

## Filterdesign für die APCI-8001 und APCI-8008 zur Regelung von momentengeregelten Antriebssystemen

In dieser Application Note wird gezeigt, wie man die PID-Filterparameter für die Achsensteuerungskarten APCI-8001 und APCI-8008 beim Einsatz von stromgesteuerten (momentengeregelten) Antriebssystemen bestimmen kann.

Bei **drehzahlgesteuerten** Antriebssystemen kann die Ermittlung der Filterparameter relativ einfach experimentell ermittelt werden, da die Parameter  $K_p$  und  $k_{fcv}$  unabhängig voneinander experimentell eingestellt und danach zusammengefügt werden können. Nachträglich kann noch ein Integralanteil ( $K_i$ ) hinzugefügt werden. Dieser Wert wird ebenfalls experimentell bestimmt, ohne die zuvor ermittelten Werte für  $K_p$  und  $k_{fcv}$  zu verändern. Die Parameter  $K_d$ ,  $k_{pl}$  und  $k_{fca}$  werden beim Drehzahlregler im Allgemeinen nicht benötigt und verbleiben auf dem Wert 0.

Bei einem **stromgesteuerten** System ist diese Vorgehensweise nicht so einfach. Zur Regelung eines stromgesteuerten Antriebssystems wird mindestens ein Regler mit PD-Charakteristik benötigt. Insbesondere  $K_p$  und  $K_d$  wirken sich wechselseitig aufeinander aus. In praktischen Fällen wird weiterhin die Beschleunigungsvorsteuerung ( $k_{fca}$ ) und ein Integralanteil ( $K_i$ ) benötigt. Durch den wechselweisen Einfluss von  $K_p$  auf  $K_d$  und umgekehrt lassen sich die einzelnen Parameter nicht mehr so einfach experimentell bestimmen.

Um dem Anwender die Einstellung des Lageregelkreises bei stromgesteuerten Antriebssystemen zu erleichtern, wurde das Programm `mcfg.exe` mit der nachfolgend beschriebenen Funktionalität ausgestattet. Diese Vorgehensweise ist nicht möglich bei drehzahlgesteuerten Antriebssystemen.

### Versionshinweise und Voraussetzungen

Die nachfolgend beschriebene Vorgehensweise ist nur gültig unter Verwendung folgender oder neuerer Software-Versionen:

<code>mcfg.exe</code>	V2.5.3.36
<code>rwmos.elf</code>	V2.5.3.31
<code>mcug3.dll</code>	V2.5.3.23

Für das erfolgreiche Nachvollziehen der nachfolgenden Ausführungen wird vorausgesetzt, dass der Benutzer mit der Handhabung des Programms `mcfg` vertraut ist. Es muss ihm bekannt sein, wie er mit Hilfe des Motion-Tools-Window einen Sollwertsprung auf das Antriebssystem ausgeben kann, wie man ein Verfahrensprofil startet und wie man mit Hilfe des Fensters „Graphic Analysis“ eine Verfahrbewegung anzeigen kann.

**Weiterhin wird vorausgesetzt, dass der Anwender sich bewusst ist, dass die Achsen zum Teil ungerichtet verfahren werden und dass es jederzeit möglich ist, dass z.B. durch eine Falscheingabe unerwartete Verfahrbewegungen durchgeführt werden. Deshalb muss gewährleistet sein, dass der entsprechende Motor frei drehen kann oder dass jederzeit ein Stopp per Not-Aus-Abschaltung oder sonstige Vorrichtungen gewährleistet ist.**

### Was ist ein stromgesteuertes Antriebssystem?

Bei einem stromgesteuerten Antriebssystem hat der Leistungsverstärker die Funktion eines Stromreglers (kein Drehzahlregler). Deshalb ist hier im Allgemeinen keine Rückführung des Drehzahlwertes notwendig (kein Tachosignal).

Der Sollwerteingang der Leistungselektronik hat die Bedeutung eines Ankerstromes. Da bei einem Servomotor das Drehmoment proportional zum Ankerstrom ist, wird ein derartig angesteuertes System auch als momentengeregeltes Antriebssystem bezeichnet.

Um die nachfolgend beschriebene Vorgehensweise verwenden zu können, muss einwandfrei sichergestellt sein, dass es sich um ein stromgesteuertes Antriebssystem handelt. Bei drehzahlgesteuerten Antriebssystemen kann und darf diese Art der Filterparameterermittlung nicht angewendet werden.

## Aufzeichnung der Sprungantwort eines Antriebssystems

Die Filterparameterberechnung für stromgesteuerte Antriebssysteme basiert auf der Auswertung der Sprungantwort des Antriebssystems. Die Sprungantwort kennzeichnet das Verhalten des Antriebs, wenn dieses durch einen Sprung der Stellgröße (z.B. 1 Volt für 1 Sekunde) angesteuert wird.

Um die Sprungantwort aufzuzeichnen, muss ein „Graphic Analysis Window“ und ein „Motion Tools Window“ für die betreffende Achse geöffnet sein, z.B. nach Bild 01. Die Achse darf nicht durch fehlende Verstärkerfreigabe, Not-Aus Bedingungen oder sonstige I/O-Bedingungen gesperrt sein. Nun wird im Motion-Tools-Fenster der Ausgabesprung definiert (in Bild 01 z.B. 1 V für 1 s).

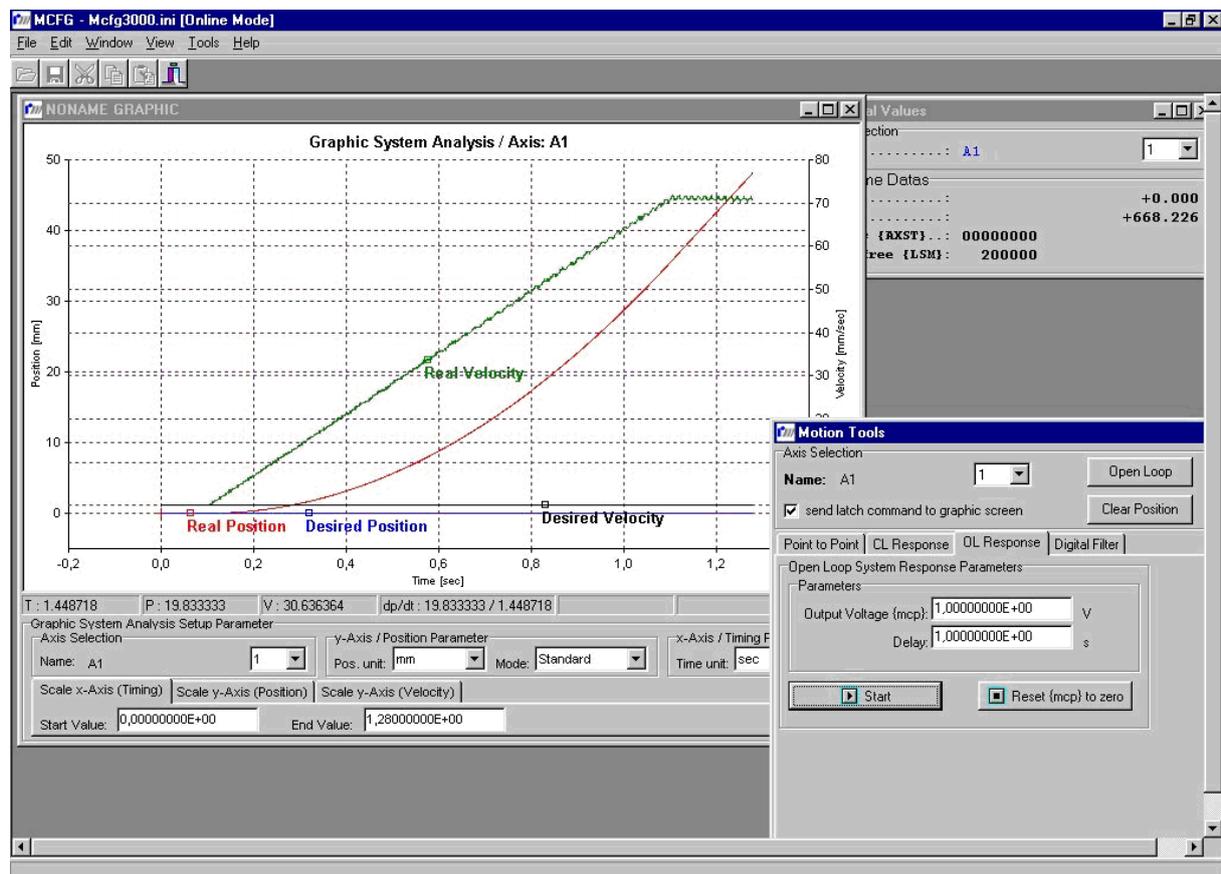


Bild 01: Sprungantwort eines stromgesteuerten Antriebssystems in mcfg

Durch Klick mit der linken Maustaste auf die Schaltfläche „Start“ wird der Ausgabe- und Aufzeichnungsvorgang gestartet. Hierbei ist zu beachten, dass bei der Aufnahme der Sprungantwort (OL Response) zunächst (zum Zeitpunkt 0) vom System eventuell definierte Ausgänge für die Verstärkerfreigabe (PAE) gesetzt werden. Erst nach 100 ms wird dann der vorgegebene Spannungswert für die vorgegebene Dauer von der Steuerung ausgegeben. Danach wird die Verstärkerfreigabe sofort wieder zurückgenommen.

Nun kann die aufgezeichnete Achsbewegung durch einen Klick mit der rechten Maustaste ins Grafikenfenster und Anwahl des Menüs „Update Screen“ sichtbar gemacht werden.

Bei einem stromgesteuerten Antriebssystem sollte sich dann ein Bild ähnlich Bild 01 ergeben. Charakteristisch für die aufgezeichnete Sprungantwort ist der lineare Anstieg der Ist-Geschwindigkeit (Real Velocity) und der parabolische Anstieg der Ist-Position (Real Position). Der Bereich für den Anstieg der Ist-Geschwindigkeit ist begrenzt durch die Dauer der Sollwertausgabe und durch das Erreichen der Maximalgeschwindigkeit des Antriebs.

## Sprungantwort eines drehzahlgesteuerten Antriebssystems

Um dem Anwender den Unterschied zwischen strom- und drehzahlgesteuerten Systemen weiter zu verdeutlichen, wird an dieser Stelle die Sprungantwort eines drehzahlgesteuerten Systems dargestellt.

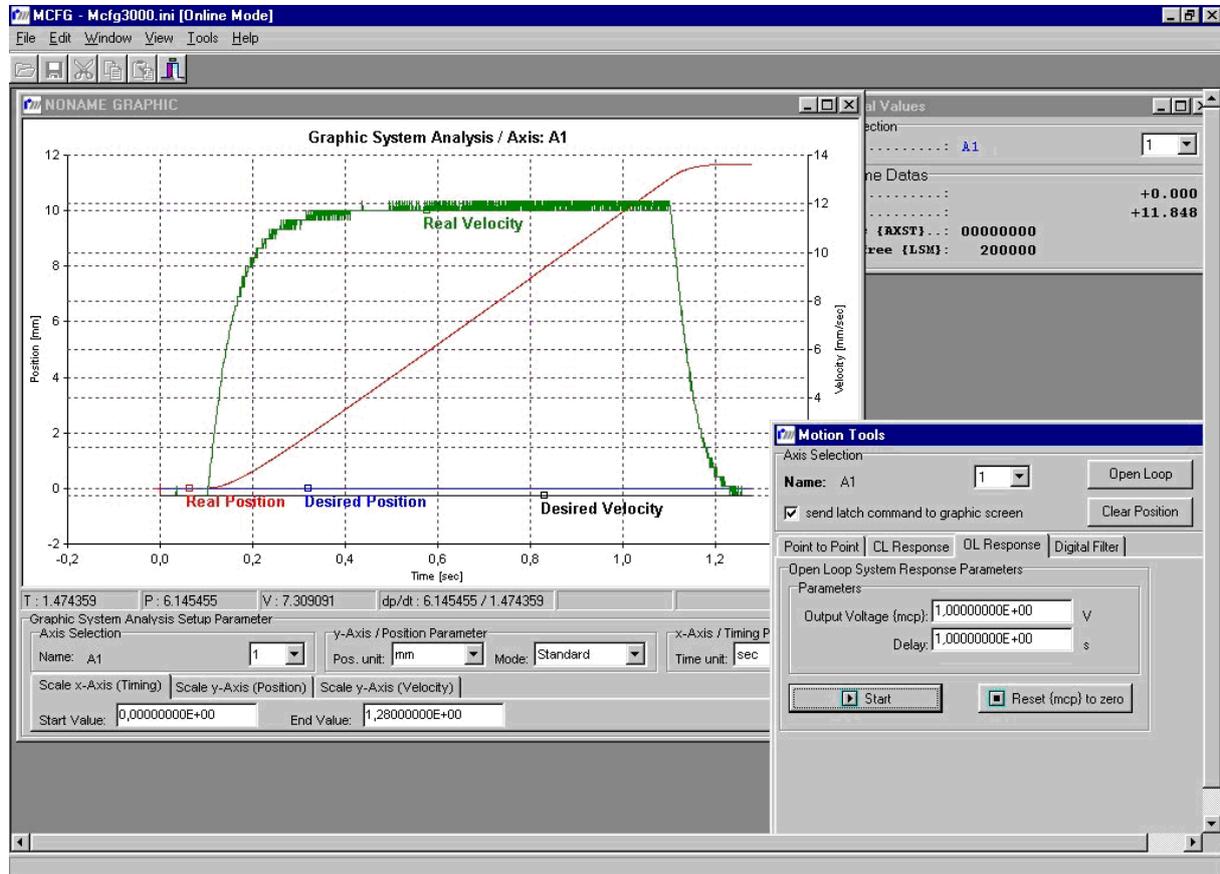


Bild 02: Sprungantwort eines drehzahlgesteuerten Antriebssystems

Charakteristisch für ein derartiges Antriebssystem ist der Anstieg der Ist-Geschwindigkeit auf einen Maximalwert, der proportional zur Stellgröße ist. Idealerweise erfolgt der Anstieg nach einer e-Funktion. Real sind jedoch auch mehr oder weniger gut gedämpfte Anstiegsfunktionen möglich. Auch bei stromgesteuerten Antriebssystemen kann bei falscher Interpretation die Sprungantwort so aussehen wie in Bild 02. Hier ist es aber so, dass die Maximaldrehzahl schon bei geringer Stellgrößenangabe erreicht wird, d.h., der Drehzahl-Endwert ist nicht proportional zur ausgegebenen Stellgröße.

## Phasenlage des Antriebssystems

Für das erfolgreiche Filterdesign ist es unumgänglich, dass die Phasenlage des Systems richtig eingestellt ist, d.h., die Ausgabe einer positiven Stellgröße (Spannung) muss ein Verfahren des Antriebssystems zu positiven Zählerwerten bewirken. In Bild 03 wird die Sprungantwort eines Antriebssystems mit Phasendrehung gezeigt.

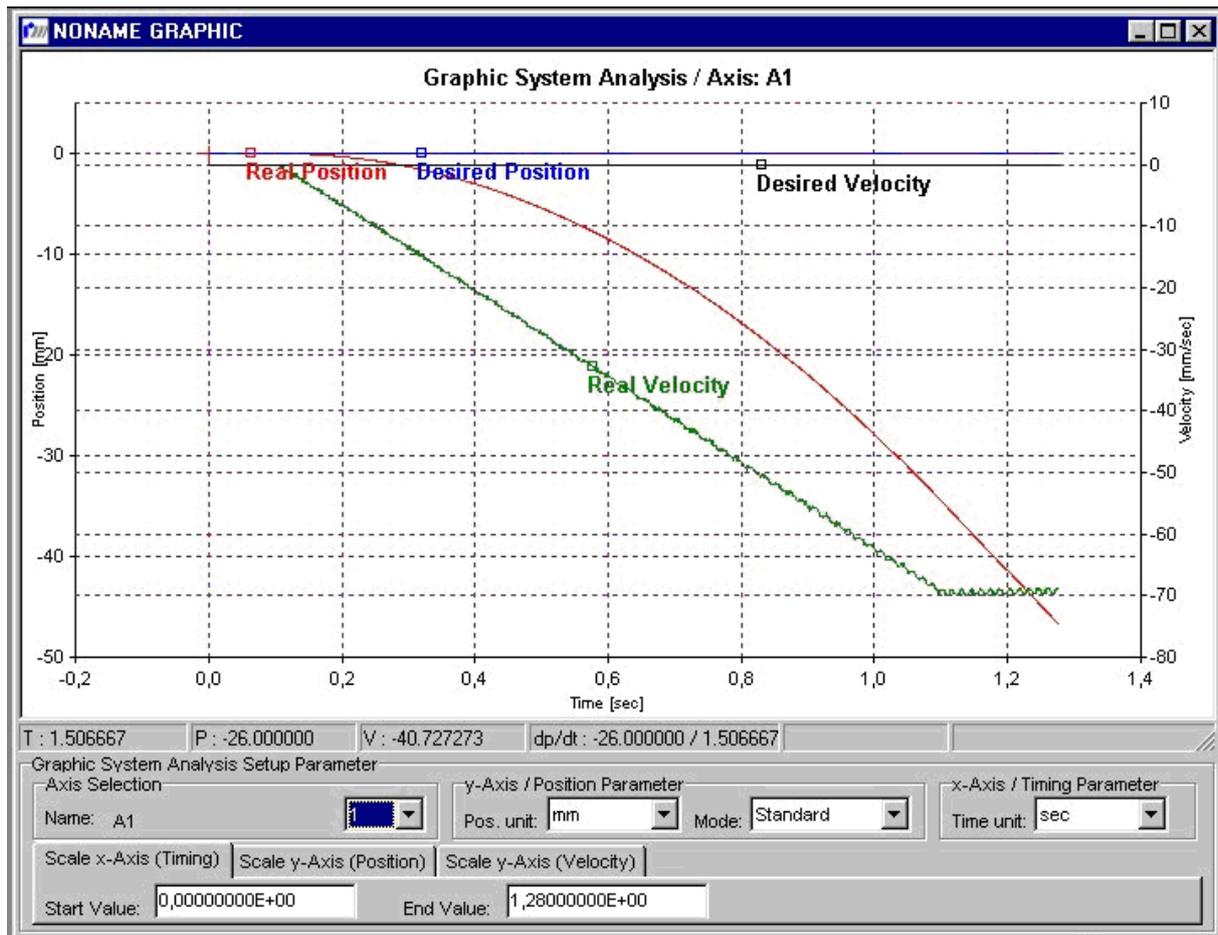


Bild 03: Sprungantwort eines stromgesteuerten Antriebssystems mit gedrehter Phasenlage

Auch dieses Bild wurde durch Ausgabe einer Sollwertspannung von +1V aufgezeichnet. Dieses Bild darf sich jedoch nur ergeben, bei Ausgabe einer negativen Sollwertspannung. Da jedoch eine positive Spannung ausgegeben wurde, wird hier eindeutig ein System mit Phasendrehung angezeigt. Wenn durch die Aufzeichnung der Sprungantwort eine Phasendrehung detektiert wird, muss zunächst die Phasenlage korrigiert werden. Dies kann durch Softwarekonfiguration in mcfg, durch Verdrahtungsänderungen oder ggf. durch entsprechende Konfiguration des Leistungsverstärkers geschehen.

## Filterdesign mit dem Programm mcfg.exe

Nachdem nun die Sprungantwort des Antriebssystems z.B. lt. Bild 01 aufgezeichnet wurde, kann nun das eigentliche Filterdesign erfolgen. Man aktiviert zunächst das Grafikenster und betätigt die Taste ALT (dauernd gedrückt halten). Dadurch wird der Cursor im Grafikenster zu einem Fadenkreuz. Der Cursor wird nun z.B. auf den Startpunkt des Anstiegs der Istgeschwindigkeit positioniert (Bild 04).

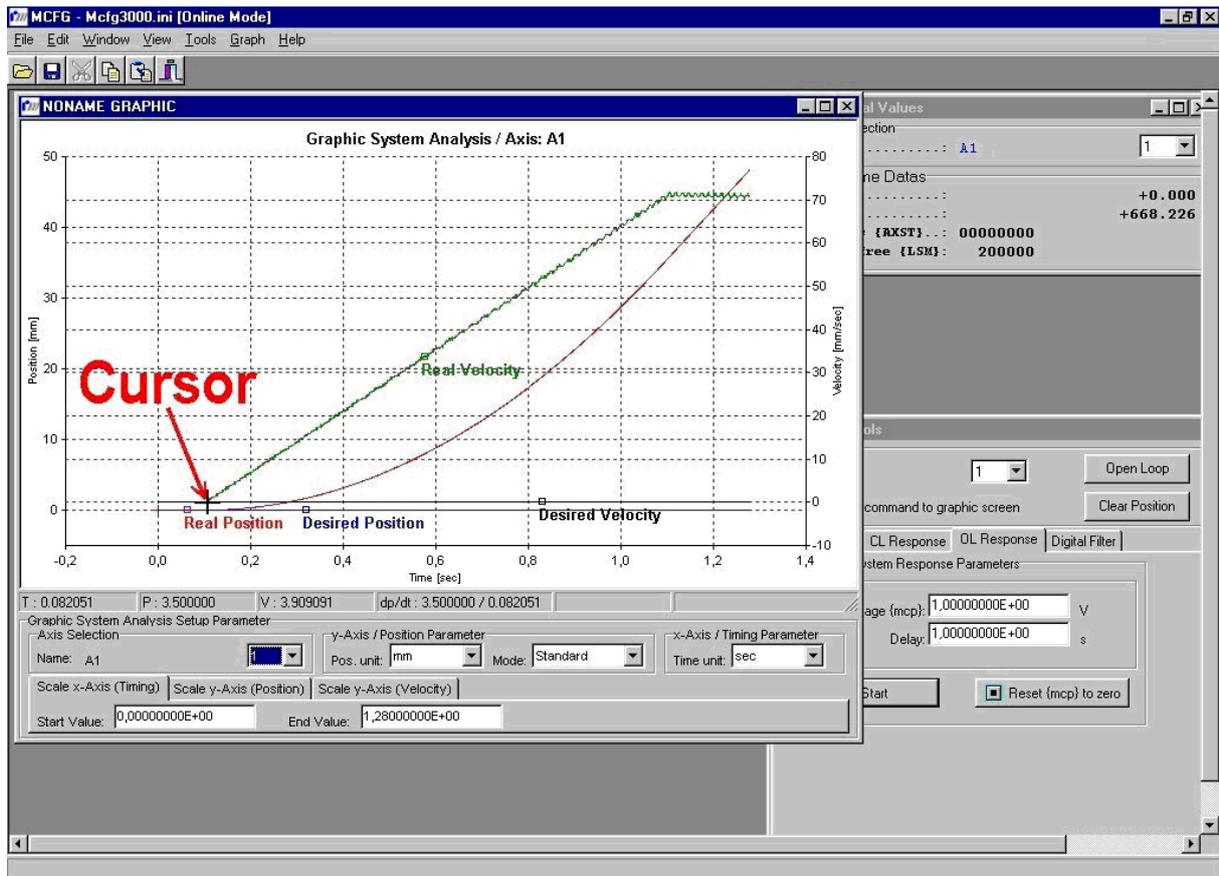


Bild 04: Cursor auf den Anfangspunkt positionieren

Nun kann man mit gedrückter linker Maustaste eine gestrichelte Gerade aus diesem Punkt herausziehen. Die Alt-Taste bleibt während dieses Vorgangs ebenfalls gedrückt.

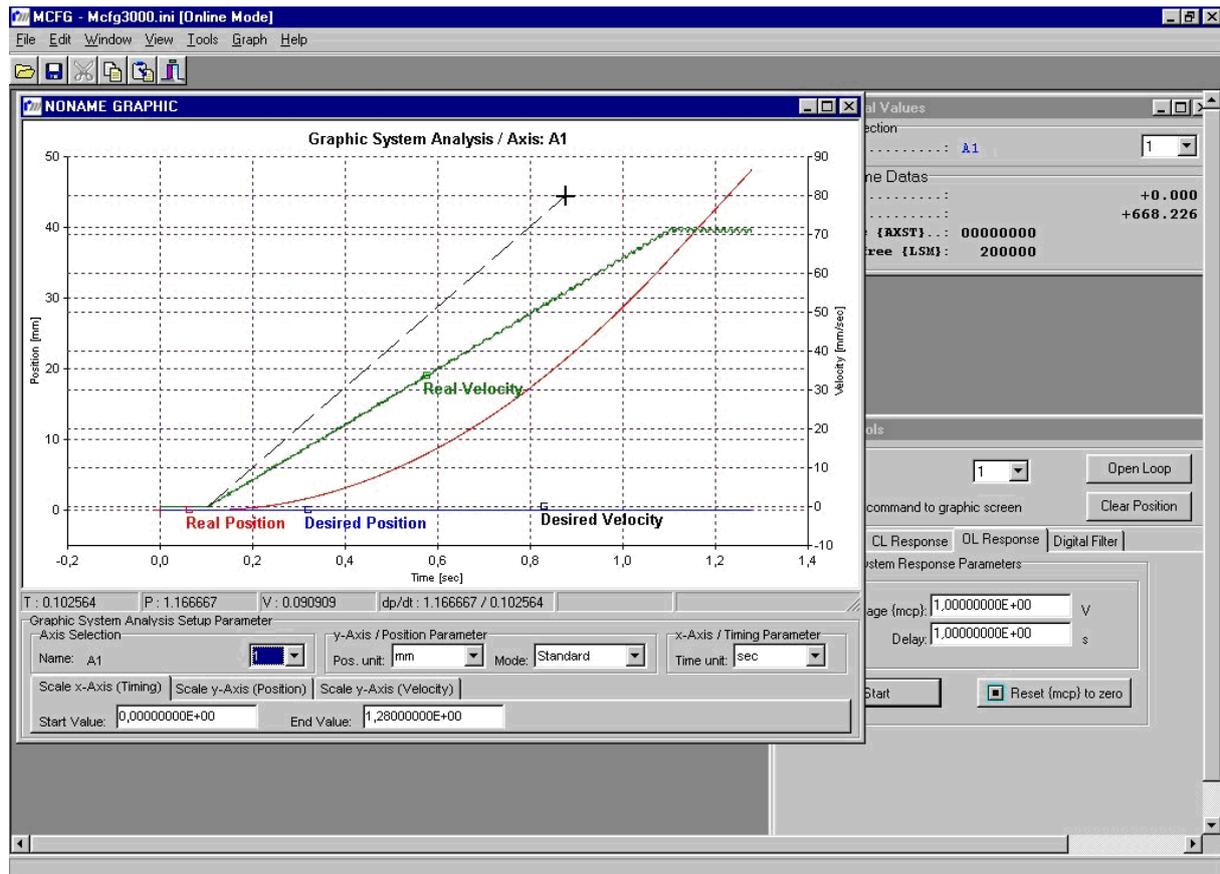


Bild 05: Ziehen einer Gerade aus dem Startpunkt

Diese Gerade wird nun so gelegt, dass Sie sich mit dem Anstieg der Ist-Geschwindigkeit (Real Velocity) deckt. Auf diese Weise soll die Steigung der Geschwindigkeit ermittelt werden. Es ist also unerheblich, wo sich der Start- und Endpunkt befinden, es ist nur wichtig, dass die Steigung der gezogenen Gerade mit der Steigung der Ist-Geschwindigkeit übereinstimmt.

## Zoomen im Grafikfenster

Falls der Anstieg der Ist-Geschwindigkeit im Grafikfenster nicht so gut erkennbar ist wie in diesem Beispiel, z.B. weil der Anstieg nahezu senkrecht ist, muss die Anstiegskennlinie zunächst herausgezoomt werden, damit die Ermittlung der Steigung mit ausreichender Genauigkeit erfolgen kann. Dazu positioniert man den Cursor zunächst auf eine Ecke des Fensters, das gezoomt dargestellt werden soll, z.B. links unten. Nun betätigt man die Shift-Taste und zieht mit der linken Maustaste ein Bereichsfenster auf (bei gedrückter Shift-Taste). Nach Loslassen der Maustaste wird das ausgewählte Fenster gezoomt dargestellt. Der Zoomvorgang kann im Bedarfsfall mehrfach wiederholt werden. Um auf die ursprüngliche Darstellungsart zurückzukommen, muss einfach bei gedrückter Shift-Taste mit der linken Maustaste in das Grafikfenster geklickt werden.

## Start der Parameterberechnung

Nachdem man nun die Steigungsgerade so positioniert hat, dass die Steigung dem Anstieg der Ist-Geschwindigkeit entspricht, lässt man die linke Maustaste (und danach auch die Alt-Taste) los. Nun wird ein Bildschirmfenster geöffnet, wie z.B. Bild 06.

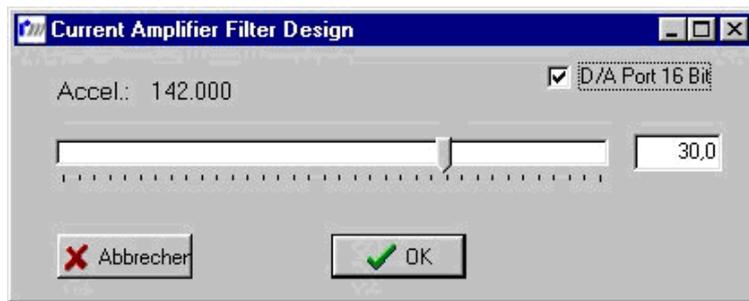


Bild 06: Filterparameter-Berechnung

In diesem Bild wird die gemessene Beschleunigung (Accel) in Digits / Sekunden angezeigt. Des Weiteren kann nun mit einem Schieberegler die gewünschte Bandbreite des Lagereglers zwischen 0,1 und ca. 300 Hz eingestellt werden. Die Reglerbandbreite ist ein Maß für die Härte des geschlossenen Lageregelkreises, kann aber wegen der Stabilität des geschlossenen Regelkreises nicht beliebig hoch gewählt werden.

Nach Betätigen der Schaltfläche „OK“ wird die Berechnung mit den angezeigten Werten gestartet. Die berechneten Werte werden im Fenster „Motion Tools“ auf der Registerkarte „Digital Filter“ eingetragen.

**Wichtiger Hinweis:** Die berechneten Reglerparameter sind nur gültig, wenn die Aufzeichnung der Sprungantwort im *linearen Betriebsbereich* erfolgte. Ob man sich im linearen Betriebsbereich befindet, kann man erkennen, wenn man den Ausgabewert verdoppelt oder halbiert. In diesen Fällen muss die angezeigte Beschleunigung ebenfalls ca. verdoppelt oder halbiert sein. Wenn sich z.B. der Beschleunigungswert bei Verdoppelung der Ausgabespannung nicht ändert, befindet sich das System in der Begrenzung. Die dann berechneten Reglerparameter sind nicht gültig.

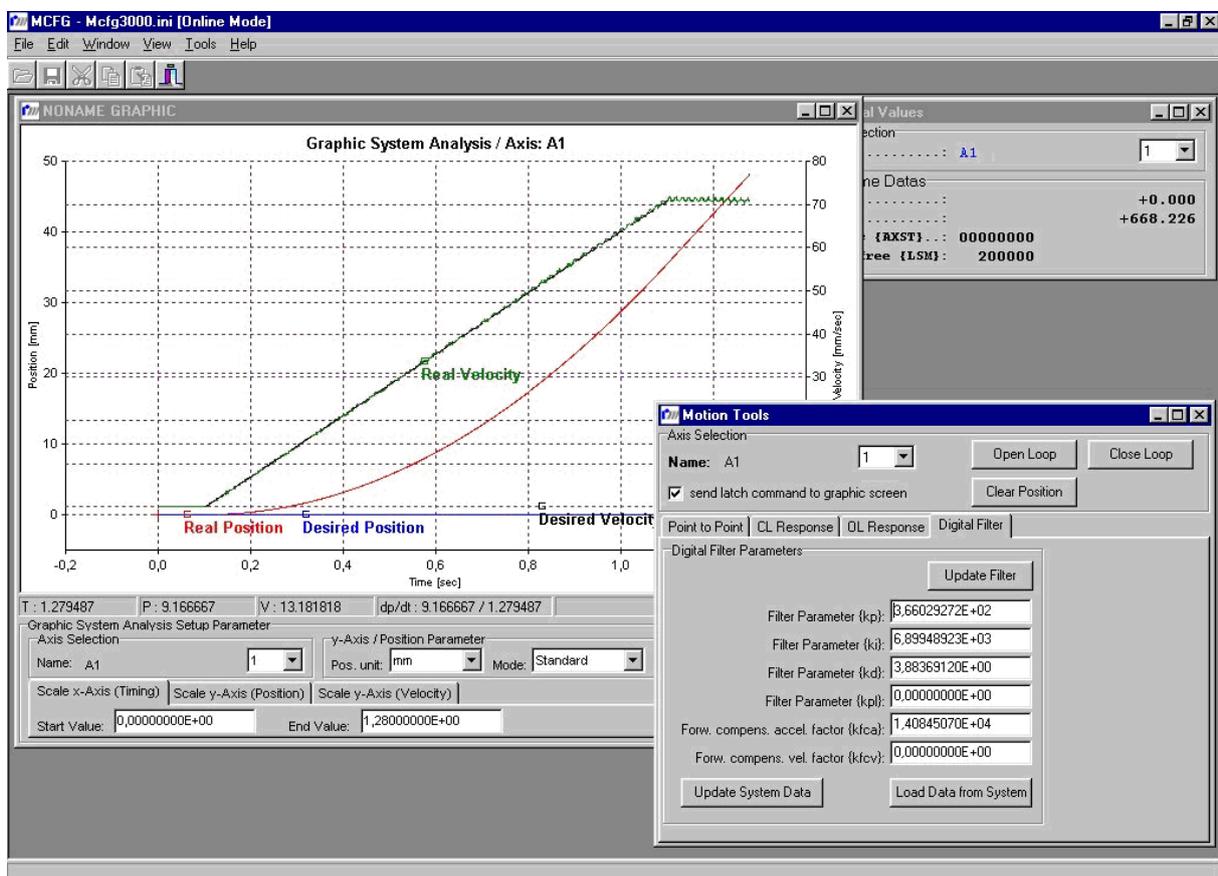


Bild 07: Die berechneten Filterparameter wurde im Motion-Tools Fenster eingetragen.

Durch Betätigen der Schaltflächen „Update Filter“, „Clear Position“ und „Close Loop“ kann der Lageregelkreis nun mit den ermittelten Werten geschlossen werden.

Nun muss das Verhalten des Lagereglers überprüft werden in Bezug auf Genauigkeit und Stabilität.

Wenn die Messung der Systembeschleunigung bei einem System mit Phasendrehung durchgeführt wird, erscheint anstatt des Fensters laut Bild 06 zunächst folgende Meldung:



Bild 06a: Antriebssystem mit Phasendrehung

Nach Quittierung erscheint dann das Fenster „Current Amplifier Filter Design“, jedoch mit inaktiver OK-Taste. In diesem Fall muss zunächst die Phasendrehung richtig gestellt oder aber die Steigungsgerade richtig angelegt werden.

## Aufzeichnen einer Verfahrbewegung

Nach Anwahl der Registerkarte „Point to Point“ kann ein Verfahrprofil definiert werden. Ein Beispiel hierzu wird in Bild 08 gezeigt.

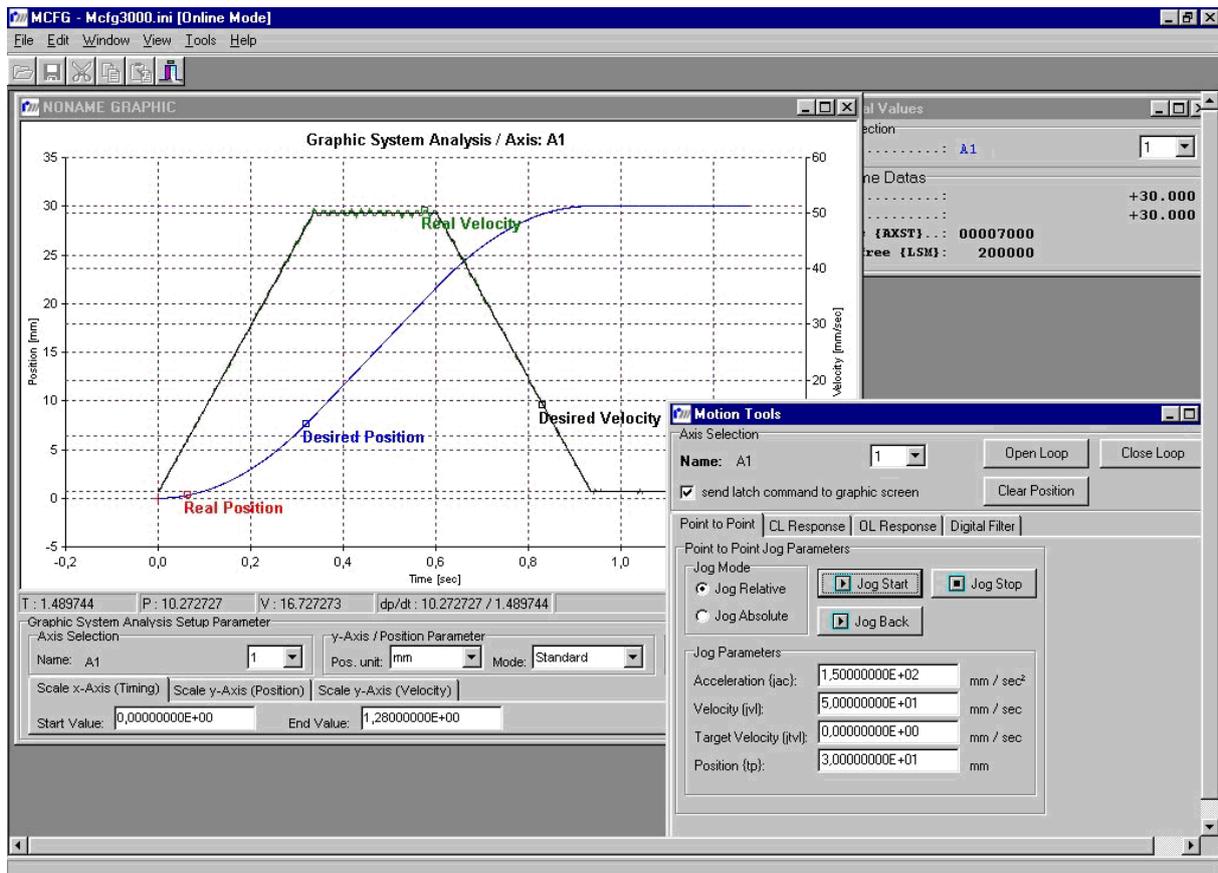


Bild 08: Trapez-Drehzahl-Profil wurde ausgeführt

Hier ist zu beachten, dass eine Profil-Zielgeschwindigkeit (jtv) von 0 eingetragen ist, da ansonsten die Achse am Profilende nicht stehen bleibt. Nach Betätigen der Schaltfläche „Jog Start“ werden das Fahrprofil und der Aufzeichnungsvorgang gestartet. Am besten fährt man das Profil nach Beendigung sofort mit „Jog Back“ zurück, damit der Verfahrbereich mit der Zeit nicht verlassen wird. Nach Aktualisierung des Grafikensters per rechter Maustaste und „Update Screen“ (siehe oben) wird das abgefahrte Fahrprofil im Grafikenster dargestellt und kann nun in Bezug auf Stabilität und Genauigkeit beurteilt werden.

Um z.B. das Einfahren in die Zielposition besser darzustellen, kann der entsprechende Bereich gezoomt werden.

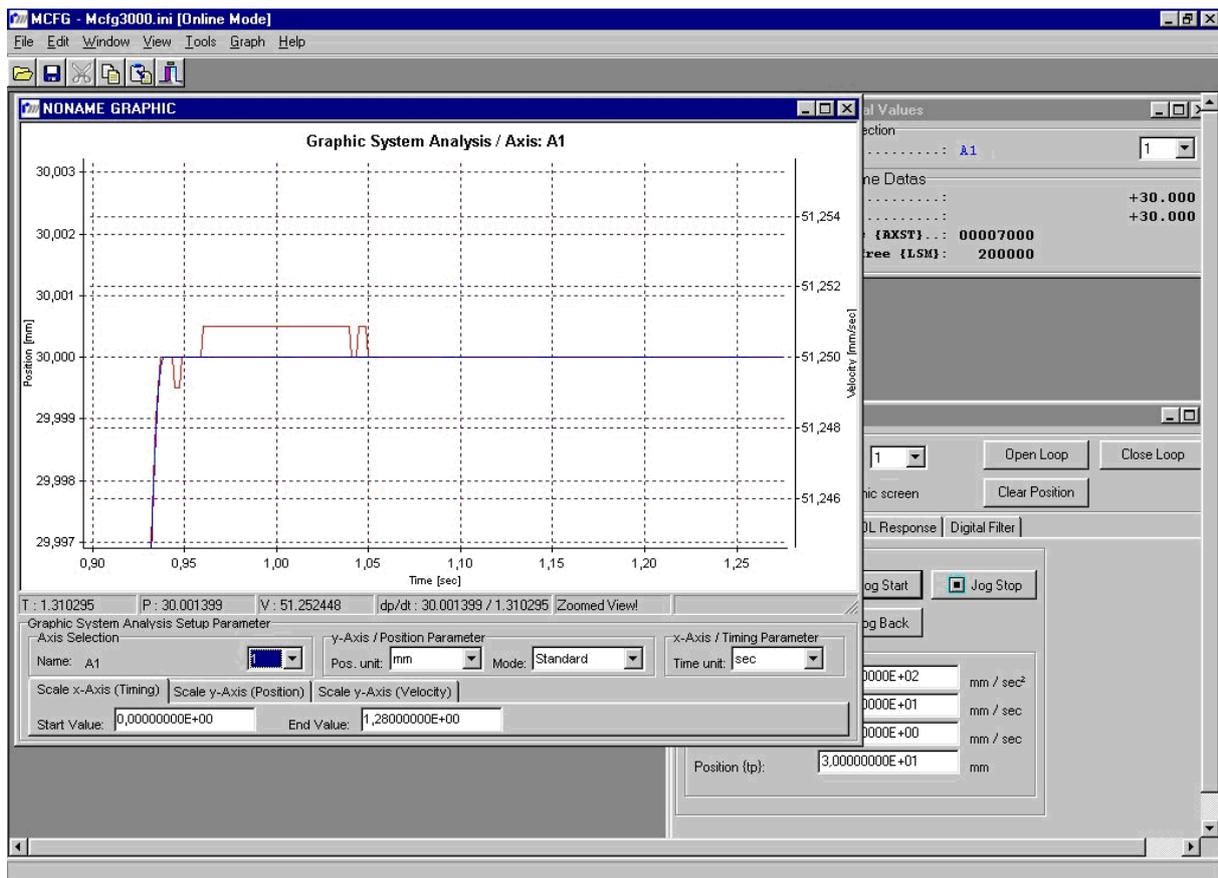


Bild 09: Einfahren in Zielposition aus Bild 08 stark ausgezoomt

Obiges Bild zeigt ein nahezu ideales Einfahren in die Zielposition. In der Praxis wird dies zunächst nicht der Fall sein. Oftmals muss die Parameterermittlung mehrfach wiederholt werden. Um nicht jedes Mal die Sprungantwort des Systems neu aufzeichnen zu müssen, können für die betreffende Achse zwei Grafikenster geöffnet werden. Die Aufzeichnung der Sprungantwort kann dann z.B. im ersten Fenster einmalig erfolgen. Die Beurteilung der Fahrprofile kann im zweiten Grafikenster erfolgen.

Wenn nun die Berechnung erneut gestartet werden soll, um einen anderen Parametersatz mit geänderter Reglerbandbreite zu berechnen, dann wird einfach im ersten Grafikenster erneut die Steigungsgerade eingezeichnet.

Zur Feinjustage können die einzelnen Parameter auch manuell nachjustiert werden. Geänderte Parameter im Fenster „Motion Tools“ werden durch Betätigen der Schaltfläche „Update Filter“ übernommen. Erfahrungsgemäß zeigt sich, dass z.B. der berechnete Integralanteil  $K_i$  oftmals doppelt bis viermal so groß gewählt werden kann wie der berechnete Wert.

## Der Filterparameter Kp

Der Wert Kp stellt die Proportionalverstärkung des PID-Filters dar.

## Der Filterparameter Kd

Mit dem Wert in Kd wird der D-Anteil des PID-Filters parametrierd. Kd ist die Vorhaltezeit des D-Anteils multipliziert mit der Proportionalverstärkung Kp.

$$T_v = K_d / K_p$$

Der D-Anteil des PID-Filters kann durch Nullsetzen von Kd deaktiviert werden.

## Der Filterparameter Ki

Mit dem Wert in Ki wird der I-Anteil des PID-Filters parametrierd. Ki ist der Kehrwert der Nachstellzeit multipliziert mit der Proportionalverstärkung Kp. Der I-Anteil des PID-Filters kann durch Nullsetzen von Ki deaktiviert werden.

## Die Vorsteuerkoeffizienten kfcv und kfca

kfca ist der Beschleunigungs-Vorsteuerungskoeffizient und wird mit der hier beschriebenen Parameter-Ermittlung automatisch berechnet. Dieser Wert erzeugt aus der aktuellen Beschleunigung der Achse einen Ausgabewert der Stellgröße, welcher der gewünschten Beschleunigung entspricht. Dieser Wert ist nur sinnvoll bei momentengeregelten Antriebssystemen, d.h. wenn der Spannungs-Sollwert des nachgeschalteten Antriebsverstärkers einem Ankerstrom bzw. Drehmoment und somit einer Beschleunigung entspricht. Mit dem Wert 0 ist die Beschleunigungsvorsteuerung deaktiviert.

kfcv ist der Geschwindigkeits-Vorsteuerungskoeffizient (FeedForward) und wird nur bei drehzahl- bzw. geschwindigkeitsgeregelten Systemen verwendet. Bei der in diesem Dokument beschriebenen Verwendungsweise wird dieser Koeffizient nicht verwendet und bleibt auf dem Wert 0.

## Der Filterparameter kpl

In manchen Fällen kann die Verwendung des Filterparameters kpl sinnvoll sein. Mit diesem Parameter kann die Differentiationszeit des Lagereglers erhöht werden. Dies ist erforderlich bei kleiner Abtastzeit oder bei relativ trägen Antriebssystemen (großes Massenträgheitsmoment). In diesen Fällen wird nämlich durch einen Sprung des D-Anteils sehr schnell die Aussteuerungsgrenze des Stellgrößenausgangs erreicht. Durch diese Begrenzung entsteht ein nichtlineares System mit ungünstigen Regeleigenschaften (Antriebsgeräusche, Instabilität). Durch die Zeitkonstante des D-Anteils wird der D-Sprungimpuls auf einen größeren Zeitraum verteilt und dadurch die Gefahr der Stellgrößen-Begrenzung vermindert. Gängige Werte für kpl liegen bei 0,0002 – 0,1. Der Parameter hat die Bedeutung einer Zeit in Sekunden.

Der Wert von kpl kann in den meisten Fällen auf 0 gelassen werden und hat somit keine Wirkung. Bei Bedarf kann jedoch mit diesem Wert noch eine andere Regleroption aktiviert werden. Welche dieser Optionen aktiviert wird, wird mit dem Vorzeichen des Werts festgelegt.

## Positive Werte in kpl

Bei positiven Werten in kpl hat dieser Wert die Bedeutung einer Verzögerungszeit-Konstanten für einen realen D-Anteil (wie oben beschrieben). Insbesondere bei kleinen Abtastzeiten und hoher Reglerhärte kann es leicht sein, dass die Reglerstellgröße in die Übersteuerung gerät und der Regler somit nichtlineares Verhalten zeigt. Mit dieser Zeitkonstanten wird die Dauer einer D-Sprungantwort zwar verlängert, dafür aber die Amplitude verkleinert. Die Einheit von kpl ist Sekunden. Realistische Werte liegen zwischen 0,0002 und 0,01 s.

## Negative Werte in kpl

Bei negativen Werten in kpl hat dieser Wert die Bedeutung einer Verzögerungszeit-Konstanten im Stellgrößenkanal. Damit kann in vielen Fällen ein Überschwingen beim Einfahren in die Zielposition vermindert oder ganz unterdrückt werden. Insbesondere hart eingestellte Antriebssysteme neigen zum Überschwingen; auch dann, wenn die Vorsteuerung optimal eingestellt ist. Die Überschwingungsfreiheit wird allerdings durch eine Zeitverschiebung zwischen Ist- und Sollwertsignal „erkauft“. Die Einheit von kpl ist Sekunden. Realistische Werte liegen zwischen -0,0002 und -0,01 s.

## Speichern der ermittelten Werte

Nachdem die optimalen Filterparameter gefunden wurden, müssen diese resident in SYSTEM.DAT gespeichert werden. Dazu betätigt man zunächst die Schaltfläche „Update System Data“ (Fenster „Motion Tools“ Registerkarte „Digital Filter“). Danach öffnet man das Fenster „System Data“.

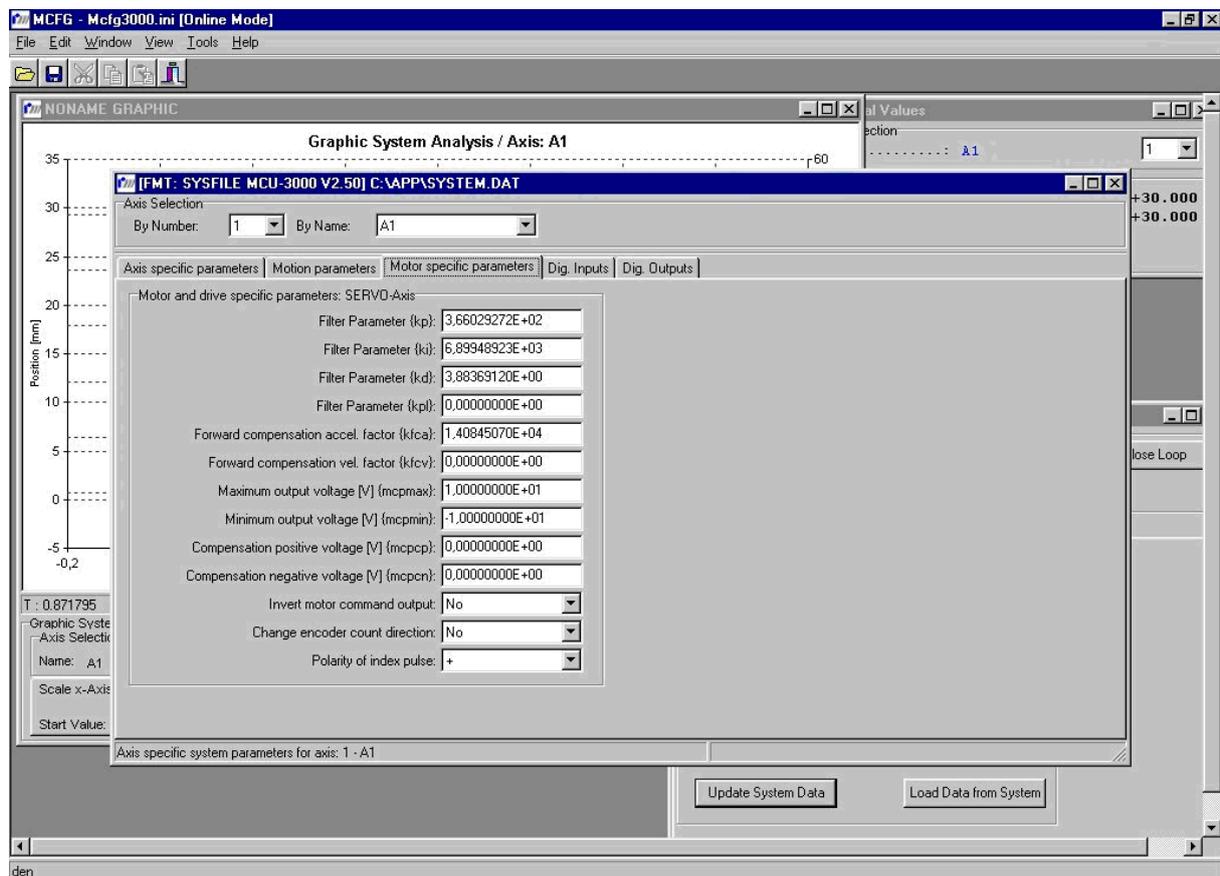


Bild 10: Fenster „System Data“

Auf der Registerkarte „Motor specific Parameters“ wurden die Filterparameter bei der entsprechenden Achse eingetragen. Durch Speichern dieser Systemdaten (z.B. durch Klick auf die Schaltfläche „Save“) bei gebootetem System erscheint folgende Maske:



### Bild 11: Warnung beim Speichern

Nach Klick auf OK werden die Filterparameter in der Datei SYSTEM.DAT gespeichert und stehen beim nächsten Systemstart mit dieser Systemdatei automatisch zur Verfügung.

## **Änderung der Abtastzeit**

Falls die Abtastzeit eines Systems geändert werden soll, hat dies Einfluss auf den Beschleunigungsvorsteuerkoeffizienten  $k_{fca}$ . Falls dieser nicht neu experimentell ermittelt werden soll, kann er auch berechnet werden.

Der Wert von  $k_{fca}$  ist im quadratischen Verhältnis zu verkleinern, wie die Abtastzeit erhöht wird, bzw. ist im quadratischen Verhältnis zu erhöhen, wie die Abtastzeit vermindert wird. Wird zum Beispiel die Abtastzeit halbiert, so ist  $k_{fca}$  zu vervierfachen.

Der Geschwindigkeitsvorsteuerkoeffizient ist gegebenenfalls auch anzupassen, allerdings mit dem einfachen Verhältnis, nicht mit dem Quadrat. Die anderen Filterparameter können im Allgemeinen erhalten bleiben.

Des Weiteren ist zu beachten, dass durch Vermindern der Abtastzeit die berechneten Stellgrößen für den D-Anteil proportional ansteigen. Hierdurch kann leicht eine Übersteuerung des Stellgrößenausgangs erfolgen, welche sich als Nichtlinearität im Regelkreis und somit in einer Verschlechterung des Regelverhaltens auswirkt (Pfeifen, Überschwingen, verschlechtertes Einschwingverhalten bis zur Schwingneigung). Dieser Effekt kann kompensiert werden durch eine reale Verzögerungszeitkonstante des D-Anteils, welche als positiver Wert in  $k_{pl}$  eingetragen werden muss. Die Einheit dieses Werts ist Sekunden. Realistische Werte liegen im Bereich von  $T_A$  bis zu einigen Vielfachen von  $T_A$  ( $T_A$  = gewählte Abtastzeit in Sekunden).