

**51. IWK**  
Internationales Wissenschaftliches Kolloquium  
International Scientific Colloquium



**PROCEEDINGS**

**11-15 September 2006**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING  
AND INFORMATION SCIENCE**



**INFORMATION TECHNOLOGY AND  
ELECTRICAL ENGINEERING -  
DEVICES AND SYSTEMS,  
MATERIALS AND TECHNOLOGIES  
FOR THE FUTURE**

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=12391>

## Impressum

Herausgeber: Der Rektor der Technischen Universität Ilmenau  
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter Scharff

Redaktion: Referat Marketing und Studentische  
Angelegenheiten  
Andrea Schneider

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik  
Susanne Jakob  
Dipl.-Ing. Helge Drumm

Redaktionsschluss: 07. Juli 2006

Technische Realisierung (CD-Rom-Ausgabe):  
Institut für Medientechnik an der TU Ilmenau  
Dipl.-Ing. Christian Weigel  
Dipl.-Ing. Marco Albrecht  
Dipl.-Ing. Helge Drumm

Technische Realisierung (Online-Ausgabe):  
Universitätsbibliothek Ilmenau  
[ilmedia](#)  
Postfach 10 05 65  
98684 Ilmenau

Verlag:  Verlag ISLE, Betriebsstätte des ISLE e.V.  
Werner-von-Siemens-Str. 16  
98693 Ilmenau

© Technische Universität Ilmenau (Thür.) 2006

Diese Publikationen und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Mit Ausnahme der gesetzlich zugelassenen Fälle ist eine Verwertung ohne Einwilligung der Redaktion strafbar.

ISBN (Druckausgabe): 3-938843-15-2  
ISBN (CD-Rom-Ausgabe): 3-938843-16-0

Startseite / Index:  
<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=12391>

U. Beckert, H. Arnold

## Sensorlose Zustandsregelung zur Verschleißminderung

### 1. EINLEITUNG

Bei wichtigen geregelten Drehstromantrieben (wie z.B. den Traktions-, Windenergie-, Schredder- oder Walzwerksantrieben) ist das mechanische System schwingungsfähig. Für regelungstechnische Zwecke wird es meistens durch einen Zweimassendreh Swinger ausreichend genau beschrieben. Seine Eigenfrequenz liegt meist unter 20 Hz. Bei den klassischen Antriebsregelungen führen Änderungen des Luftspalt- oder des Lastmomentes zu Torsionsschwingungen, die das Material ermüden und die Lebensdauer der mechanischen Bauteile verkürzen.

Durch Einbeziehung der Mechanik in die Regelung, wie z.B. mit einer Zustandsregelung nach Bild 1, lassen sich die auftretenden Torsionsschwingungen aktiv dämpfen und der Verschleiß vermindern [1, 2, 3, 4]. Bild 1 zeigt aber auch, dass für eine Zustandsregelung die Istwerte aller Zustandsgrößen des mechanischen Systems benötigt werden. Da ihre kontinuierliche Messung sehr aufwändig wäre, werden sie zweckmäßig mit Hilfe eines Beobachters rekonstruiert.

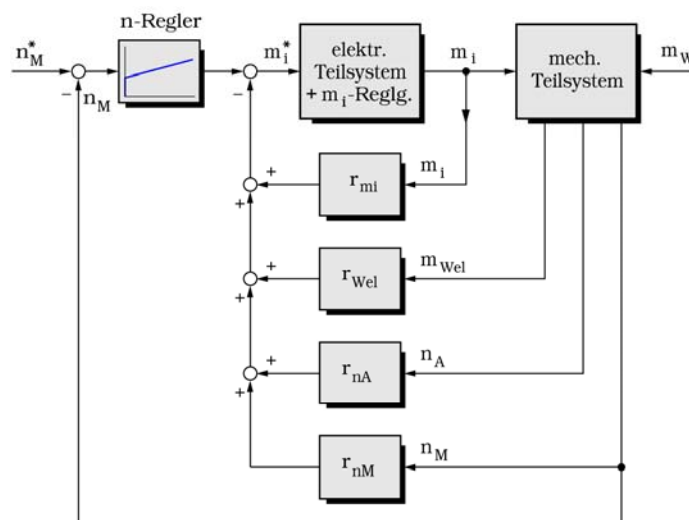


Bild 1: Blockschaftbild einer Zustandsregelung zur aktiven Schwingungsdämpfung

Alle bekannten Beobachter des mechanischen Systems bilden den Beobachterfehler aus der gemessenen und der geschätzten Motordrehzahl, benötigen also einen Drehzahlgeber mit hoher Auflösung. Besonders im Traktionsbereich müssen die Drehzahlgeber jedoch sehr robust sein. Dies erschwert bzw. verhindert den Einsatz von optischen Inkrementalgebern mit hoher Auflösung. Deswegen ist man im Traktionsbereich zunehmend bestrebt, den Antrieb ohne Messung der Drehzahl sensorlos zu regeln [5, 6, 7].

Im Beitrag wird über eine sensorlose Zustandsregelung zur aktiven Schwingungsdämpfung und Verschleißminderung berichtet. Kernstück dieser Zustandsregelung ist eine Schätzeinrichtung, die das Luftspaltmoment und die Drehzahl der Asynchronmaschine, das Wellenmoment im mechanischen Antriebsstrang sowie die Drehzahl und das Lastmoment der Arbeitsmaschine während des stationären und dynamischen Betriebes in hoher Qualität schätzt und die keinen Drehzahlsensor benötigt. Gemessen werden nur die Komponenten des Ständerspannungs- und Ständerstromraumvektors.

Die Schätzeinrichtung besteht aus drei Komponenten (s. Prinzipschaltbild, Bild 2), einem Drehmoment-Beobachter der Asynchronmaschine, einem Beobachter des als Zweimassendreh Swinger vorausgesetzten mechanischen Systems und einer Regelung des Luftspaltmoment-Fehlers zur Schätzung der Motordrehzahl.

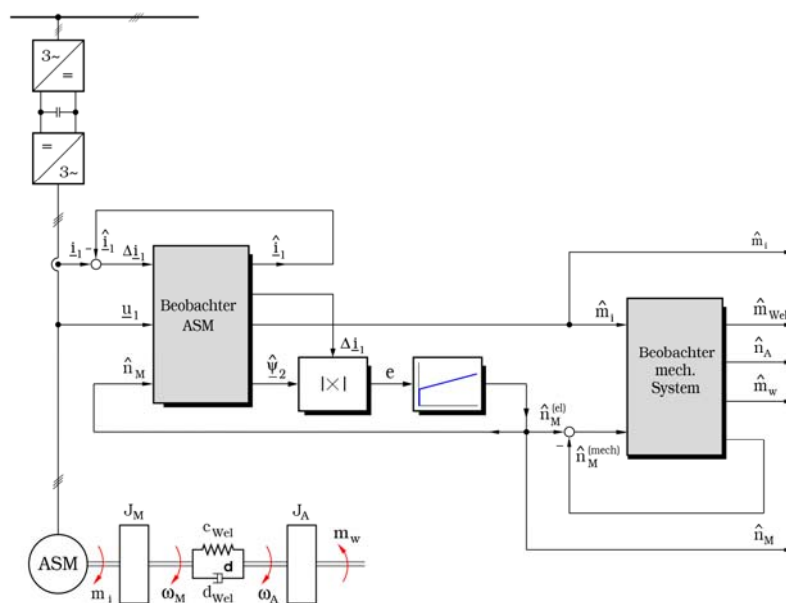


Bild 2: Prinzipschaltbild der Schätzeinrichtung

## 2. MODELL DER ASYNCHRONMASCHINE

Der entwickelten Schätzeinrichtung liegt das bekannte mathematische Modell des stromverdrängungsfreien Asynchronmotors im ständerbezogenen Koordinatensystem  $\alpha, j\beta$  zugrunde [5]:

$$\frac{d\underline{\psi}_1}{dt} = \underline{u}_1 - R_1 \underline{i}_1 \quad \frac{d\underline{\psi}_2}{dt} = jn \underline{\psi}_2 - R_2 \underline{i}_2 \quad (1,2)$$

$$\underline{\psi}_1 = X_1 \underline{i}_1 + X_h \underline{i}_2 \quad \underline{\psi}_2 = X_h \underline{i}_1 + X_2 \underline{i}_2 \quad (3,4)$$

$$m_i = \underline{\psi}_1 \times \underline{i}_1 = \frac{X_h}{X_2} (\underline{\psi}_2 \times \underline{i}_1) \quad (5)$$

$$\frac{dn}{dt} = \dot{n} = \frac{1}{T_M} (m_i - m_w) \quad (6)$$

Darin sind  $\underline{u}_1$  der Raumvektor der Ständerspannung,  $\underline{\psi}_1, \underline{\psi}_2$  die Raumvektoren der Ständer- und Läuferflüsse,  $\underline{i}_1, \underline{i}_2$  die Raumvektoren der Ständer- und Läuferströme,  $R_1, R_2$  die Ständer- und Läuferwiderstände,

$$X_1 = X_h + X_{\sigma 1} \quad X_2 = X_h + X_{\sigma 2} \quad (7)$$

die Ständer- und Läuferreaktanzen,  $X_h$  die Hauptfeldreaktanz und  $X_{\sigma 1}, X_{\sigma 2}$  die Ständer- und Läuferstreureaktanzen.

Dieses Gleichungssystem gilt unter den idealisierenden Annahmen

- eines vollkommen symmetrischen Aufbaus der Maschine,
- eines sinusförmigen Luftspaltfeldes,
- eines konstanten Sättigungszustandes sowie
- unter Vernachlässigung der Stromverdrängung und der Eisenverluste.

Für die verwendeten komplexen Raumzeiger gilt die Definition nach KOVACS [11]. Für den Ständerstromraumzeiger gilt z.B.:

$$i_1 = \frac{2}{3} [i_{1a}(t) + \underline{a} i_{1b}(t) + \underline{a}^2 i_{1c}(t)] = i_{1\alpha} + j i_{1\beta}, \quad (8)$$

wobei  $i_{1a}, i_{1b}, i_{1c}$  die Augenblickswerte der Ständerstrangströme und  $\underline{a} = e^{j2\pi/3}$  sind.

Alle vorkommenden Variablen und Parameter sind normiert. Dabei wurden die üblichen Bezugsgrößen [10] (Index B) verwendet:

$$\begin{aligned} f_B &= f_{1n} & U_B &= \sqrt{2} U_{1n} \\ n_B &= \frac{f_{1n}}{p} & I_B &= \sqrt{2} I_{1n} \\ \omega_B &= \omega_{1n} = 2\pi f_{1n} & R_B &= X_B = \frac{U_B}{I_B} \end{aligned} \quad (9)$$

$$t_B = \frac{1}{\omega_B} = \frac{1}{2\pi f_{1n}} \quad \psi_B = \frac{U_B}{\omega_B} = \frac{\sqrt{2} U_{1n}}{2\pi f_{1n}}$$

$$M_B = \frac{P_B}{\omega_B / p} = \frac{3p U_{1n} I_{1n}}{2\pi f_{1n}}$$

$$T_M = \omega_B \frac{J_M \omega_B / p}{M_B} \quad (10)$$

ist die bezogene Anlaufzeitkonstante, die man bei der Normierung der Bewegungsgleichung erhält.

### 3. DREHMOMENT-BEOBACHTER DER ASM

Die Schätzung des Luftspaltmomentes der Asynchronmaschine erfolgt mit einem Beobachter, dem das  $\underline{u}_1, n$  – Modell zugrunde liegt. Es wird durch die Differentialgleichungen

$$\frac{d\underline{\psi}_1}{dt} = \underline{u}_1 - \frac{R_1}{\sigma X_1} \left[ \underline{\psi}_1 - \frac{X_h}{X_2} \underline{\psi}_2 \right] \quad (11)$$

$$\frac{d\underline{\psi}_2}{dt} = jn \underline{\psi}_2 - \frac{1}{\sigma T_2} \left[ \underline{\psi}_2 - \frac{X_h}{X_1} \underline{\psi}_1 \right] \quad (12)$$

beschrieben. Bild 3 zeigt sein Signalfussbild.

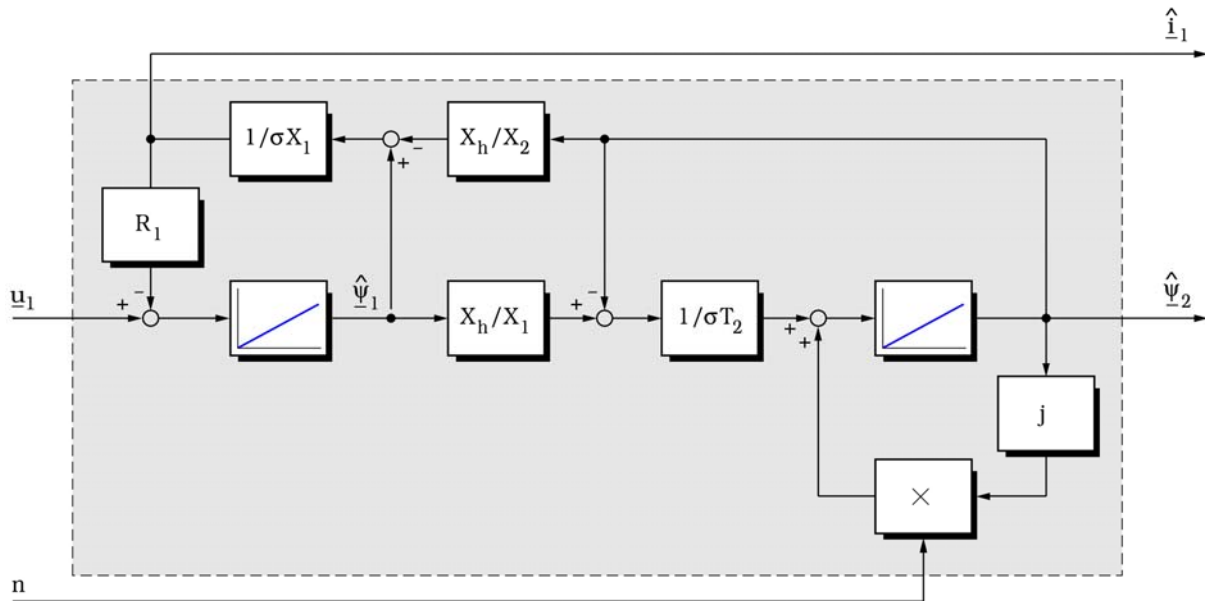


Bild 3: Signalfussbild des  $\underline{u}_1, n$ - Modells der ASM

Zur Verbesserung der Fluss- und Drehmomentschätzung wurde für dieses zeitvariante elektrische Teilsystem ein Beobachter entworfen. Das System heißt zeitvariant, weil die Systemmatrix  $\underline{A}$  auch von der Drehzahl abhängt, die sich im dynamischen Betrieb schnell ändern kann. Das Differentialgleichungssystem des Beobachters lautet [14]:

$$\frac{d\hat{\underline{\psi}}_1}{dt} = -\frac{R_1}{\sigma X_1} \hat{\underline{\psi}}_1 + \frac{R_1}{\sigma X_1} \frac{X_h}{X_2} \hat{\underline{\psi}}_2 + \underline{u}_1 + \underline{K}_1 (\underline{i}_1 - \hat{\underline{i}}_1) \quad (13)$$

$$\frac{d\hat{\underline{\psi}}_2}{dt} = \frac{R_2}{\sigma X_2} \frac{X_h}{X_1} \hat{\underline{\psi}}_1 - \left[ \frac{R_2}{\sigma X_2} - jn \right] \hat{\underline{\psi}}_2 + \underline{K}_2 (\underline{i}_1 - \hat{\underline{i}}_1) \quad (14)$$

$$\dot{\underline{\hat{x}}} = \underline{A}(n) \underline{\hat{x}} + \underline{B} \underline{u} + \underline{K} (\underline{y} - \underline{\hat{y}}) \quad (15)$$

$$\hat{i}_1 = \frac{1}{\sigma X_1} \hat{\psi}_1 - \frac{1}{\sigma X_1} \frac{X_h}{X_2} \hat{\psi}_2 \quad (16)$$

$$\underline{\hat{y}} = \underline{C} \underline{\hat{x}} \quad (17)$$

Zustandsgrößen sind die Komponenten der Ständer- und Läuferflussverkettungen, Eingangsgrößen sind die Ständerspannungskomponenten. Die Ständerstromkomponenten bilden die messbaren Ausgangsgrößen, aus denen der Beobachtungsfehler gebildet wird. In Bild 4 ist sein Signalflussbild dargestellt.

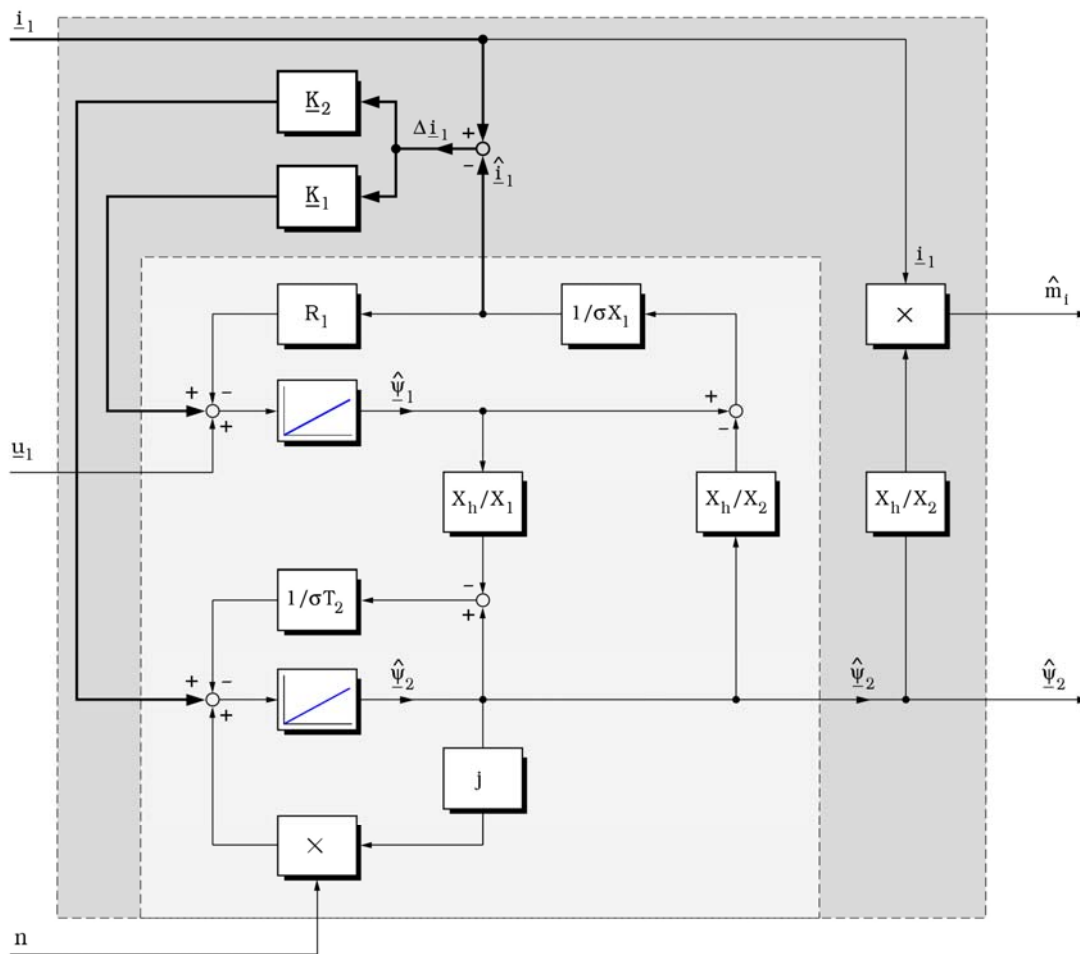


Bild 4: Signalflussbild des Drehmoment-Beobachters der ASM

Aus den vom Beobachter geschätzten Flussverkettungen und dem gemessenen Ständerstrom wird über

$$\hat{m}_1 = \hat{\psi}_1 \times i_1 = \frac{X_h}{X_2} (\hat{\psi}_2 \times i_1) \quad (18)$$



das Luftspaltmoment berechnet.

Zur Verbesserung der Drehmomentschätzung ist das Motormodell noch um die Hauptfeldsättigung und die Eisenverluste erweitert worden, s. [14].

Für die Rückführkoeffizienten  $\underline{K}$  wurde die von Zägelein [15] optimierte Einstellung übernommen. Dadurch erhält man einen Beobachter, der auch bei Parameterverstimmungen von  $\pm 20\%$  gegenüber den Mittelwerten das Luftspaltmoment im stationären und im dynamischen Betrieb mit hoher Genauigkeit schätzt.

Die Bilder 5a und 6a zeigen die Gegenüberstellungen der zeitlichen Verläufe des vom Beobachter geschätzten Luftspaltmomentes  $\hat{m}_i(t)$  und des durch Differentiation der gemessenen Drehzahl  $n(t)$  gewonnenen Beschleunigungsmomentes

$$m_b = T_M \frac{dn}{dt} \quad (19)$$

beim Leeranlauf eines feldorientiert geregelten 42 kW-Kurzschlussläufermotors. In den Bildern 5b und 6b sind die zeitlichen Verläufe der gemessenen Drehzahl  $n(t)$  und der durch Integration des geschätzten Luftspaltmomentes berechneten Drehzahl

$$\hat{n} = \frac{1}{T_M} \int \hat{m}_i(t) dt \quad (20)$$

einander gegenübergestellt.

Im Hinblick auf seinen Einsatz in einer sensorlosen Zustandsregelung wird dem Beobachter der ASM anstelle der gemessenen Drehzahl  $n_M$  ein von einer Fehlerregelung des Luftspaltmomentes gelieferter Schätzwert  $\hat{n}_M$  zugeführt: Das Luftspaltmoment lässt sich gemäß Gl. (5) als Kreuzprodukt von Läuferflussraumvektor und Ständerstromraumvektor darstellen. Da der wahre Wert des Läuferflussraumvektors nicht bekannt ist, wird der Fehler des Luftspaltmomentes aus einer ersten  $\hat{m}_i$  und einer zweiten  $\hat{\hat{m}}_i$  Näherung gebildet:

$$\begin{aligned} \Delta m_i &= m_i - \hat{m}_i \approx \hat{m}_i - \hat{\hat{m}}_i = \frac{X_h}{X_2} \left| (\underline{\hat{\psi}}_2 \times \underline{\hat{i}}_1) - (\underline{\hat{\psi}}_2 \times \underline{\hat{\hat{i}}}_1) \right| \\ \Delta m_i &\approx \frac{X_h}{X_2} \left| \underline{\hat{\psi}}_2 \times (\underline{\hat{i}}_1 - \underline{\hat{\hat{i}}}_1) \right| \end{aligned} \quad (21)$$

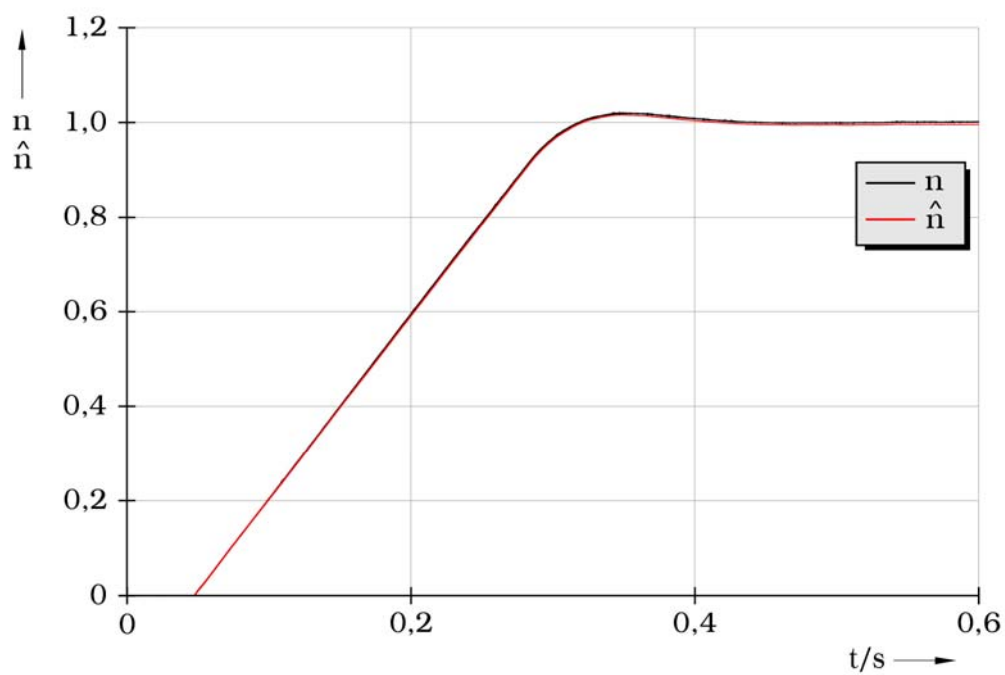
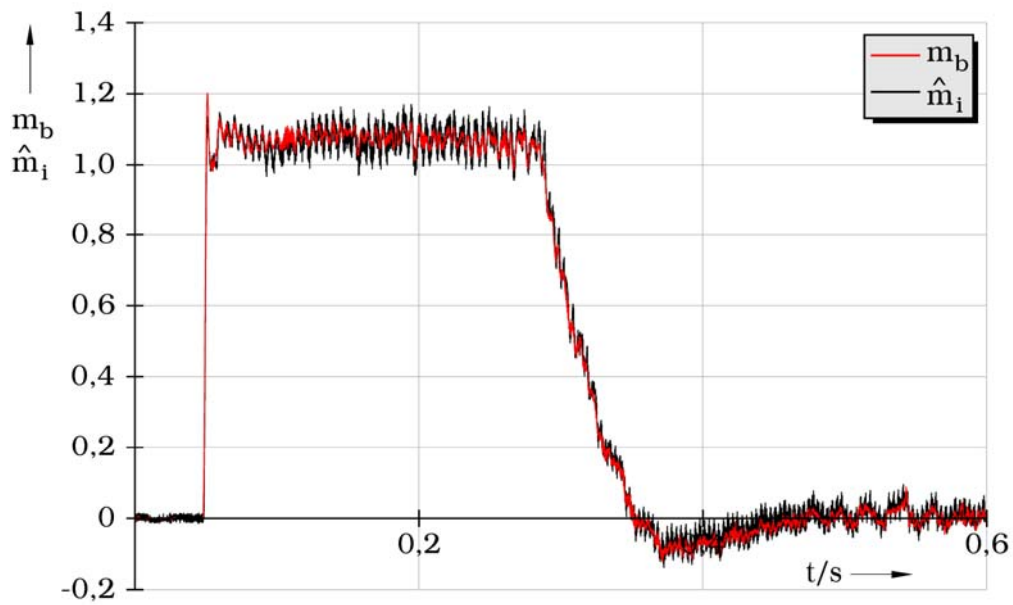


Bild 5: Leeranlauf eines feldorientiert geregelten 42 kW Asynchronmotors

von  $n^* = 0$  auf  $n^* = 1$

a) Verläufe von  $\hat{m}_i$  (Beobachter) und  $m_b$  (gemäß Gl. 19)

b) Verläufe von  $n$  und  $\hat{n}$  (gemäß Gl. 20)

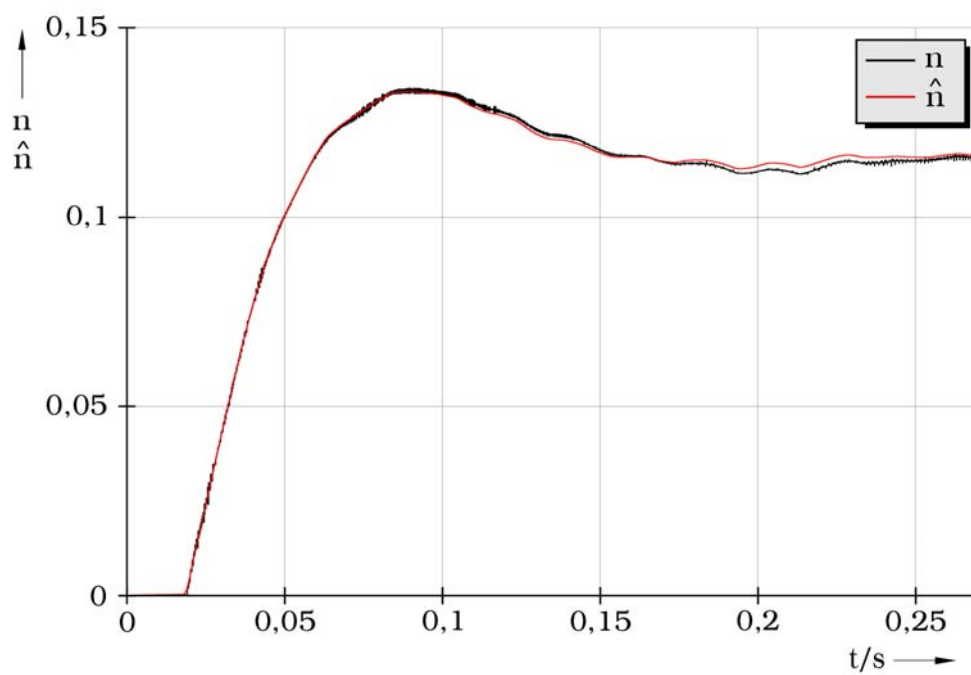
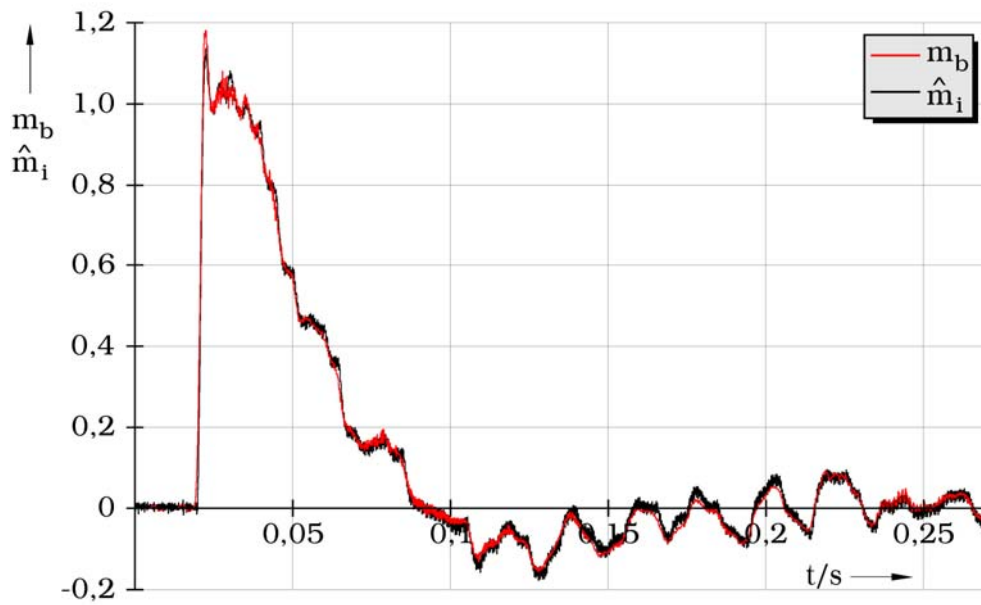


Bild 6: Leeranlauf eines feldorientiert geregelten 42 kW Asynchronmotors

von  $n^* = 0$  auf  $n^* = 0,12$

a) Verläufe von  $\hat{m}_i$  (Beobachter) und  $m_b$  (gemäß Gl. 19)

b) Verläufe von  $n$  und  $\hat{n}$  (gemäß Gl. 20)

Beide Näherungen verwenden den geschätzten Läuferflussvektor, die erste Näherung benutzt den gemessenen, die zweite Näherung den geschätzten Ständerstromraumvektor. Das Ausgangssignal des PI-Reglers entspricht der Motordrehzahl.

Die erste Näherung

$$\hat{m}_i = \frac{X_h}{X_2} (\hat{\underline{\psi}}_2 \times i_1) \quad (22)$$

wird als Schätzwert des Luftspaltmomentes verwendet.

#### 4. BEOBACHTER DES MECHANISCHEN SYSTEMS

Das mechanische Teilsystem des Antriebes liegt im Allgemeinen als Mehrmassendrehchwinger vor. Zumindest für regelungstechnische Zwecke lässt sich sein Verhalten meistens durch einen linearen Zweimassendrehchwinger mit den primären und sekundären Schwungmassen  $J_M$  und  $J_A$ , dazwischen eine elastische Welle mit  $c_{Wel}$  und  $d_{Wel}$  (Bild 1), ausreichend genau beschreiben.

Zur Schätzung seiner Zustandsgrößen wird für den Zweimassendrehchwinger ein zweiter Beobachter entworfen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass einem Beobachter grundsätzlich die gleichen Eingangsgrößen wie dem realen System zugeführt werden müssen:

Die erste Eingangsgröße des Zweimassendrehchwingers, das Luftspaltmoment  $m_i$ , wird vom Drehmoment-Beobachter der ASM geliefert.

Für die zweite Eingangsgröße, das nicht messbare Lastmoment  $m_w$ , wird ein Störmodell

$$\frac{d m_w}{dt} = 0 \quad (23)$$

angesetzt. D.h., das Lastmoment wird als neue Zustandsgröße interpretiert und dem Zweimassensystem hinzugefügt.

Der Beobachtungsfehler wird nicht, wie üblich, aus der gemessenen Motordrehzahl  $n_M$  und der vom Zweimassenmodell geschätzten Motordrehzahl  $\hat{n}_M^{(mech)}$  gebildet, sondern anstelle der gemessenen wird die vom erweiterten Drehmoment-Beobachter der ASM geschätzte Motordrehzahl  $\hat{n}_M^{(el)}$  verwendet.

Der auf diese Weise entstehende Beobachter des Zweimassendrehsehingers ist in Bild 7 dargestellt und wird durch folgende Differentialgleichung beschrieben:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{n}_M \\ \hat{m}_{W_{el}} \\ \hat{n}_A \\ \hat{m}_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{T_M} & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_c} & 0 & -\frac{1}{T_c} & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_A} & 0 & -\frac{1}{T_A} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{n}_M \\ \hat{m}_{W_{el}} \\ \hat{n}_A \\ \hat{m}_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{T_M} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} m_i + \begin{bmatrix} k_M \\ k_{W_{el}} \\ k_A \\ k_w \end{bmatrix} (\hat{n}_M^{(el)} - \hat{n}_M^{(mech)}) \quad (24)$$

$$\dot{\underline{\hat{x}}} = \underline{\mathbf{A}} \underline{\hat{x}} + \underline{\mathbf{B}} u + \underline{\mathbf{K}} (y - \hat{y})$$

Darin sind

$$T_M = \omega_{1n} \frac{J_M \omega_{1n} / p}{M_n} \quad T_A = \omega_{1n} \frac{J_A \omega_{1n} / p}{M_n} \quad (25, 26)$$

die bezogenen Anlaufzeitkonstanten des Motors und der Last,

$$T_c = \frac{p M_n}{c_{W_{el}}} \quad (27)$$

die der Federsteifigkeit  $c_{W_{el}}$  entsprechende Zeitkonstante.

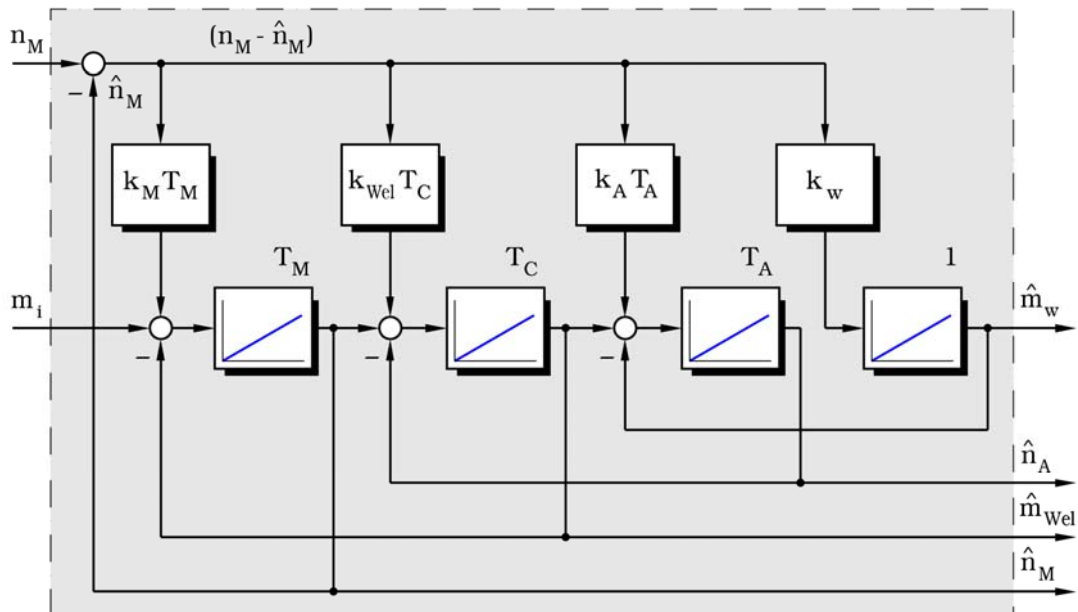


Bild 7: Blockschaltbild des Beobachters eines Zweimassendrehchwingers

Der Beobachterentwurf erfolgt durch Vorgabe der Beobachterpole. Ausgehend von den Eigenwerten des zu beobachtenden Systems, das einen doppelten Eigenwert im Nullpunkt der komplexen Ebene und ein zum Schwingungsglied gehörendes konjugiert komplexes Eigenwertpaar besitzt, hat sich folgende Eigenwertkonfiguration des Beobachters bewährt [3]:

$$s_{B1,2} = \frac{1}{\sqrt{2} T_B} (-v \pm j) \quad s_{B3,4} = \frac{1}{T_0} (-v \pm j) \quad (28)$$

Darin sind

$$\omega_0 = \frac{1}{T_0} = \sqrt{\frac{1 + T_M/T_A}{T_c T_M}} \quad (29)$$

die bezogene Eigenkreisfrequenz des Zweimassendrehchwingers,  $T_0$  die zugehörige bezogene Zeitkonstante.

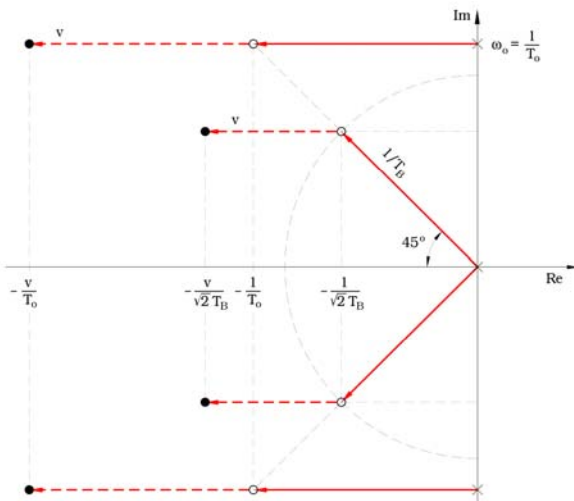


Bild 8:  
Eigenwertkonfiguration des Beobachters

- × Eigenwerte des zu beobachtenden Systems
- Eigenwerte des Beobachters

Durch die Einführung der beiden Beobachterparameter  $T_B$  und  $v$  wird die Polvorgabe physikalisch anschaulich. Die Beobachterzeitkonstante  $T_B$  ist ein Maß für die Schnelligkeit des Beobachters, der Parameter  $v$  ist hauptsächlich ein Maß für die Dämpfung der mechanischen Eigenschwingungen (Bild 8). Bei  $v = 1$  erhält man die natürliche Dämpfung  $d = \sqrt{2}/2$ .

Über die charakteristische Gleichung des Beobachters erhält man die Rückführkoeffizienten als Funktion der Polvorgabe.

## 5. EINIGE ERGEBNISSE

Zur Kontrolle der Drehzahl- und Drehmomentschätzung sind zwei Beobachter der ASM auf einem DSP realisiert worden, der erste arbeitet mit der gemessenen, der zweite mit der geschätzten Motordrehzahl (Bild 9).

Bild 10 zeigt die zeitlichen Verläufe der geschätzten und der gemessenen Motordrehzahl für einen Anlauf- und Bremsvorgang, Bild 11 zeigt die zeitlichen Verläufe des geschätzten Luftspaltmomentes beider Beobachter.

Erwartungsgemäß liefert die Schätzeinrichtung im Bereich kleiner Drehzahlen ( $n < 0.05$ ) unbefriedigende Ergebnisse. Ursache ist die fehlerhafte Ständerflussberechnung bei kleinen Ständerfrequenzen.

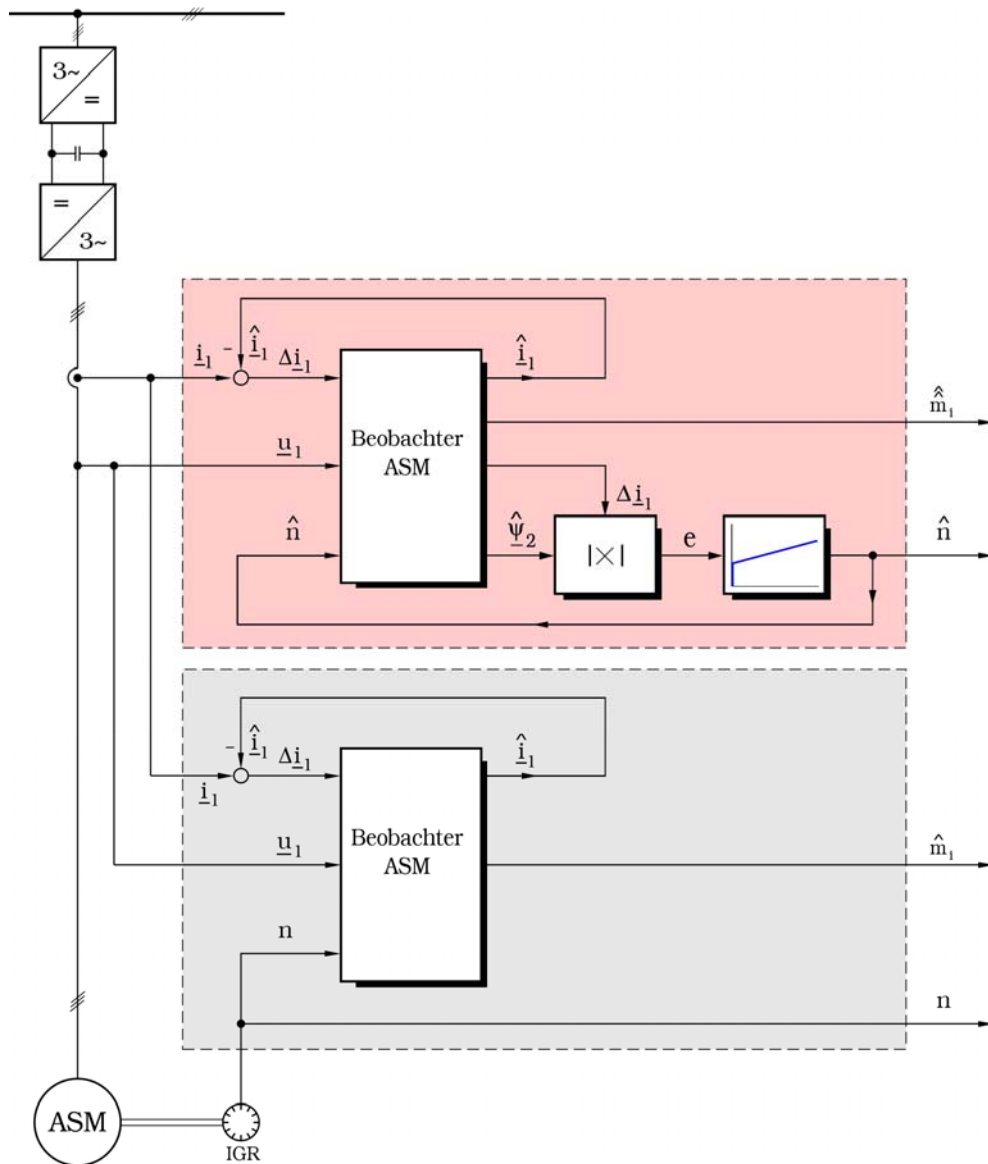


Bild 9: Zwei ASM-Beobachter mit gemessener und mit geschätzter Drehzahl auf einem DSP



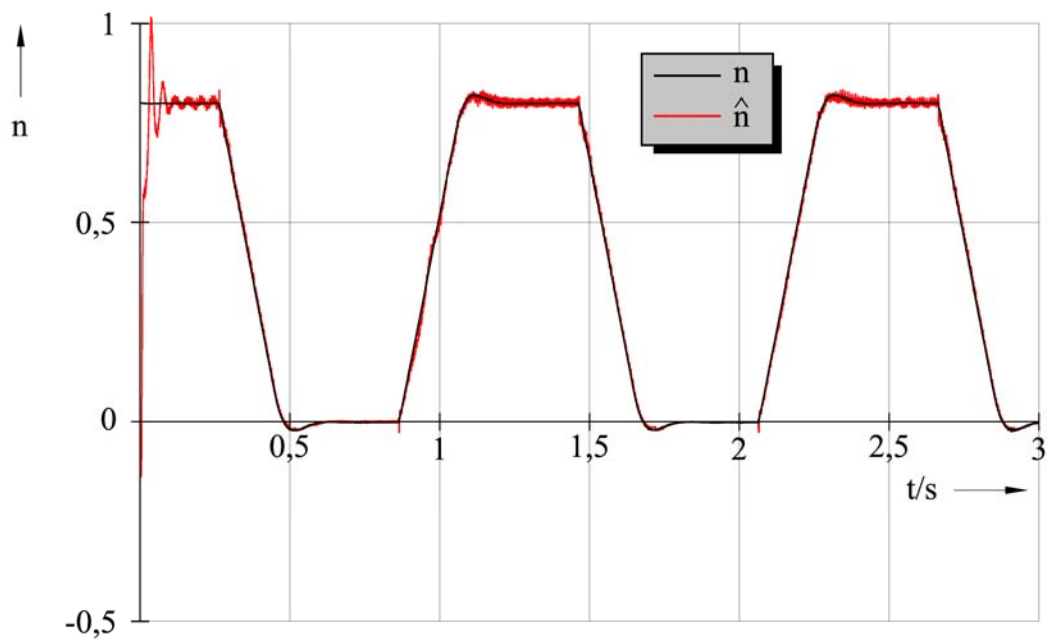


Bild 10: Gegenüberstellung von gemessener und geschätzter Drehzahl beim Anlauf- und Bremsvorgang

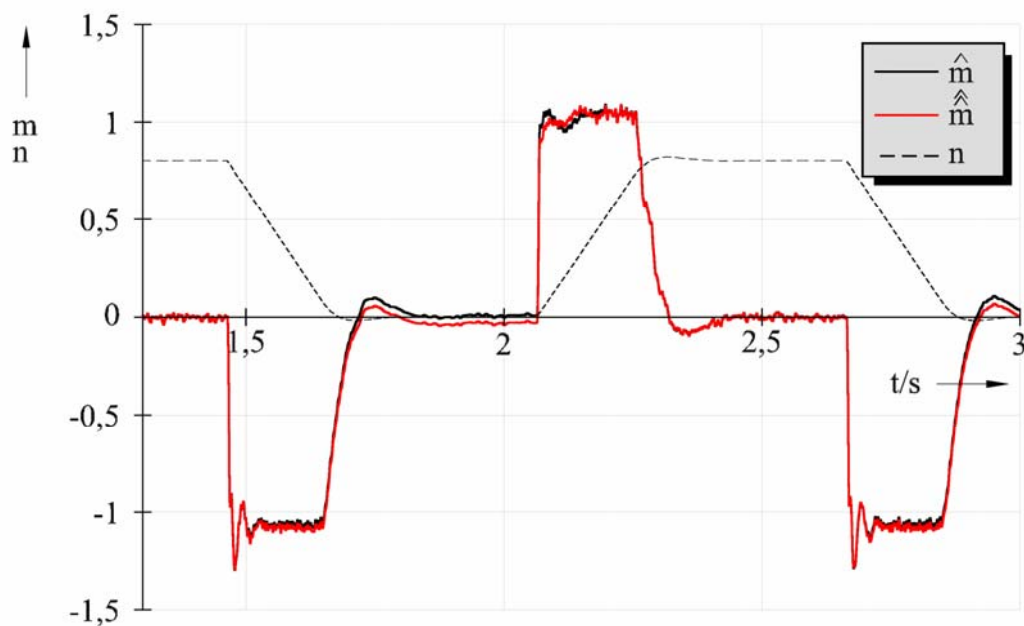


Bild 11: Gegenüberstellung der Drehmomentschätzung mit gemessener und geschätzter Drehzahl beim Anlauf- und Bremsvorgang

Bild 12 zeigt die zeitlichen Verläufe des gemessenen und geschätzten Wellenmomentes bei einem feldorientiert geregelten 5,5 kW-Kurzschlussläufermotor mit Zweimassendrehchwinger ( $J_A = J_M, f_0 \approx 14,5 \text{ Hz}$ ) bei einem Führungssprung von  $n^* = 0,1$  auf  $n^* = 1,0$  und einem anschließenden Lastsprung von  $m_W = 1,0$  auf  $m_W = 0,5$ .

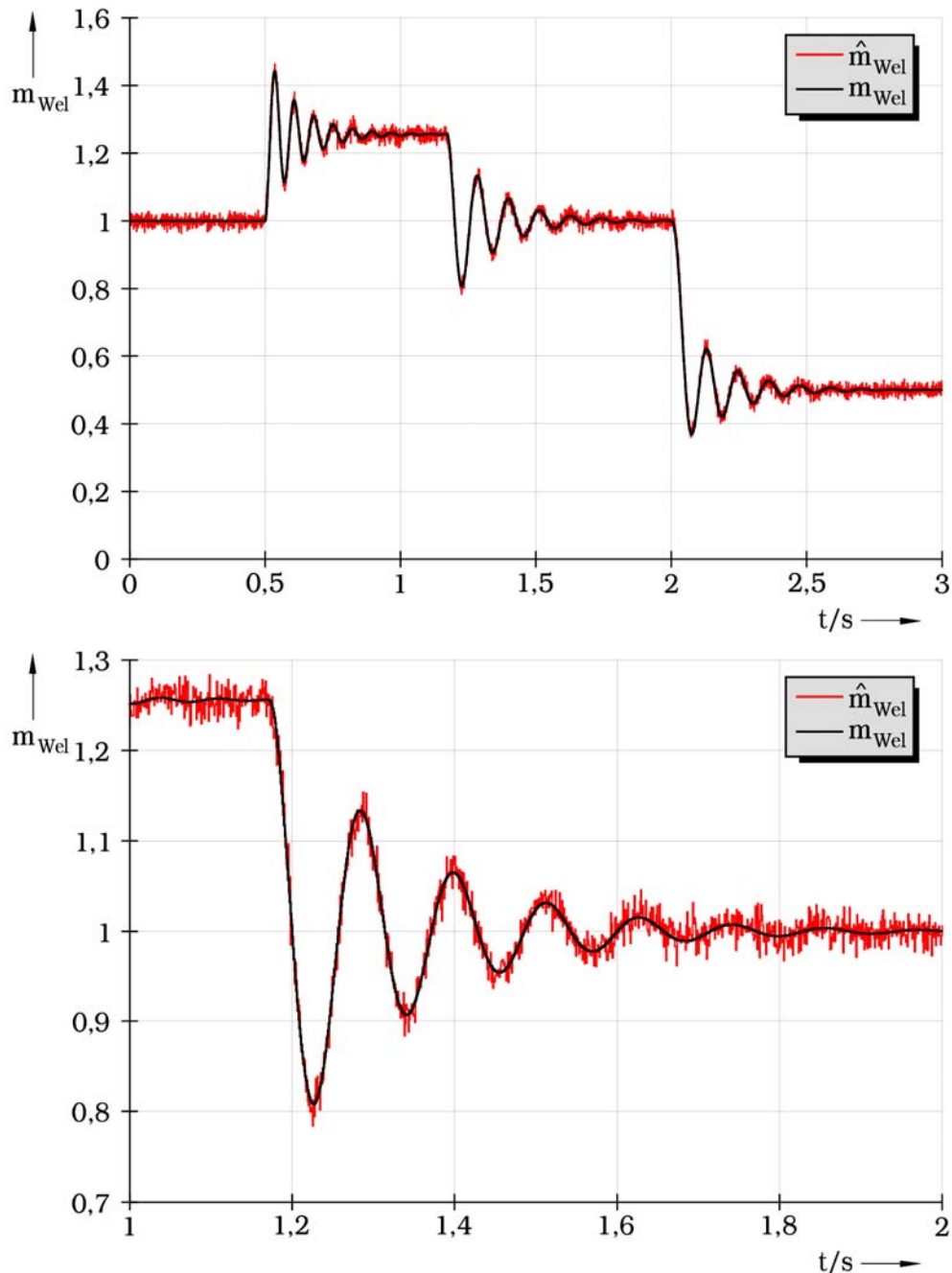


Bild 12: Zeitlicher Verlauf von gemessenem und geschätztem Wellenmoment bei

$t_1 = 0.5 \text{ s}$ : Führungssprung  $\Delta n^* = 0.9$  von  $n_0^* = 0.1$

$t_2 = 2 \text{ s}$ : Lastsprung  $\Delta m_W = -0.5$  von  $m_{W0} = 1.0$

Bild 13 zeigt die aktive Dämpfung der Torsionsschwingungen durch eine Zustandsregelung. Dargestellt sind die zeitlichen Verläufe des Wellenmomentes (leicht geglättet) bei einem Führungssprung von  $\Delta n^* = 0.1$  und einem anschließenden Laststoß von  $\Delta m_w = 1.0$  bei einer klassischen Antriebsregelung (1) und bei einer Zustandsregelung mit vorgestellter Schätzeinrichtung (2).

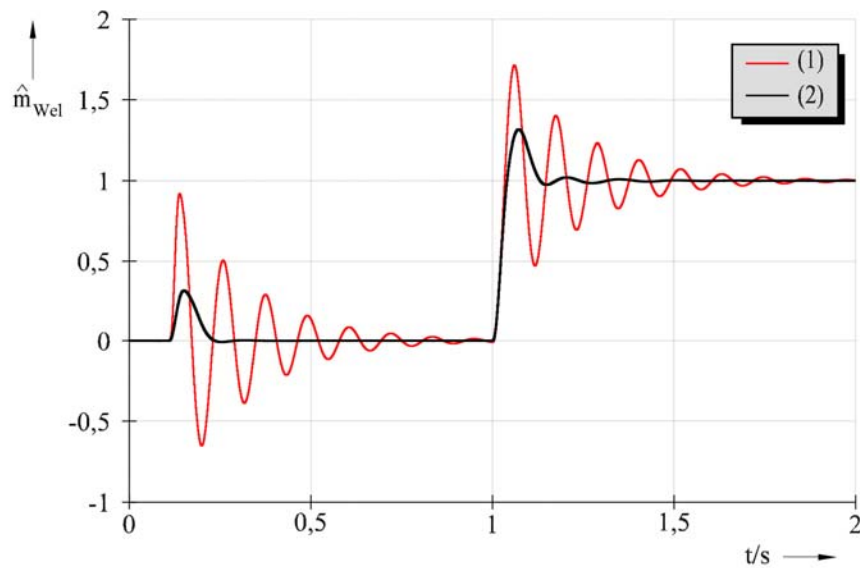


Bild 13: Aktive Schwingungsdämpfung

Zeitliche Verläufe des Wellenmomentes bei klassischer Antriebsregelung (1)

Zustandsregelung mit Schätzeinrichtung (2)

$t_1 = 0,1$  s: Sollwertsprung  $\Delta n^* = 0.1$

$t_2 = 1$  s: Sollwertsprung  $\Delta m_w = 1.0$

## Literatur:

- [1] Wolff, U.: Antriebsregelung bei Wellentorsion. Diss. TH Darmstadt 1989
- [2] Engel, B.: Verschleißmindernde Kraftschlussregelung mit Zustandsregler für elektrische Traktionsantriebe. Diss. TU Clausthal 1996; Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 284; Düsseldorf: VDI-Verlag 1996
- [3] Goslar, M.: Ein Beitrag zur anwendungsorientierten Zustandsregelung elektrischer Hochleistungsantriebe. Diss. TU Clausthal 1998
- [4] Sourkounis, C. : Drehzahlelastische Antriebssysteme unter stochastischen Belastungen. Habilitationsschrift TU Clausthal 2004
- [5] Hoffmann, F.: Drehgeberlos geregelte Induktionsmaschinen an IGBT-Pulsstromrichtern. Diss. RU Bochum 1996; Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 21, Nr. 213, Düsseldorf: VDI-Verlag 1996
- [6] Koch, S.: Beiträge zur Regelung von Induktionsmaschinen ohne Drehgeber. Diss. RU Bochum 1998; Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8, Nr. 717; Düsseldorf 1998
- [7] Weidauer, B.: Drehgeberlose Regelung umrichter gespeister Induktionsmaschinen in der Traktion. Diss. RU Bochum 1999
- [8] Luenberger, D.G. : An introduction to observer. IEEE Trans. On Automat. Contr. 16 (1971), S. 596-602
- [9] Föllinger, O.: Regelungstechnik, 8. Aufl.; Heidelberg: Hüthig-Verlag 1994
- [10] Pfaff, F.: Regelung elektrischer Antriebe. Bd.1.; R. Oldenbourg Verlag, München-Wien 1994
- [11] Kovacs, K.P.; Racz, I.: Transiente Vorgänge in Wechselstrommaschinen. Bd. 1 und Bd. 2. Verlag der Ungarischen Akademie der Wissenschaften, Budapest 1959
- [12] Schauder, C.: Adaptive Speed Identification for Vector Control of Induction Motors without Rotational Transducers. IEEE Trans. Industry Appl., Vol. 28, No. 5, 1992, pp. 1054-1061
- [13] Beckert, U.; Arnold, H.: Identifikation der Parameter der Asynchronmaschine während des geregelten Betriebes. antriebstechnik 43 (2004), H.2, S. 35-41
- [14] Beckert, U.; Neuber, W.: Drehmoment-Beobachter für Asynchronmaschinen. antriebstechnik 38 (1999) Heft 9, S. 79-83
- [15] Zägelein, W.: Drehzahlregelung des Asynchronmotors unter Verwendung eines Beobachters mit geringer Parameterempfindlichkeit. Diss. Univ. Erlangen-Nürnberg 1984

## Autoren:

Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Beckert  
Dr.-Ing. Henri Arnold  
Lessingstraße 45  
D-09599 Freiberg  
Phone:++49+3731-392929  
Fax:++49+3731-392112  
E-Mail: becker@et.tu-freiberg.de