

Ein rechnergestütztes Inbetriebnahmewerkzeug für geregelte industrielle Antriebssysteme mit schwingungsfähiger Mechanik

Harald Wertz, Frank Schütte, Horst Grotstollen
Leistungselektronik und elektrische Antriebstechnik
Universität Paderborn, FB 14 LEA
Pohlweg 47–49, 33098 Paderborn, Germany
Tel.: ++49-5251-602211
Fax.: ++49-5251-603443
e-mail: wertz@lea.uni-paderborn.de

Andreas Bünte
Lust Antriebstechnik GmbH
Gewerbestraße 5-9, 35633 Lahnau
Tel.: ++49-6441-9660
Fax.: ++49-6441-966137

Kurzbiographien:

Harald Wertz, geboren 1969 in Warburg, Deutschland. Studium der Elektrotechnik mit Schwerpunkt Automatisierungstechnik von 1990 bis 1996 an der Universität-Gesamthochschule Paderborn. Im Rahmen seiner Diplomarbeit beschäftigte er sich mit der Parameteridentifikation elektromechanischer Systeme.

Seit 1996 arbeitet er im Rahmen eines EU-Projektes¹ als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet Leistungselektronik und elektrische Antriebstechnik bei Prof. Dr.-Ing. H. Grotstollen. Ziel dieses Projektes ist die Realisierung von Konzepten zur selbsteinstellenden Drehzahl- und Lageregelung für elektromechanische Antriebssysteme.

Andreas Bünte, geboren 1965 in Rheda-Wiedenbrück, Deutschland. Studium der Elektrotechnik mit Schwerpunkt Automatisierungstechnik von 1986 bis 1991 an der Universität-Gesamthochschule Paderborn.

Im Anschluß 5 Jahre Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet Leistungselektronik und elektrische Antriebstechnik, ebenfalls an der Universität-Gesamthochschule Paderborn.

Seit 1996 Leiter der Abteilung Grundlagenentwicklung bei der Firma Lust Antriebstechnik GmbH.

1. Es handelt sich hierbei um das von der Europäischen Union geförderte Forschungsprojekt „SC-Drives“, (Projektnummer: BRST-CT96-5070). Beteiligt sind neben der Universität Paderborn und der Lust Antriebstechnik GmbH weitere Partner aus Italien, Deutschland und den Niederlanden.

Ein rechnergestütztes Inbetriebnahmewerkzeug für geregelte industrielle Antriebssysteme mit schwingungsfähiger Mechanik

Dipl.-Ing. Harald Wertz, Dipl.-Ing. Frank Schütte, Prof. Dr.-Ing. Horst Grotstollen

Universität Paderborn, FB 14 LEA, Pohlweg 47–49, 33098 Paderborn, Germany

Tel.: ++49-5251-602211, Fax.: ++49-5251-603443, e-mail: wertz@lea.uni-paderborn.de

Dipl.-Ing. Andreas Bünte,

Lust Antriebstechnik GmbH, Gewerbestraße 5-9, 35633 Lahnau, Germany

Tel.: ++49-6441-9660, Fax.: ++49-6441-966137

Kurzfassung:

Es werden Hardware- und Softwarestruktur eines Werkzeugs zur rechnergestützten Reglerinbetriebnahme für schwingungsfähige Zweimassen-Antriebssysteme vorgestellt. Hierzu wurde die technische Anbindung einer in einen PC eingebetteten Signalprozessorkarte DS1003 an einen industriellen, auf dem VeCon Chipsatz basierenden Servoregler realisiert.

Nach einem Überblick über die verwendete Hardware werden Vorgehensweise und Algorithmen zur Off-line-Identifikation der mechanischen Parameter des Antriebssystems vorgestellt. Hierzu werden drei, sich in ihren Eigenschaften ergänzende, Identifikationsverfahren kurz beschrieben.

Zur einfachen Handhabung des Systems wurde innerhalb von MATLAB eine graphische Bedienerschnittstelle zur Ablaufsteuerung, Signalverarbeitung und Visualisierung realisiert. Die Funktion des Inbetriebnahmewerkzeugs wird an einem Versuchstand verifiziert, der durch Austausch von mechanischen Elementen unterschiedlich parametrierbar ist.

1 Einleitung

Drehzahl- und Lageregelkreise von elektrischen Antriebssystemen beinhalten mechanische Übertragungselemente, die häufig Unzulänglichkeiten wie Elastizität, Reibung und Lose aufweisen. Um derartige Systeme stabil und robust regeln zu können, werden für gewöhnlich klassische Regelungskonzepte verwendet, wobei zur Erfüllung der vorgegebenen Spezifikationen meist eine konservative Einstellung der Reglerparameter vorgenommen wird.

Die gezielte Berücksichtigung der mechanischen Unzulänglichkeiten, insbesondere der Elastizität, bei der Auswahl und Parametrierung geeigneter Regler erlaubt dagegen eine verbesserte Ausnutzung der Antriebsdynamik. Voraussetzung hierfür ist ein geeig-

netes mathematisches Modell des mechanischen Teilsystems. Häufig kann das Verhalten von industriellen Antriebssträngen durch das Modell eines Zweimassensystems (ZMS), dessen Wirkungsplan in Bild 1 dargestellt ist, hinreichend genau beschrieben werden [1]. Da eine theoretische Analyse des jeweiligen mechanischen Systems in der Regel aufwendig und nicht automatisierbar ist, werden die Modellparameter (Tabelle 1) experimentell aus den motorseitigen Meßsignalen Drehmoment (bzw. drehmomentbildender Strom) und Drehzahl identifiziert. Weitere Meßgrößen sollen zugunsten einer allgemeinen Anwendbarkeit der Verfahren nicht verwendet werden. Werden nur Systeme mit geringer Lose betrachtet und wird die motor- und lastseitige Reibung zu einer gesamten Reibcharakteristik zusammengefaßt, so ist der Ansatz eines linearen Modells, welches um einen nichtlinearen Anteil aufgrund der Coulomb-Reibung erweitert wird, gerechtfertigt. Es ergibt sich dann in guter Näherung ein Schätzproblem, welches linear in den Parametern ist und somit mit einfachen linearen Optimierungsverfahren gelöst werden kann.

ZMS Parameter		
Name	Einheit	Bedeutung
J_M	kgm^2	motorseit. Massenträgheitsmoment
J_L	kgm^2	lastseit. Massenträgheitsmoment
C_S	$\frac{Nm}{rad}$	Federsteifigkeit
D_S	$\frac{Nms}{rad}$	Dämpfung
J_Σ	kgm^2	gesamtes Trägheitsmoment

Tabelle 1: Parameter des linearen Teilsystems

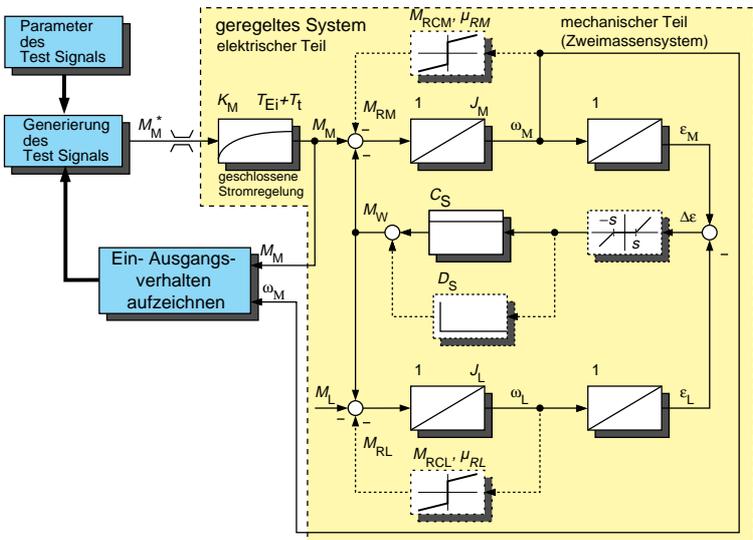


Bild 1: Wirkungsplan Zweimassensystem

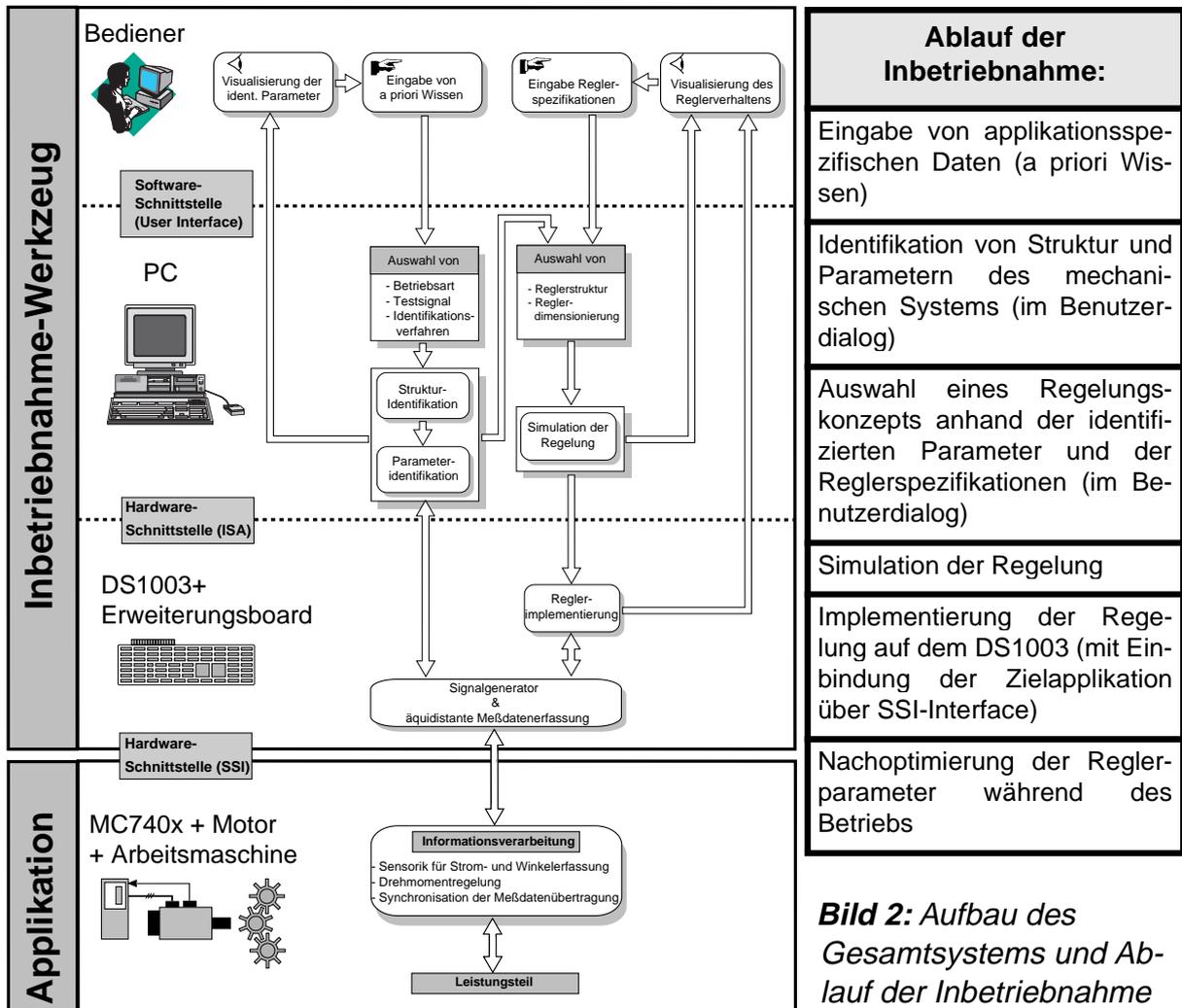
2 Realisierung des Inbetriebnahmesystems

Die wesentlichen Arbeitsschritte während der Inbetriebnahme, die in der Regel iterativ und im Dialog mit dem Bediener zu durchlaufen ist, sowie die dazu verwendeten Werkzeuge sind in Bild 2 dargestellt. Auf dem PC ist unter Verwendung des Programmpakets MATLAB eine graphische Schnittstelle zum Inbetriebnehmer implementiert. Sie bietet einerseits eine komfortable Benutzeroberfläche zur Steuerung der einzelnen Funktionen sowie zur Eingabe applikationsspezifischer Daten und visualisiert andererseits Prozeßdaten, Identifikations- und Regelergebnisse in aufbereiteter, gut interpretierbarer Form. Die Ablaufsteuerung für die Inbetriebnahme sowie die Identifikationsverfahren und die Algorithmen für Reglerauswahl und -dimensionierung sind ebenfalls in MATLAB implementiert.

Die Verwendung eines derartigen Hilfsmittels führt zu erhöhter Flexibilität bei der

Anpassung von Antrieben an neue Applikationen und ermöglicht den praxisgerechten Einsatz von modernen Identifikations- und Regelverfahren.

Ein drehmomentgeregelter Motor¹ wird als Basis für die Inbetriebnahme der überlagerten Regelkreise vorausgesetzt, so daß der Drehmoment-Sollwerteingang am Servoregler die Schnittstelle zwischen Inbetriebnahmewerkzeug und Applikation darstellt.



Die On-line-Berechnung der an die Mechanik angepaßten, überlagerten Regelalgorithmen kann komfortabel mittels leistungsfähiger Floating-Point Prozessoren erfolgen, die jedoch in industriell eingesetzten Servoreglern in der Regel nicht zur Verfügung stehen. Aus diesem Grund wird im Rahmen des hier beschriebenen Inbetriebnahmesystems das PC-Signalprozessorboard DS1003 der Firma dSPACE als externe Hardwareplattform für die Prototypen-Implementierung der überlagerten Drehzahl- bzw. Lageregelung eingesetzt. Ein weiterer Grund für die Auswahl dieses Systems ist dessen gute Anbindung an MATLAB/SIMULINK, so daß durch einen graphisch orientierten Reglerentwurf die einfache Erprobung unterschiedlicher Regelungskonzepte möglich ist. Die Auslagerung der überlagerten Regelkreise aus der eigentlichen Applikation erfordert

1. Die Selbsteinstellung der feldorientierten Stromregelung (resp. Drehmomentregelung) für Drehstromantriebe ist z.B. in [2] beschrieben und erfolgt über die Servoregler-Software.

eine entsprechende Anbindung der portablen Inbetriebnahmehardware an die jeweiligen Stell- und Meßglieder im industriellen Antriebssystem. Für das hier beschriebene System ist hierzu in Gestalt einer Interfacekarte eine breitbandige Schnittstelle zur Echtzeit-Datenübertragung zwischen dem C40-Signalprozessor des DS1003 und dem VeCon-Chip der Servoreglerbaureihe MC740x der Firma Lust entwickelt worden.

Nachdem mit diesem System Erfahrungen bezüglich unterschiedlicher mechanischer Systeme und entsprechenden Regelstrukturen gesammelt wurden, können die Regelalgorithmen in einem späteren Schritt in den Standard-Servoregler integriert werden.

3 Hardwaretechnische Anbindung

Im folgenden werden die wesentlichen Hardwarekomponenten sowie deren entsprechenden Schnittstellen näher erläutert. Als Plattform für die überlagerte Drehzahl- und Lageregelung sowie für die äquidistante Abtastung von Meßsignalen und die Vorgabe von Sollwerten wird die digitale Signalprozessorkarte DS1003 verwendet, die mit dem PC-Bus verbunden ist. Zur Ankopplung dieses mobilen Systems an den industriell eingesetzten Servoregler MC740x der Firma Lust ist eine zweikanalige, bidirektionale SSI-Schnittstelle realisiert worden (siehe Bild 3), über die der Prozeßdatenaustausch abgewickelt wird. Die Hardwarelösung basiert auf der Prototypen-Karte DS4201, welche bereits grundlegende Funktionseinheiten wie PHS-Bus Anbindung, Interrupt Controller und I/O-Fehlermanagement bereitstellt.

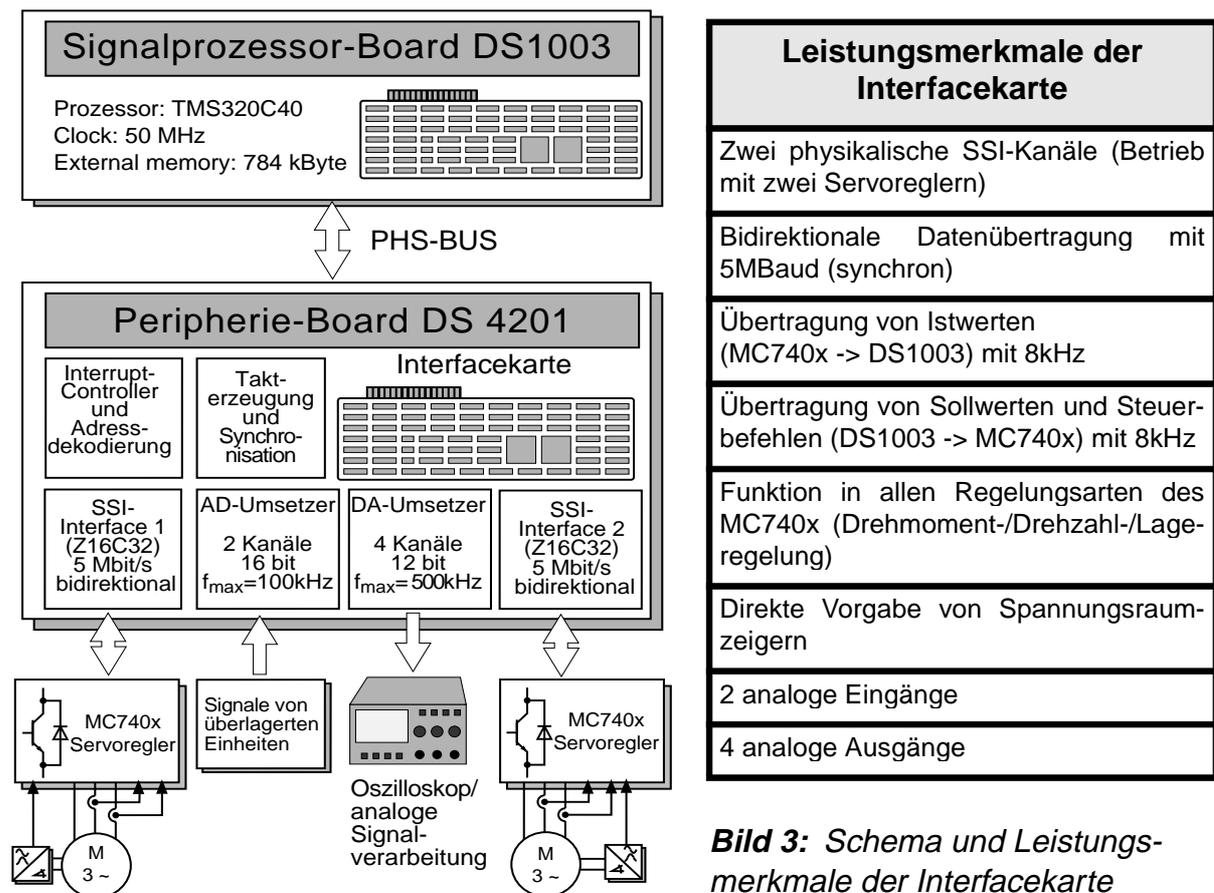
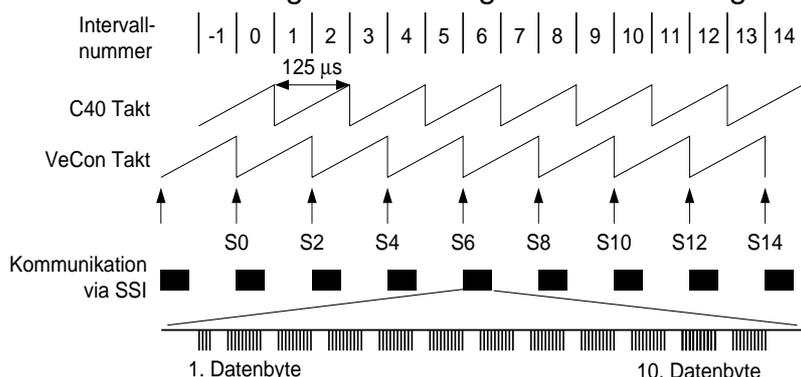


Bild 3: Schema und Leistungsmerkmale der Interfacekarte

Der Servoregler führt die Stromerfassung durch, wertet den motorseitigen Lagegeber aus und arbeitet die digitale Drehmomentregelung auf dem VeCon Digitalchip ab. Über die SSI-Schnittstelle werden die Istwerte von Drehmoment und Motorwinkel mit einer Abtastzeit von $125\mu s$ zur überlagerten Drehzahl- bzw. Lageregelung übertragen, die auf dem C40 berechnet wird. Nach Abarbeitung des Regelalgorithmus werden der Drehmomentsollwert sowie einige Steuerbefehle in entgegengesetzter Richtung über die SSI-Schnittstelle übertragen. Die Abtastung beider Systeme erfolgt dabei synchronisiert. Auf der PC-seitigen Interfacekarte sind zwei SSI-Kanäle mit jeweils 5Mbaud Übertragungskapazität vorhanden, so daß mit dem System zwei Antriebe unabhängig voneinander geregelt werden können.

4 Softwaretechnische Anbindung

Zur Realisierung der grundlegenden Lese-/Schreiboperationen auf dem C40 steht eine Bibliothek von C-Funktionen zur Verfügung. Aufgrund der synchronen Betriebsweise sind diese Funktionen interruptgesteuert aufzurufen. Die Kommunikation läuft wie in Bild 4 dargestellt ab. Die digitalen Meßdaten werden vom C40 in Paketen von jeweils 10 Byte pro Interruptzyklus aus dem FIFO-Speicher der Interfacekarte ausgelesen. In der hier verwendeten Betriebsart handelt es sich dabei um die Istwerte von Drehmoment und mechanischem Motorwinkel sowie um den Wert einer frei definierbaren Variable aus dem VeCon Programm. In umgekehrter Richtung werden der Drehmomentsollwert,



ein Steuerwort zur Kontrolle des Servoreglers sowie die Speicheradresse der frei definierbaren Variable aus dem VeCon Programm in den FIFO-Speicher geschrieben. Die Datenübertragung ist dabei derart realisiert, daß eine minimale Totzeit sichergestellt ist.

Dazu wird die Übertragung der einzelnen Bytes erst

Bild 4: Ablauf der seriellen Kommunikation

dann angestoßen, wenn die zugehörige Berechnung auf VeCon-Seite abgeschlossen ist. Gleichzeitig wartet das VeCon-Programm im Ablauf an der Stelle, an der der aktuell vom C40 vorgegebene Sollwert einzuspeisen ist. Ein im Intervall 1 auf dem C40 berechneter Sollwert wird im Intervall 2 übertragen. Auf VeCon-Seite wird dann der Regler und die Modulation im Intervall 3 gerechnet. Die berechneten Spannungszeitflächen werden dann in den Intervallen 4 und 5 auf die Maschine geschaltet. Bei der Abtastung zum Zeitpunkt S6 ist dann eine Auswirkung meßbar, die zugehörigen Daten werden im Intervall 6 übertragen und sind im Intervall 7 auf C40-Seite bekannt.

Über die Nutzung der SSI-Schnittstelle hinaus hat der Anwender die Möglichkeit, den Servoregler MC740x über den DriveManager der Firma Lust Antriebstechnik komfortabel zu parametrieren, einzurichten und Meßdaten aufzuzeichnen.

5 Ablauf der Off-line-Identifikation

Für die Off-line-Identifikation müssen zunächst Meßdaten generiert werden. Hierzu stehen Testsignale verschiedener Signalform und -amplitude zur Verfügung, die in unterschiedlichen Betriebsarten¹ aufgeschaltet werden können. Als wesentliche Betriebsarten werden dabei der drehmomentgeregelt (DMR) und der drehzahlgeregelt (DZR) Betrieb unterschieden, siehe Bild 5. In beiden Fällen muß entsprechend der Ordnung des zu identifizierenden Modells (Ein- oder Zweimassensystem) eine ausreichende Anregung des Systems sichergestellt werden. Die Auswahl von Betriebsart und Testsignal wird wesentlich von den technischen Randbedingungen (z.B. Nenn- und Maximalwerte für die mechanischen Größen, bekannte Lastmomentcharakteristik) und von eventuell vorhandenen a priori Kenntnissen über einzelne Systemparameter (z.B. Gesamtträgheitsmoment und/oder Eigenfrequenz) beeinflusst.

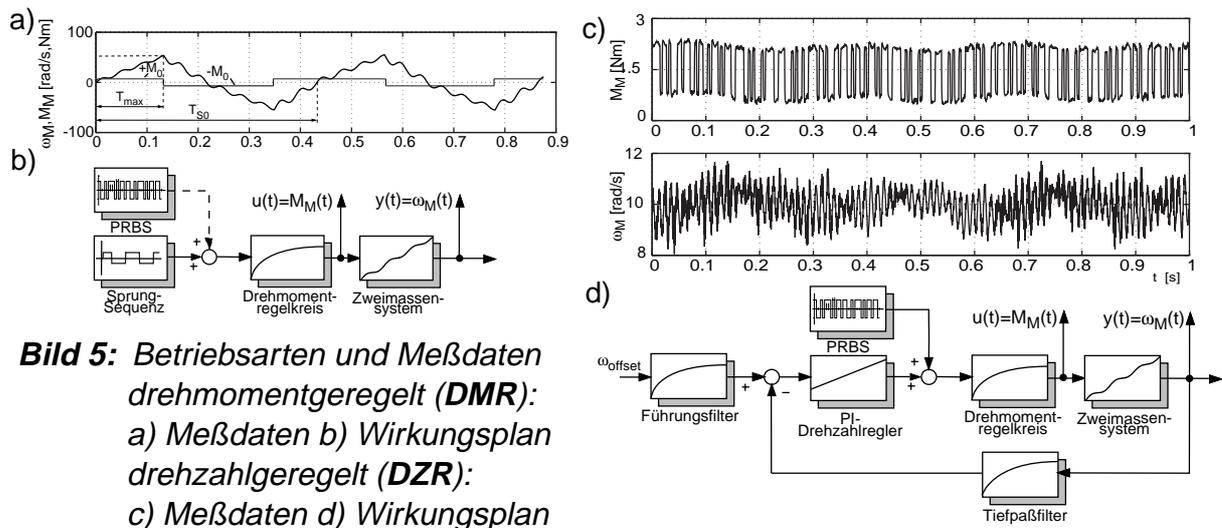


Bild 5: Betriebsarten und Meßdaten drehmomentgeregelt (DMR):
a) Meßdaten b) Wirkungsplan
drehzahlgeregelt (DZR):
c) Meßdaten d) Wirkungsplan

a) Meßdatengenerierung in der Betriebsart DMR

Sind zunächst keine Informationen über Gesamtträgheitsmoment und Eigenfrequenz vorhanden, wird in der Betriebsart DMR eine Sequenz von Drehmomentsprüngen mit wechselndem Vorzeichen aufgeschaltet, wobei die Sprunghöhe M_0 aus dem Nennmoment abgeleitet und die Umschaltzeitpunkte durch das Erreichen eines vorgegebenen Maximalwertes ω_{max} der Motordrehzahl festgelegt werden.

Aus den aufgezeichneten Meßsignalen wird dann zunächst unter Annahme eines Einmassenmodells das Gesamtträgheitsmoment J_Σ sowie eine drehzahlabhängige Lastmomentkennlinie (Reibkennlinie) geschätzt. Mit dem geschätzten Modell und dem beschriebenen Testsignal als Eingangsgröße wird die Systemantwort $\omega_M(k)$ des Einmassenmodells simuliert. Aus dem Differenzsignal

$$\Delta\omega_M(k) = \omega_M(k) - \bar{\omega}_M(k) \quad (1)$$

wird per Spektralanalyse die dominante Eigenfrequenz f_{dom} des Systems ermittelt

1. Die hier erwähnten Betriebsarten sind nicht mit den möglichen Betriebsarten des MC740x zu verwechseln. Während der Inbetriebnahme wird dieser ständig in der Betriebsart TCON (drehmomentgeregelt) betrieben.

(siehe Meßergebnis in Bild 7a), die als Eigenfrequenz der Mechanik interpretiert wird. Der hier verwendeten Sprungsequenz kann dann in einem weiteren Experiment ein pseudostochastisches Zusatzsignal (PRBS) mit breitem Frequenzspektrum überlagert werden, um auch höherfrequente Eigenschwingungen anregen zu können. Die spektrale Charakteristik des PRBS kann über die freien Signalparameter Amplitude r_0 , Taktzeit λ und Periodenlänge N an die Eigenfrequenz und das Gesamtträgheitsmoment des Antriebssystems angepaßt werden [3]. Die so erhaltenen Meßdaten können dann nach einer Signalvorverarbeitung zur Parameterschätzung für ein Zweimassenmodell herangezogen werden.

b) Meßdatengenerierung in der Betriebsart DZR

Alternativ hierzu oder zur Verifizierung der Identifikationsergebnisse kann die Parameterschätzung im geschlossenen Drehzahlregelkreis durchgeführt werden. Zur Dimensionierung des Drehzahlreglers sollte das Gesamtträgheitsmoment der Anlage annähernd bekannt sein bzw. vorab identifiziert werden. Mit dieser Vorkenntnis wird ein PI-Drehzahlregler (Stützregler) geringer Bandbreite implementiert. Zunächst wird ein konstanter Drehzahlsollwert ω_{offset} vorgegeben. Nachdem der Einschwingvorgang beendet ist, wird dem Drehmomentsollwert M_M^* ein PRBS-Störsignal geringer Amplitude überlagert, dessen Taktzeit λ an die Grenzfrequenz des Drehmomentregelkreises angepaßt wird. Die vom Gleichanteil befreiten Meßsignale werden dann zur Identifikation herangezogen.

Da das System über die konstant geregelte Drehzahl in einem festen Arbeitspunkt betrieben wird und dort bei nicht zu großen Amplituden des künstlichen Störsignals auch bleibt, werden drehzahlabhängige Lastmomente stationär kompensiert, was einen rein linearen Modellansatz für diesen Arbeitspunkt ermöglicht.

6 Beschreibung der Identifikationsverfahren

Für die Identifikation sind eine Reihe von Verfahren bekannt, die jedoch aufgrund von Modellierungsfehlern und verrauschten Meßsignalen immer nur Schätzwerte für die mechanischen Parameter liefern können. Die Verfahren unterscheiden sich bezüglich Störsignalempfindlichkeit und Konsistenz sowie in der Erzeugung der Meßdaten, so daß sich ein Vergleich von grundlegenden Methoden im Hinblick auf die Off-line-Identifikation von Zweimassensystemen anbietet. Hierzu wurden umfangreiche systematische Simulationen von Identifikationsexperimenten für unterschiedlich parametrisierte Zweimassensysteme durchgeführt. Die Simulationsdaten, die mit typischen Rauschsignalen behaftet waren, sind mit verschiedenen Identifikationsverfahren ausgewertet und die resultierenden Schätzfehler für die einzelnen Parameter statistisch untersucht worden [8].

Im folgenden werden drei unterschiedliche Verfahren vorgestellt (siehe Tabelle 2) und anhand von Messungen an einem mechanischen Versuchsstand verifiziert.

Verfahren	Modell	Optimierung	Besonderheiten
IV4: vierstufiges Hilfsvariablenverfahren	Differenzgleichung	Least-Squares (LS) und Hilfsvariablen (IV)	iteratives Verfahren, Verwendung von Hilfsmodellen, Modellierung des Störsignals, Betriebsart DMR
COR-LS: Korrelationsanalyse	Korrelationsfunktionen, Differenzgleichung	Least-Squares	nichtparametrisches Zwischenmodell, Betriebsart DMR oder DZR
FGA: Frequenzgangsanalyse	Frequenzgang/Übertragungsfunktion	Least-Squares	nichtparametrisches Zwischenmodell, Betriebsart DZR

Tabelle 2: Verfahren zur Parameteridentifikation

6.1 Vierstufiges Hilfsvariablenverfahren (IV4)

Beim IV4-Verfahren [5] werden zunächst durch iterative Anwendung von LS- und Hilfsvariablenmethode [3] die Parameter eines zeitdiskreten Modells geschätzt. Die Meßdaten hierzu werden in der Betriebsart DMR generiert. Berücksichtigt man für die Schätzungen ein coulombsches, vom Vorzeichen der Motordrehzahl abhängiges Reibmoment sowie ein eventuell vorhandenes konstantes Lastmoment durch die zusätzlichen Eingangsgrößen $v(k) = \text{sign}(\omega_M(k))$ und $\tau(k) \equiv 1$, so ergibt sich für das Zweimassensystem die Differenzgleichung (2) mit dem Parametervektor (3) und dem Regressionsvektor (Datenvektor) (4).

$$y(k) = \varphi^T(k) \mathbf{w} + n(k) \quad (2) \quad \mathbf{w}^T = [\alpha_1 \ \alpha_2 \ \alpha_3 \ \beta_0 \ \beta_1 \ \beta_2 \ \beta_3 \ \gamma_0 \ \gamma_1] \quad (3)$$

$$\varphi^T(k) = [-y(k-1) \ -y(k-2) \ -y(k-3) \ u(k) \ u(k-1) \ u(k-2) \ u(k-3) \ -v(k) \ -\tau(k)] \quad (4)$$

Hierbei werden Eingangssignal $u(k) = M_M(k)$ und Ausgangssignal $y(k) = \omega_M(k)$ mit der Periodendauer T_S äquidistant abgetastet. Das der Ausgangsgröße additiv überlagerte Meßrauschen wird durch das stochastische, mittelwertfreie Signal $n(k)$ berücksichtigt. Die Unterdrückung des Störsignaleinflusses auf die Parameterschätzwerte erfolgt beim IV4-Verfahren über die iterative Berechnung von Hilfsvariablen und Störsignalfiltern zur gezielten Filterung der Meßsignale.

Die geschätzte Differenzgleichung wird mit einem numerischem Verfahren in eine zeitkontinuierliche Übertragungsfunktion transformiert [9], aus der über den Koeffizientenvergleich mit einer kanonischen Form die physikalischen Parameter extrahiert werden. Für diese Transformation – und damit auch für die Parameterschätzung selbst – ist eine geeignete Abtastzeit T_S zu wählen, die an die a priori zu bestimmende Eigenfrequenz angepaßt werden muß, da sonst sowohl der Schätzalgorithmus als auch die Kontinuierisierung auf numerisch schlecht konditionierte Gleichungssysteme führt.

6.2 Korrelationsanalyse und LS-Schätzung (COR-LS)

Bei COR-LS [4] erfolgt die Unterdrückung des Störsignaleinflusses über die Bildung der Korrelation zwischen Ein- und Ausgangssignal in Form eines nichtparametrischen Zwischenmodells (Kreuzkorrelationsfunktion), welches dann zur Parameterschätzung mit dem LS-Verfahren herangezogen wird. Zu entsprechenden Schätzgleichungen gelangt man, indem die Differenzgleichung (2) geeignet umgeformt wird, worauf sich der neue Datenvektor

$$\varphi_{\Phi}^T(k) = \left[-\Phi_{uy}(k-1) \quad -\Phi_{uy}(k-2) \quad -\Phi_{uy}(k-3) \quad \Phi_{uu}(k) \quad \Phi_{uu}(k-1) \quad \Phi_{uu}(k-2) \quad \Phi_{uu}(k-3) \quad \Phi_{uv}(k) \quad \Phi_{u\tau}(k) \right] \quad (5)$$

ergibt. Hierbei sind $\Phi_{uy}(k)$, $\Phi_{uv}(k)$ und $\Phi_{u\tau}(k)$ die Kreuzkorrelationsfunktionen des Testsignals $u(k)$ mit der Ausgangsgröße $y(k)$ bzw. den Hilfssignalen $v(k)$ und $\tau(k)$, während die Autokorrelationsfunktion des Testsignals mit $\Phi_{uu}(k)$ bezeichnet wird. Der zu schätzende Parametervektor w bleibt nach dieser Umformung unverändert, so daß für die nachfolgende Rückrechnung auf die physikalischen Parameter analog zu Kapitel 6.1 vorgegangen wird. Die Meßdaten für COR-LS können prinzipiell in beiden beschriebenen Betriebsarten generiert werden. Das Testsignal sollte überwiegend stochastischer bzw. pseudostochastischer Natur sein, um bei einer endlichen Meßzeit möglichst genaue Schätzwerte für die Korrelationsfunktionen bestimmen zu können. Dies muß insbesondere in der Betriebsart DMR durch einen entsprechend hohen Anteil des additiv überlagerten PRBS im Testsignal sichergestellt werden.

6.3 Frequenzgangsanalyse (FGA)

Die Vorgehensweise bei der Frequenzgangsanalyse ([3], [6]) ähnelt der bei COR-LS, jedoch wird als nichtparametrisches Zwischenmodell der Frequenzgang ermittelt.

Hierzu werden zunächst die Korrelationsfunktionen $\Phi_{uu}(k)$ und $\Phi_{uy}(k)$ berechnet und anschließend über die Fouriertransformation die Leistungsspektren $S_{uu}(j\omega)$ und $S_{uy}(j\omega)$ ermittelt. Der komplexe Frequenzgang ergibt sich dann zu:

$$G(j\omega) = \frac{S_{uy}(j\omega)}{S_{uu}(j\omega)} \quad (6)$$

Die Meßdatengenerierung muß hierbei in der Betriebsart DZR erfolgen, da das System für die Berechnung der Frequenzkennlinien in einem Arbeitspunkt (konstantes Drehzahlniveau) linearisiert werden muß. Das verwendete PRBS-Störsignal wird an die Grenzfrequenz des Drehmomentregelkreises angepaßt.

Zur Verminderung von Störsignaleinflüssen erfolgt die Aufzeichnung mehrerer Datensätze und eine anschließende Mittelwertbildung über alle daraus berechneten Frequenzgänge. Anschließend erfolgt die Ermittlung der Parameter aus der kontinuierlichen Übertragungsfunktion des Zweimassensystems, die über eine Least-Squares Schätzung aus Real- und Imaginärteil des gemessenen Frequenzgangs generiert wird.

7 Meßergebnisse

Die Erprobung des Inbetriebnahmesystems erfolgt an einem mechanischen Versuchsaufbau. Hierbei sind zwei Synchron-Servomotoren über eine Torsionswelle miteinander gekoppelt. Während ein Motor als Antriebsmaschine eingesetzt wird, können mit Hilfe des zweiten Motors deterministische Lastmomentverläufe vorgeben werden. Weiterhin können an dem Versuchsaufbau durch Auswechslung von Torsionswellen und last- bzw. motorseitigen Schwungscheiben unerschiedlich parametrisierte Mechaniken untersucht werden. Die Vertauschung von Antriebs- und Belastungsseite ergibt weitere Variationsmöglichkeiten; durch Einstellung von Reibung und Lose können in der Praxis häufig auftretende Nichtlinearitäten berücksichtigt werden.

Im folgenden werden exemplarisch Meßergebnisse für die Off-line-Identifikation mit den drei beschriebenen Verfahren präsentiert. Anschließend werden auf der Grundlage der identifizierten Parameter eine Drehzahlregelung mit aktiver Schwingungsdämpfung implementiert und zugehörige Meßergebnisse angegeben.

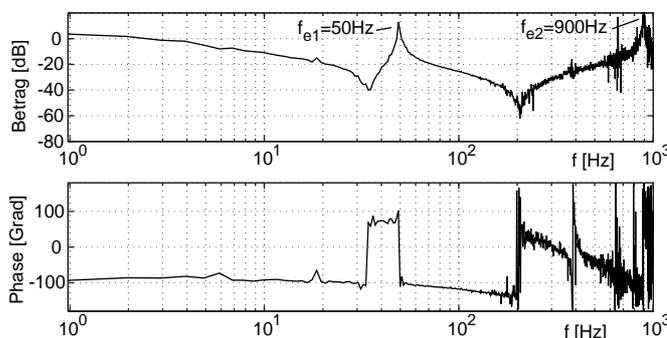


Bild 6: Frequenzgang des mechanischen Versuchstands

Wie der gemessene Frequenzgang in Bild 6 verdeutlicht, handelt es sich bei dem mechanischen Versuchsaufbau strenggenommen um ein Dreimassensystem, wobei jeweils eine Resonanzstelle bei $f_{e1} \approx 50\text{Hz}$ und $f_{e2} \approx 900\text{Hz}$ liegt. Aufgrund des großen Abstandes kann $f_e \approx 50\text{Hz}$ als dominante Eigenfrequenz betrachtet und das System näherungsweise als Zweimassensystem approximiert werden.

In Bild 7a sind die Meßsignale zur Bestimmung von J_Σ und f_{dom} dargestellt. Das untere Bild zeigt das Frequenzspektrum des Signals $\Delta\omega_M(k)$, welches mit Hilfe der Einmassenmodell-Approximation ermittelt wurde. Die Analyse ergab bei Beschränkung auf den Frequenzbereich bis 250Hz eine dominante Eigenfrequenz von $f_{dom} = 50\text{Hz}$ und das Gesamtträgheitsmoment $J_\Sigma = 0,056\text{kgm}^2$.

Die Schätzergebnisse der einzelnen Identifikationsverfahren zeigen die Bilder 7b-7d. Für jedes Verfahren sind in den oberen beiden Bildern die Eingangs- und Ausgangsdaten dargestellt und darunter der aus den geschätzten Parametern berechnete Frequenzgang (gestrichelt). Der bei FGA gemessene nichtparametrische Frequenzgang wird jeweils zusätzlich als Referenz eingezeichnet, um einen Eindruck von der Genauigkeit des geschätzten Parametersatzes zu bekommen.

Alle Verfahren liefern in etwa dieselben Parameterschätzwerte, die das System als schwach gedämpftes Zweimassensystem mit der Eigenfrequenz $f_e = 49\text{Hz}$ beschreiben. Das Verhältnis von last- zu motorseitigem Trägheitsmoment beträgt $V_J = 0,96$ bei einem Gesamtträgheitsmoment von $J_\Sigma = 0,0565\text{kgm}^2$. Die Auswahl eines Identifikationsverfahrens wird somit in erster Linie von den zulässigen Testsignalen und Betriebsarten bestimmt. Die Frequenzgangsanalyse liefert ein gut interpretierbares, nichtparametrisches Modell als Zwischenlösung, mit dem zunächst die Modellordnung abgeschätzt werden kann. COR-LS liefert mit den Korrelationsfunktionen ebenfalls ein Zwi-

schenmodell, welches jedoch nicht so gut interpretierbar ist wie die Frequenzkennlinien. Dafür ist bei COR-LS in vielen Fällen keine Linearisierung des Systems erforderlich, da eine nichtlineare Reibkennlinie im Modellansatz berücksichtigt wird. Die Ergebnisse von IV4 sind ebenfalls gut, jedoch muß hierbei die angesetzte Modellordnung stimmen, da andernfalls kein brauchbares Modell geschätzt wird. Eine vorausgehende Strukturidentifikation ist deshalb unumgänglich. Sind diese Voraussetzungen erfüllt, hat es sich für stark verrauschte Meßsignale jedoch als vorteilhaft erwiesen.

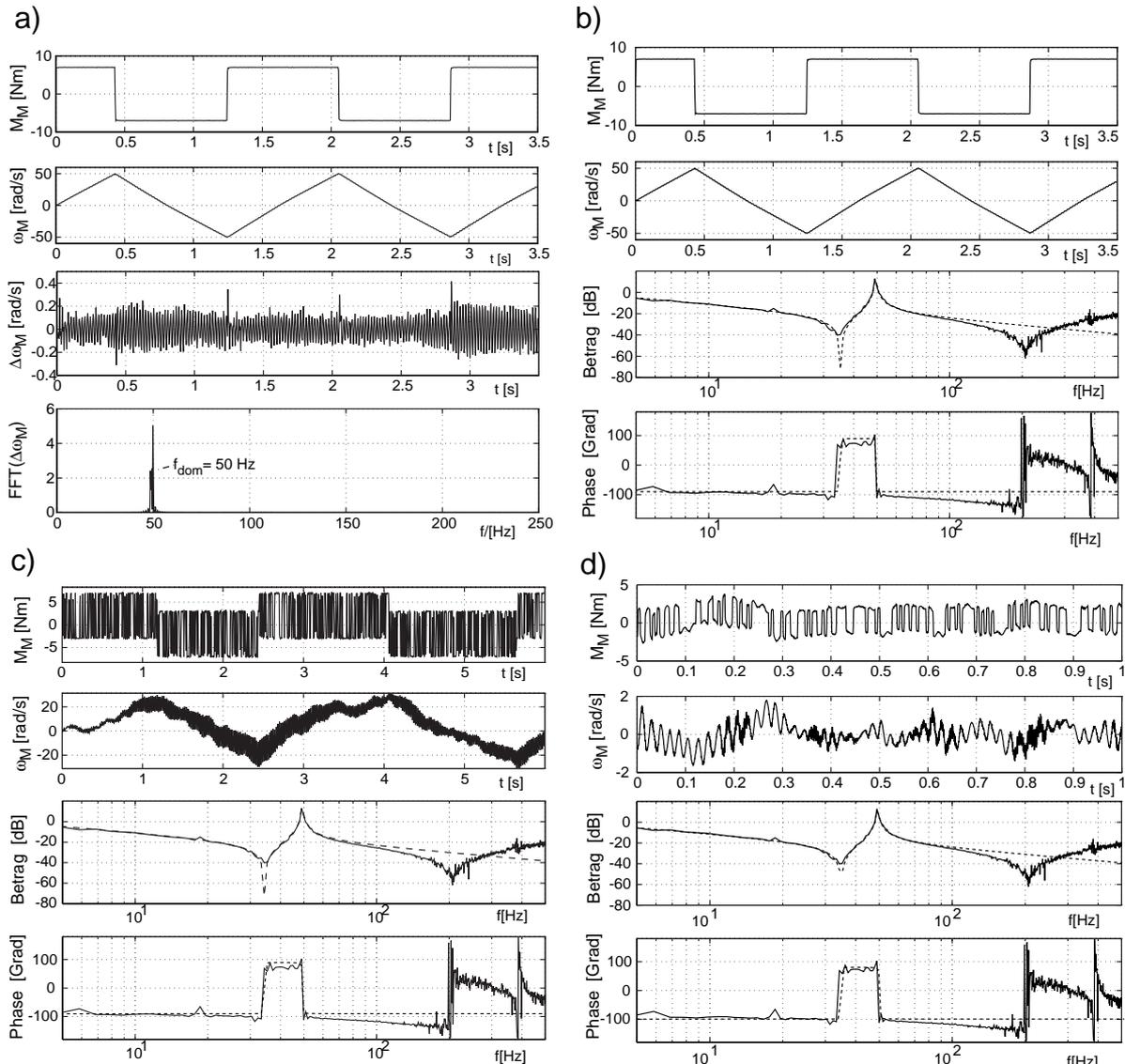


Bild 7: a) A priori Bestimmung von J_Σ und f_{dom}
 c) Identifikationsergebnisse mit COR-LS

b) Identifikationsergebnisse mit IV4
 d) Identifikationsergebnisse mit FGA

Reglerimplementierung

Die aktive Dämpfung der zugehörigen Eigenschwingung kann z.B. mit dem in [7] vorgestellten Regler erfolgen, der auf der Aufschaltung der geschätzten Differenzdrehzahl basiert. Bild 8 zeigt für dieses Regelungskonzept die Sprungantworten von Motor- und Lastdrehzahl sowie das zugehörige Motor- und Wellendrehmoment, wobei Regler und Störgrößenbeobachter mit den geschätzten Parametern dimensioniert wurden. Die aktive Dämpfung der Lastdrehzahl durch den Motor ist gut zu erkennen, was im nach-

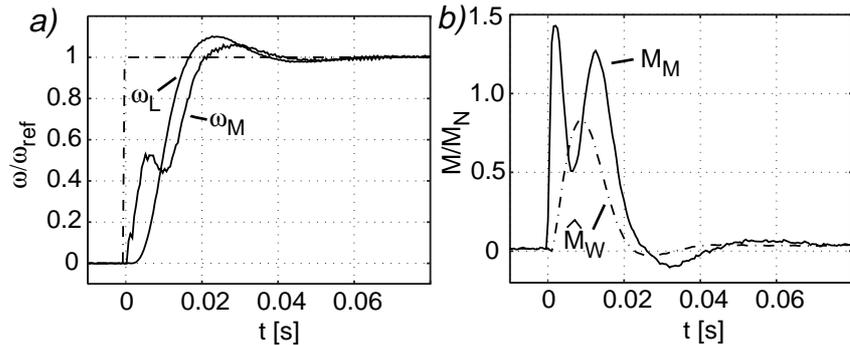
hinein die Approximation der Strecke als Zweimassensystem nochmals rechtfertigt.

Bild 8:

Drehzahlregler mit aktiver Schwingungsdämpfung

a) *Gemessene Sprungantworten von Motor- und Lastdrehzahl*

b) *Motor- und Wellendrehmoment*



Danksagung

Die Autoren danken der Europäischen Union für die Förderung des Projektes „Self-Commissioning Speed and Position Control for Electrical Drives with Identification of Mechanical Load“ (SC-Drives, Projektnummer: BRST-CT96-5070).

Literatur

- [1] **Schäfer, U.:** *Entwicklung von nichtlinearen Drehzahl- und Lageregelungen zur Kompensation von Coulomb-Reibung und Lose bei einem elektrisch angetriebenen, elastischen Zweimassensystem.* Diss. Technische Universität München, 1992.
- [2] **Ruff, M., Grotstollen, H.:** *Off-Line-Identification of the Electrical Parameters of an Industrial Servo Drive System.* Conf. Rec. , 1996 Industrial Application Society Annual Meeting, vol 1, pp 213-220.
- [3] **Isermann, R.:** *Identifikation dynamischer Systeme, Band 1.* Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1992.
- [4] **Isermann, R.:** *Identifikation dynamischer Systeme, Band 2.* Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1992.
- [5] **Ljung, L.:** *System Identification: Theory for the user.* Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1987.
- [6] **Bendat, J., Piersol, A.G.:** *Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis.* Wiley Interscience, New York, 1993.
- [7] **Schütte, F., Beineke, S., Henke, M., Grotstollen, H.:** *Drehzahlregelung eines elastischen Zweimassensystems mit On-line-Identifikation lastseitiger Reibung und aktiver Schwingungsdämpfung bei Stellgrößenbegrenzung.* 7. Internationale Fachmesse und Kongreß für Speicherprogrammierbare Steuerungen, Industrie-PCs und Elektrische Antriebstechnik, Sindelfingen, 1996, pp 303-315.
- [8] **Beineke, S., Schütte, F., Wertz, H. Grotstollen, H.:** *Comparison of Parameter Identification Schemes for Self-Commissioning Drive Control of Nonlinear Two-Mass Systems.* IEEE Industrial Applications Society, Annual Meeting, New Orleans, Louisiana, October 5-9, 1997.
- [9] **Held, V.:** *Ein Vergleich von Methoden zur Identifikation von Übertragungsfunktionen elastischer Antriebssysteme.* Automatisierungstechnik at 38, 1990, S. 435ff.