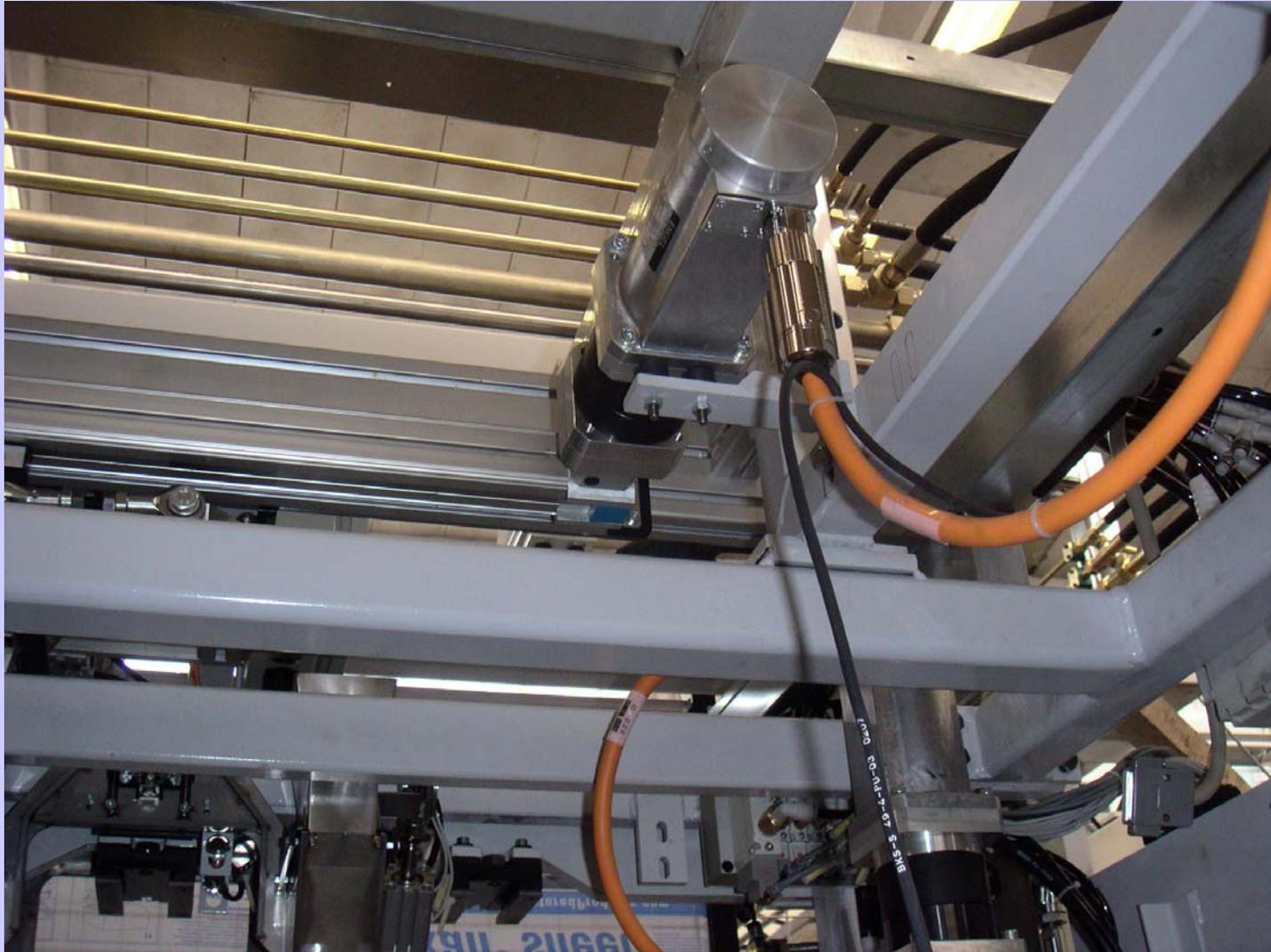
- **Anforderung:**

- Positionierung ohne Gebersystem
- Drehzahl : 0 - 4.500 U/min
- Drehmoment: 2 Nm
- volles Moment im Stillstand (Druck in Form mit definiertem Moment)
- stark verschmutzte Umgebung

- **Lösung:**

- sensorloser INFORM-Drive

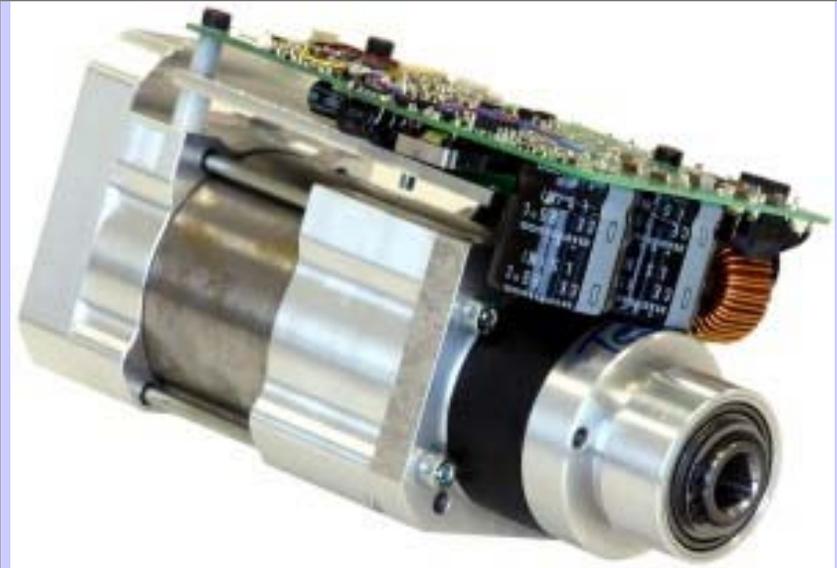




- **Kundenanforderung:**
 - Möglichst kompakter, drehzahlregelbarer Getriebemotor
 - volles Moment im Stillstand
 - höchste Verfügbarkeit
- **Lösung:**

Antriebssystem 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 Getriebe wurde auf mit einer Polygon- Innenverzahnung nach DIN32711 ausgeführt. Der ebenfalls kundenspezifisch realisierte digitale Umrichter betreibt den Motor im sensorlosen "INFORM"- Betrieb nach Prof. Schrödl.



- **Industrie:**

- Antriebe für **Textilmaschinen**
Herausforderung: Volles
Losbrechmoment, hochgenaue
Drehzahlführung, Schleichgang,
sehr variables Trägheitsmoment
- Antriebe für **Wasserpumpe und
Lüfter**
Herausforderung: Low Cost
System bei hohem
Wirkungsgrad (minimale
Hardware)

**Bild: Low-cost INFORM-
PSM-Pumpe**

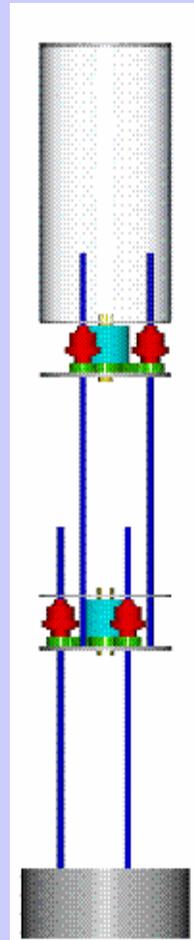
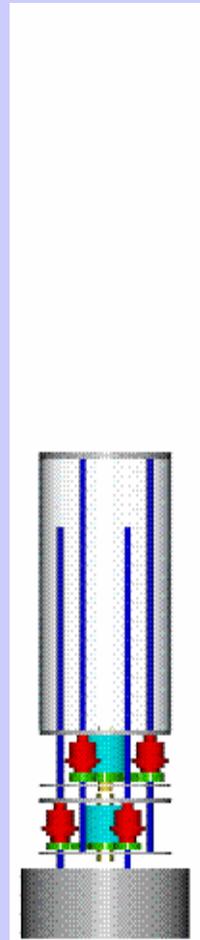
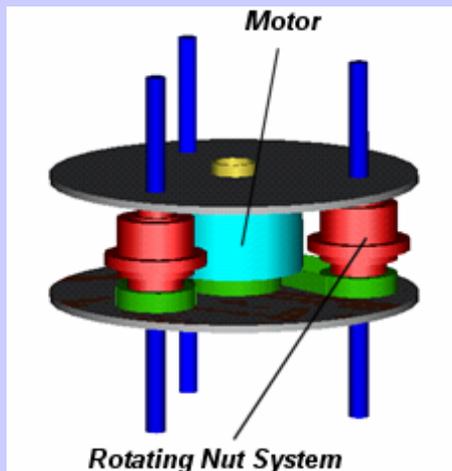
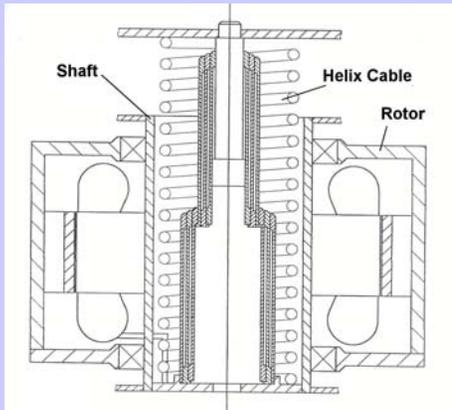
- **Automotive:**

- Antriebe für **KFZ-Pumpen**
Herausforderung: Low Cost
System bei hohem Wirkungsgrad
(minimale Hardware), hoher
Zuverlässigkeit und hoher Stückzahl



Die Umkehrung der Geometrie: PM-AUSSENLÄUFER

Realisierter Prototyp:



Beispiel: Elektrisches Aufzugssystem



Numerische Analyse (FE-basiert) der Sättigung und Reluktanz

Prinzip:

Grunddurchflutung einprägen

Daraus Flussverkettungen

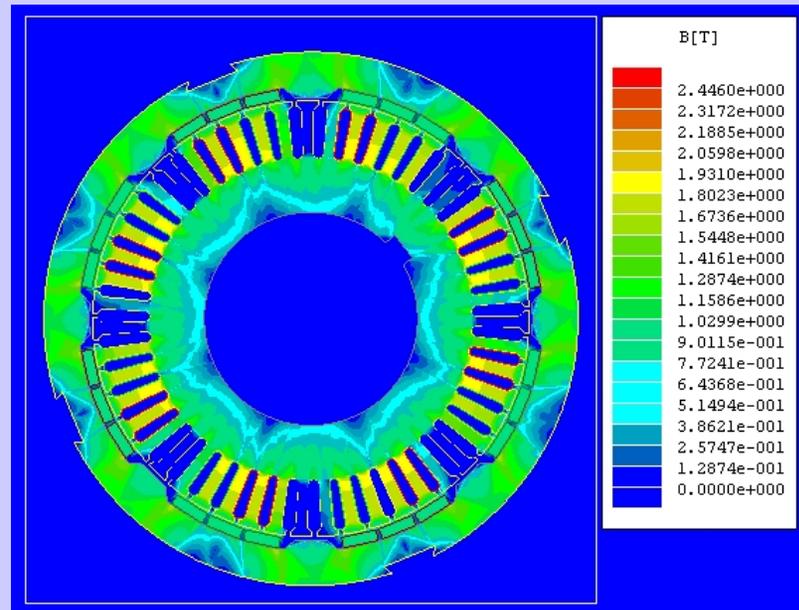
berechnen

Durchflutung leicht ändern

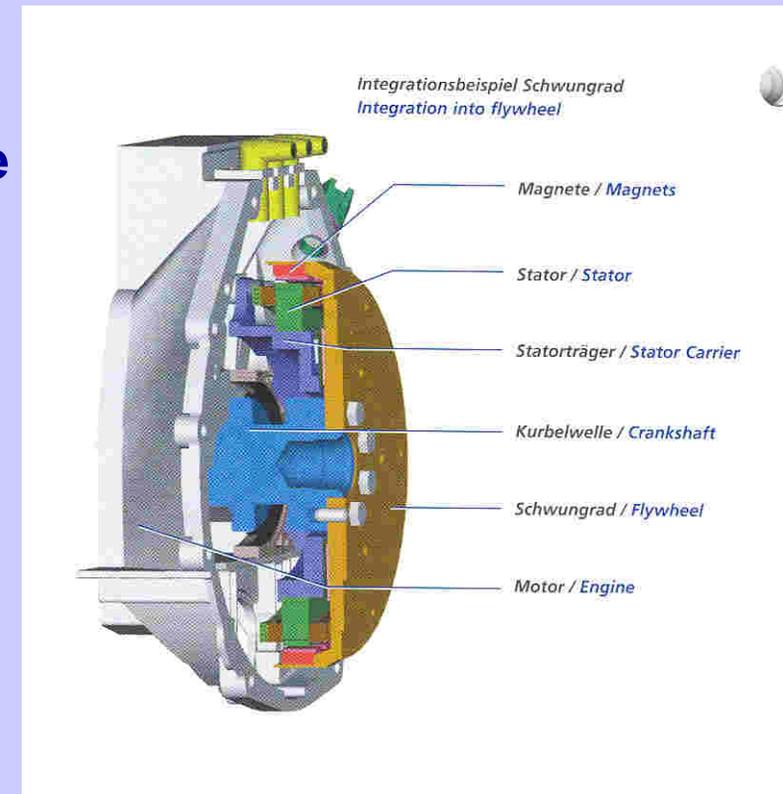
Modifizierte Flussverkettungen

berechnen

Flussverkettungsdifferenz bilden



- ➔ **Bevorzugt im Kupplungsgehäuse des KFZ realisiert**
- ➔ **Schwungrad trägt Magnetrotor**
- ➔ **Innenstator hochpolig – Sensor teuer!**
- ➔ **Motor beim Startvorgang kurzfristig hoch überlastet**
- ➔ **Starke Vibrationen am Schwungrad – großer Luftspalt wichtig .. PM!**



Kommerzieller Startergenerator

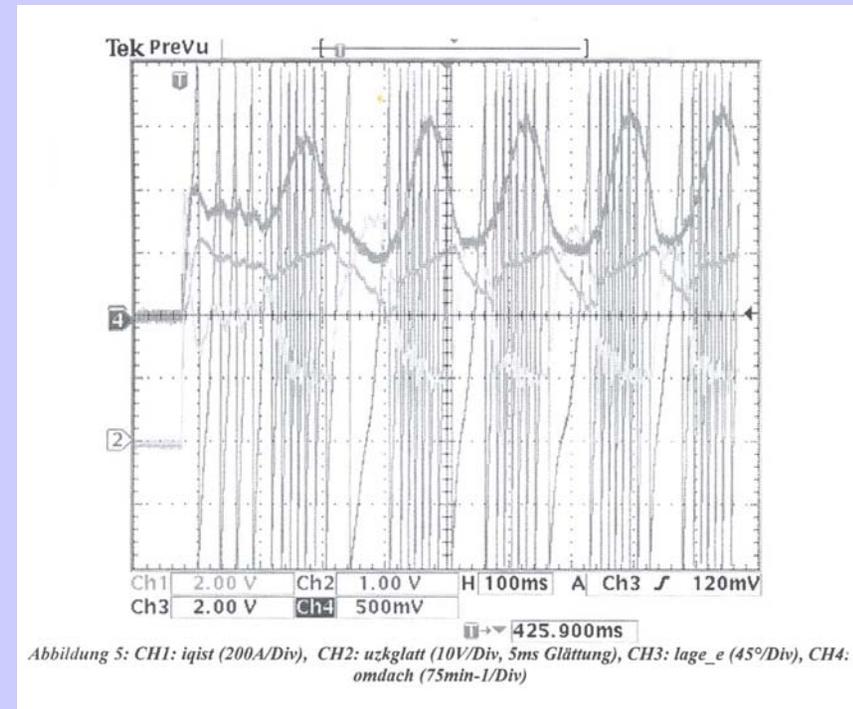
Bevorzugt im Kupplungsgehäuse
des KFZ realisiert

Schwungrad trägt Magnetrotor

Innenstator hochpolig – Sensor
teuer!

Motor beim Startvorgang
kurzfristig hoch überlastet

Starke Vibrationen am
Schwungrad – großer Luftspalt
wichtig .. PM!

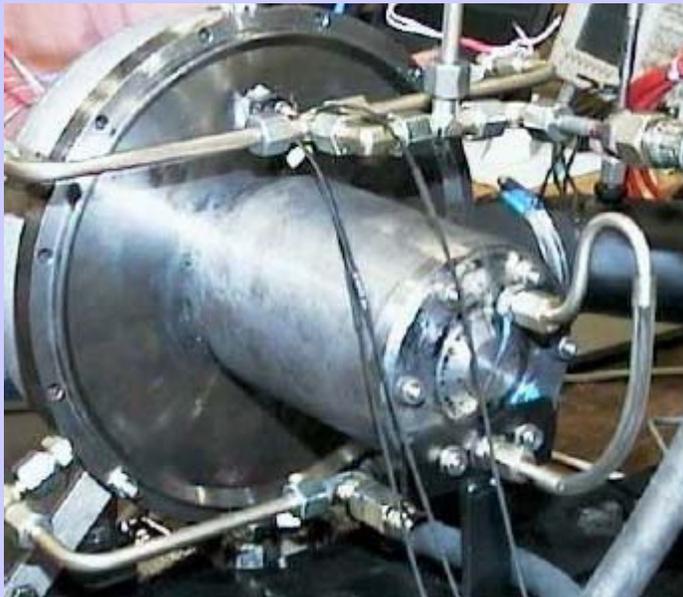
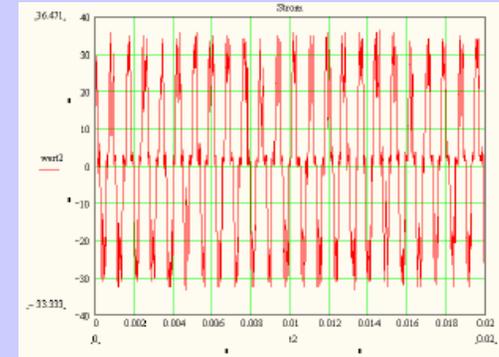


Hochlauf sensorlos-INFORM
bei Kaltstart - 250 Nm, 700 A

- **Kundenforderung:**

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

Rechts:
Strom bei
 80.000
U/min

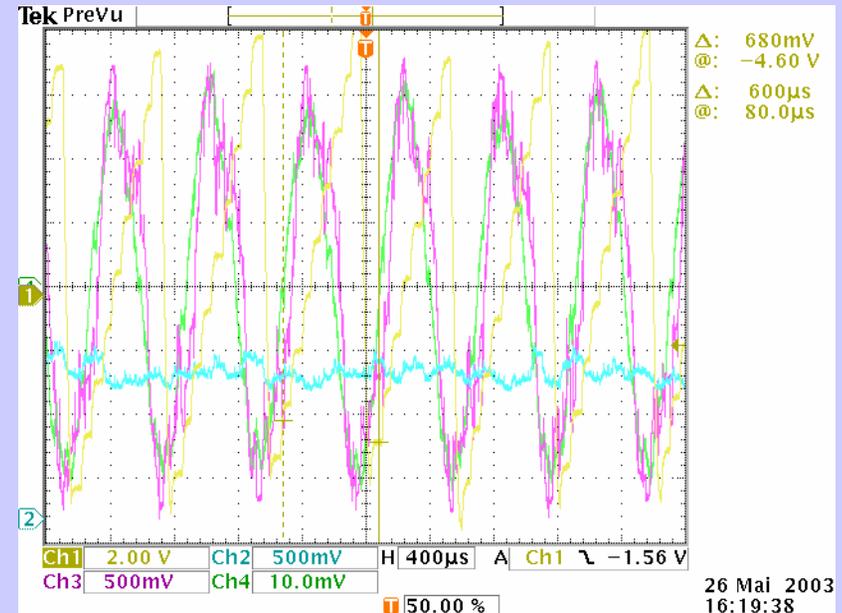
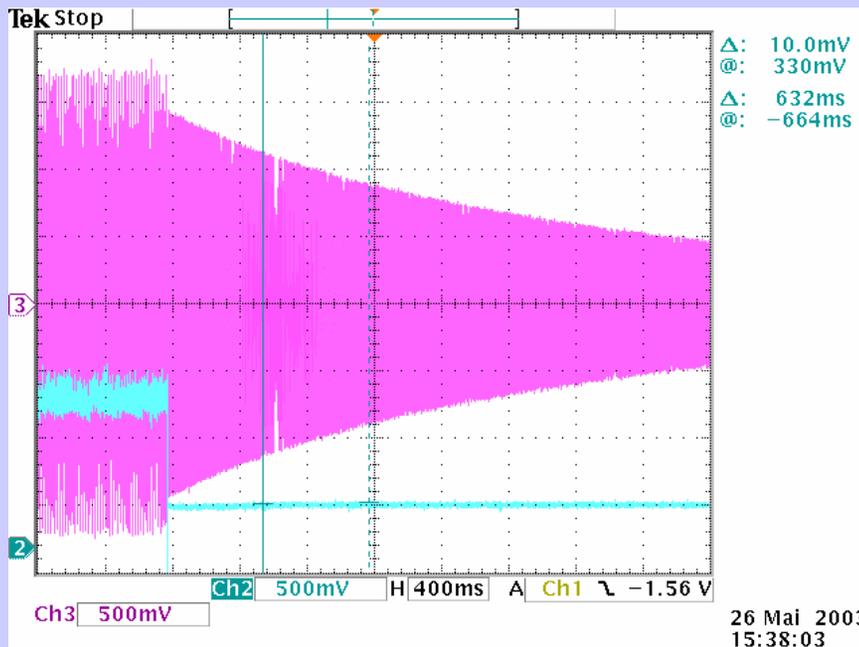


Zusammengebautes High-Speed-Aggregat



Entwickelter Rotor ohne Armierung

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



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

Auslaufversuch von 100.000 U/min

- **Zerreissprobe jenseits der 100.000 U/min**



.. Grenze erkannt

INDUSTRIE:

Positioniersysteme (rechts)
Transportsysteme, Logistik
Traktionsantriebe

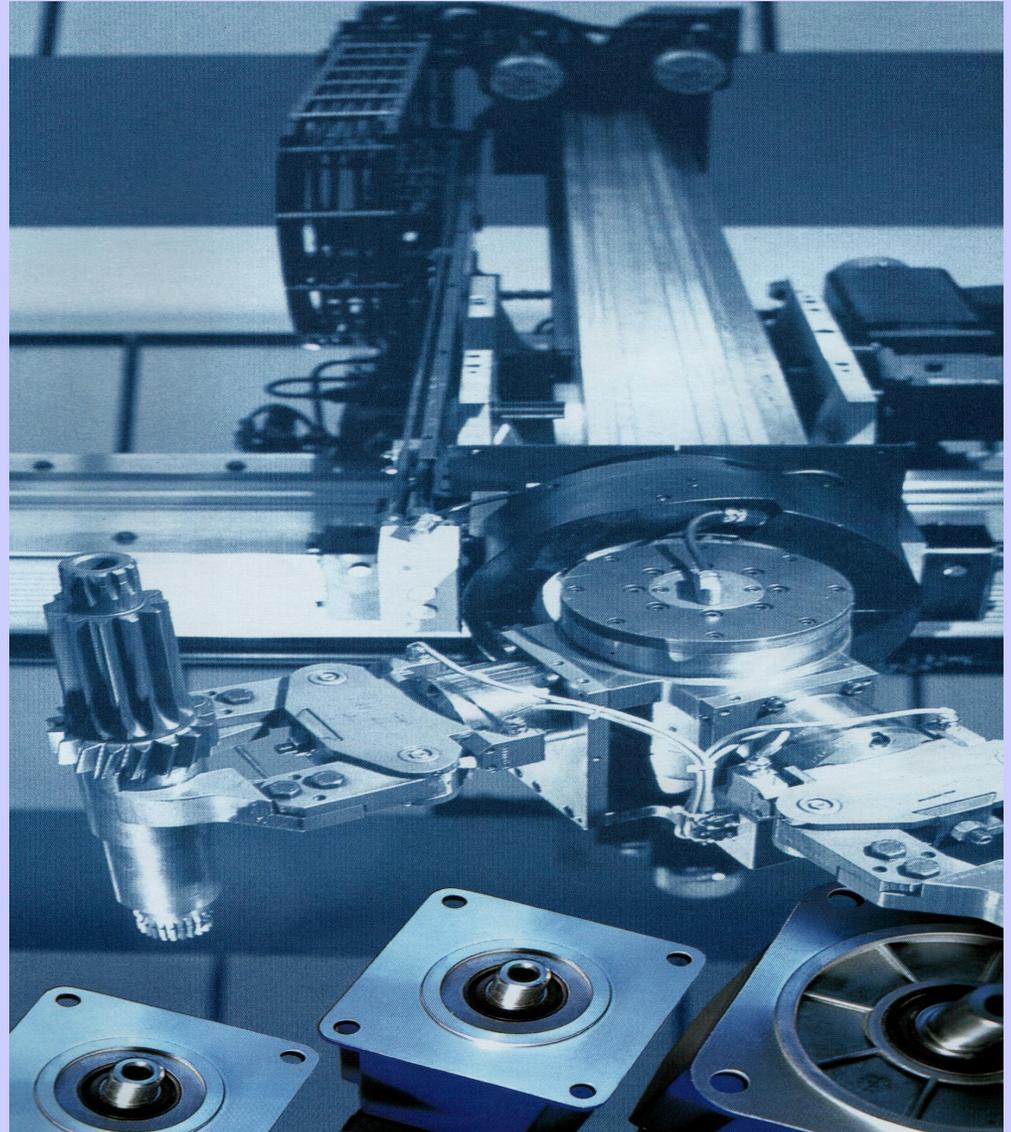
MEDIZIN:

Dentalantriebe
Pumpen
Prothetik

AUTOMOTIVE:

Elektrische Lenkung
Elektrische Bremse
Startergeneratoren
Automatikgetriebe

und viele andere ...



- **STAND DER TECHNIK SENSORLOSER VERFAHREN**
- **VORTEILE UND GRENZEN**
 - Hohe Dynamik und Positionierfähigkeit ohne jeglichen Geber
 - Antriebe höchster Kompaktheit, Effizienz und Robustheit
 - Systemkosten deutlich unter konventionellen PM-Antrieben
 - Genauigkeit der Lageerfassung auf einige Grad (elektrisch) begrenzt
- **INDUSTRIE- UND AUTOMOTIVE-ANWENDUNGEN**
- **WEITERE APPLIKATIONEN IN NAHER ZUKUNFT**
 - Drehmoment-, drehzahl- und lagegeregelt Antriebe mit hoher Low- und High-Speed-Qualität
 - Einsatzbereiche Industrie, Medizin, Traktion, Automotive, etc.