

Virtuelle und reale Instrumente zur Regelung eines 150-MVA-Stoßstromgenerators

Frank Schneider, Ernst Grois, Heinrich Czich, Günter Wenzel
Max-Planck-Institut für Plasmaphysik Garching, EURATOM Association

Einleitung

Für die Erforschung einer möglichen Energiequelle durch Kernfusion werden am MPI für Plasmaphysik in Garching [1] sehr starke, großvolumige Magnetfelder benötigt. Der Stellarator W7AS und der Tokamak ASDEX benötigen dafür so hohe Leistungen, daß diese nicht mehr dem öffentlichen Netz entnommen werden können. Als Energiepuffer für einen gepulsten Betrieb wurde deshalb von der Firma Siemens (ATD IS6) [2] ein 150MVA / 1400MJ Schwungrad-generator ("EZ2") bereitgestellt und mit SIMADYN_D-Regelung, SIMATIC_S7-Steuerung und WinCC-Ereignisprotokollierung ausgestattet.

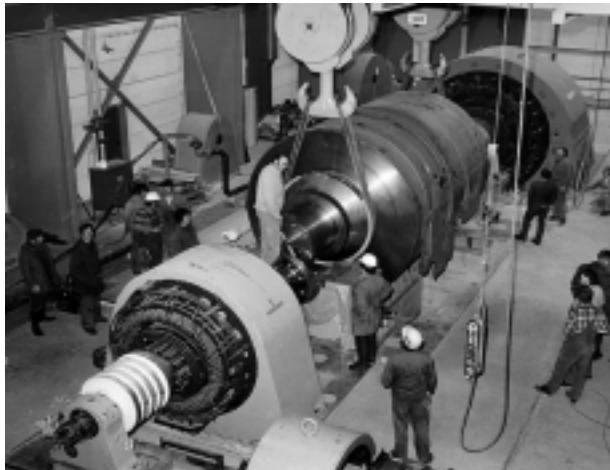


Fig.1 Montage des 240 t EZ2-Schwungrades

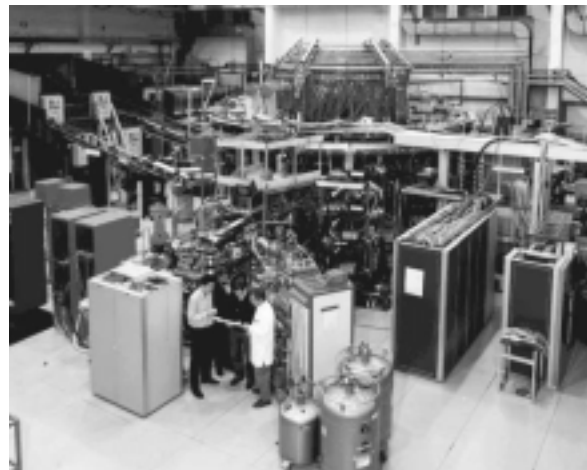


Fig.2 Datenerfassung am W7AS-Stellarator

Die für die Plasmaforschung an W7AS erforderliche Genauigkeit, Regelgeschwindigkeit und Modularität waren jedoch mit den industriellen Digitalreglern bei 12bit Auflösung nicht voll zu befriedigen. Auch waren Interferenzprobleme (Aliasing) zwischen der 12-pulsigen Thyristor Zündfrequenz (600Hz) und dem Takt des Regelungsprozessors bei variierender Generatorzahl (1200...1600 U/Min) nur schwer zu unterdrücken.

Zur Analyse der Probleme und zur Optimierung der Regelung wurden deshalb virtuelle Instrumente hoher Komplexität aus LabView bzw. BridgeView (Fa. National Instruments) eingesetzt und ein Hybrid-Reglersystem entwickelt, welches die Vorteile von digitalen, analogen und synchronen Reglern optimal miteinander verbindet.

Nicht nur die Interferenzprobleme konnten auf diese Weise gelöst werden, sondern auch die Regelstabilität wesentlich erhöht sowie die Genauigkeit auf >14bit verbessert und insbesondere die Stetigkeit einer flachen Rampe bis über 18bit gesteigert werden.

Um die genaue Ablaufsteuerung, als auch die schnelle Datenerfassung von verschiedenen Orten aus bedienen zu können, wurde die Energiezentrale EZ2 nicht nur mit H1/ISO-Protokoll, sondern auch mit TCP/IP in das W7AS Datennetz eingebunden. Dadurch steht für alle Applikationen auch der Weg über das Internet zur Verfügung.

Die Sicherheit der gesamten Experimentier Anlage wird aber unabhängig davon, übergeordnet durch hart verdrahtete Elektronik gewährleistet.

Vorbemerkung

Als Anfang der 90er Jahre im Trend der Digitalisierung auch die letzten Analog-PID-Regler aus dem Angebot der Automatisierungsindustrie genommen waren, wurde oftmals nicht beachtet, daß die Digital-Regler neben vielen Vorteilen auch gravierende Nachteile haben.

Jede Digitalisierung verschlechtert einen Regelkreis nicht nur durch die Totzeiten der Datenaufnahme und der Rechenoperationen, sondern auch durch die Digitalisierungsstufen, die bei Feinregelungen sehr störend in Erscheinung treten können.

Verglichen mit dem einfachen klassischen analogen PID-Regler ist ein Digitalregler immer nur ein Kompromiß, wenn es um Stetigkeit, Geschwindigkeit, Auflösung und robuste Regelstabilität geht. Auch was die Genauigkeit betrifft, kann heute, mit modernen Analogbausteinen die Ansicht revidiert werden, daß digitale Regler genauer seien als analoge. Folgende Ausführungen mögen dies erläutern.

Begrenzte Auflösung

Während industrielle Regler meist nur 8 oder 12bit Auflösung haben, sind im Forschungsbereich oftmals sogar 16bit nicht ausreichend. Zwar gibt es von National Instruments Steuerungsgeräte in 18bit Technik (z.B: VXI-A0-48XDC) und Meßmodule bis 21bit (z.B. NI-5911), jedoch ist derzeit für Regler 16bit die Obergrenze.

Für einen CD-Plattenspieler mag dies eine gute Auflösung sein, zumindest solange die Musik-Signale einige Prozent des vollen Bereichs aussteuern. Bei sehr leisen Stellen in einer sonst lauten Musik jedoch, ist auch diese Auflösung nicht für jeden Künstler befriedigend, und viele Plattenspieler machen deshalb wenigstens eine Interpolation bei der Ausgabe auf 18 oder 20bit ("Over-sampling"), was jedoch die Deformation des mit 16bit aufgenommenen Signals nicht behebt.

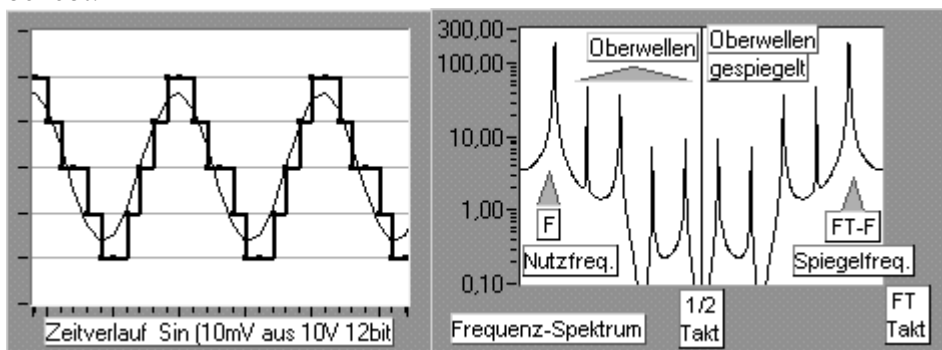


Fig.3 Signalverlauf und Spektrum einer digitalisierten Sinusschwingung (10mV im Bereich +/-10V bei 12bit Auflösung). Die Spiegelfrequenz (FT-F) entsteht durch die Zeitschritte (vergl. Fig.16), während die Oberwellen auf die Amplitudenstufen zurückzuführen sind.

Die Probleme der Stromregelung eines Stellarators sind ähnlich wie bei der Musik durch die Grenzen der Dynamik und Auflösung in Zeit und Amplitude gegeben. Oberwellen, wie sie bei der Digitalisierung kleiner Signale auftreten (siehe Fig.3), verfälschen bei der Musik lediglich den Charakter eines Tones durch Oktaven, Quinten, Terzen usw, nicht aber die eigentliche Information. In der Regelungstechnik jedoch können diese Oberwellen unerwünschte Effekte bis hin zu Instabilitäten auslösen.

Kleine Signale neben großen Störungen

Das Plasma im Stellarator W7AS verdrängt etwa nur 1% bis 4% von dem Magnetfeld, in dem es sich befindet, und das sind bei W7AS etwa 30% des magnetischen Flusses, der durch den EZ2 Laststrom erzeugt wird. Dieser kleine diamagnetische Effekt ist ein Maß für die Energie im Plasma und muß möglichst genau gemessen werden. Will man nun ein Plasma mittlerer Energie ($\beta=2\%$ d.h. 50% Aussteuerung), welches etwa 30% des Magnetfeldvolumens ausfüllt, auf 1%

genau messen, so entspricht das ($1\% * 2\% * 50\% * 30\% = 30\text{ppm}$) oder, bezogen auf den Spulenstrom, von 30kA etwa 1A.

Ein Regler mit 12 bit Auflösung kann die 30kA des Spulenstromes aber nur in Stufen von 8A (=30000/4096) auflösen. Es wären somit weitere 3bit oder praktisch ein 16bit Regler erforderlich.

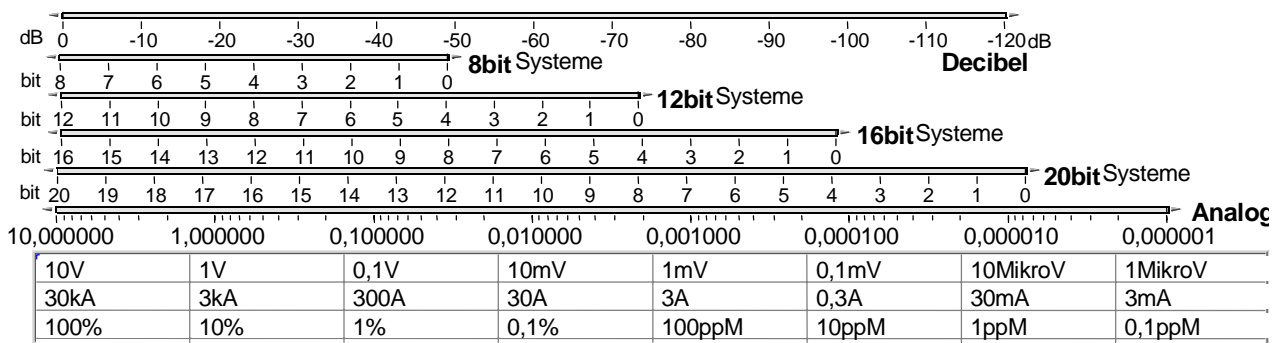


Fig.4 Gegenüberstellung von logarithmischen und binären Maßen bei verschiedener Auflösung

Da die Stabilität eines Plasmas in einem Stellarator sehr empfindlich von den Magnetfeldverhältnissen abhängt, wurden zur Erforschung dieser Resonanzeffekte die Magnetfelder (d.h. die Ströme) in Form flacher Rampen gesteuert. Da aber bei der Steuerung mit einem digitalen Funktionsgenerator oder digitalen Regler die Digitalisierungsstufen immer an derselben Stelle reproduzierbar auftreten, ist es schwer, diese von wirklichen Plasmaeffekten zu unterscheiden.

Noch höher werden die Anforderungen an die Auflösung, wenn man daran denkt, den Regelkreis z.B. mit Bode-, Nyquist- oder Nichols-Diagrammen [3] meßtechnisch im Frequenzbereich zu analysieren und zu optimieren. Da bei EZ2 eine große Störung durch eine Sprungfunktion für die Untersuchung im Zeitbereich nicht zulässig ist, und wegen der Übersteuerung des Stellers und den Nichtlinearitäten der Strecke verfälscht würde (siehe Fig.6&7), bleibt nur die Möglichkeit, mit kleinen Signalen im Frequenzbereich die Untersuchung mittels Bode-Diagramm (siehe z.B. Fig.13) durchzuführen. Im oberen Frequenzbereich fallen aber die Amplituden stark mit der Frequenz ab (Tabelle Fig5), so daß dort mit digitalen Systemen die Meßmöglichkeiten sehr eingeschränkt sind.

Tangente nach 1.Verzögerung	nach 2.Verzögerung	nach 3. Verzögerung
6dB / Oktave	12dB / Oktave	18dB / Oktave
= 1bit / Oktave	= 2bit / Oktave	= 3bit / Oktave
= 1Dekade / Dekade	= 2 Dekaden / Dekade	= 3 Dekaden / Dekade
= 3,3bit / Dekade - ! -	= 6,6bit / Dekade - ! - ! -	= 10bit / Dekade - ! - ! - !

Fig.5 Amplitudengang in Abhängigkeit von der Frequenz (Tangenten im Bode-Diagramm). Oberhalb der dritten Eckfrequenz verliert ein Signal je Dekade 10bit an Auflösung.

Moderne Analogregler

Wegen der begrenzten Auflösung der Digital-Regler in Zeit und Amplitude wurden unter Verwendung moderner Analogbausteine "taktlose" PID-Regler ohne Digitalisierung entwickelt, die eine Bandbreite von 10kHz und eine Genauigkeit von 0,1mV aus 10V haben. Das entspricht etwa einem Digital-Regler mit einem Takt >50kHz bzw. 20Mikrosekunden und 16bit Genauigkeit. Der Analogregler hat aber darüber hinaus eine unbegrenzte Auflösung, was bezüglich Aliasing und Stetigkeit einen enormen Vorteil darstellt.

Zur Messung des Magnetfeldes im W7AS-Stellarator, welches proportional zum Laststrom des EZ2-Generators ist, wurden Integratoren entwickelt und für Meßzwecke eingesetzt, die eine Offsetgenauigkeit von 0,1Mikrovolt haben und damit nochmals um 3 Größenordnungen genauer

sind. Das bedeutet daß I-Regler sogar mit einer Genauigkeit von 0,01ppM bzw. 8digit oder 26bit prinzipiell realisierbar sind.

Schwierigkeitsgrad der EZ2-Strecke

Der EZ2-Generator weist 3 dominante Verzögerungen auf (1. Lastspannung-->Laststrom: $T_g=L_s/R_s\approx 1,7s$, 2. Erregerspannung-->Erregerstrom: $T_2=L_e/R_e\approx 1s$, 3. Erregerstrom-->Generatorfeld: T_3 =Wirbelstromzeitkonstante des Eisens $\sim 0,2s$) (vergl.Fig.8). Der Schwierigkeitsgrad dieser Strecke ist extrem hoch, da die Zeitkonstanten sehr nahe beieinanderliegen.

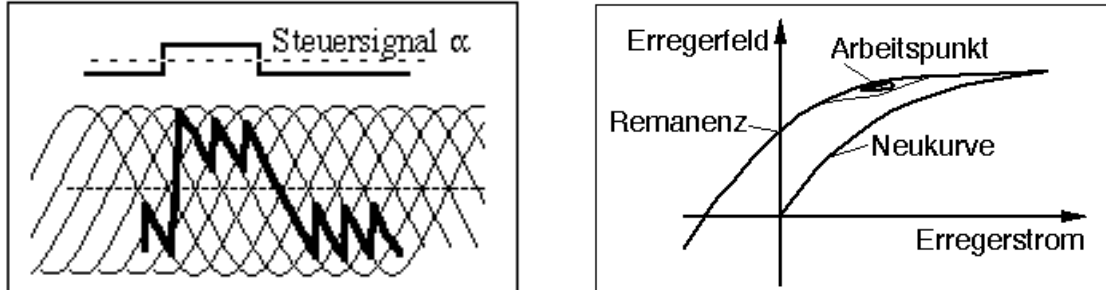


Fig.6 & 7 Nichtlinearitäten des Netzgeführten Stromrichters und Hysterese des Eisens

Die Übertragungsfunktion der Strecke hängt außerdem durch die Sättigung bzw. die Hysterese im Eisen stark von der Amplitude des Erregerfeldes ab (Fig.7). Für jeden Arbeitspunkt und jede Richtungsänderung müßte eine andere Reglereinstellung gefunden werden, wenn es nicht gelingt, einen sehr robusten Regler mit hoher Kreisverstärkung (K_p) bzw. kurzer Nachstellzeit (T_N) anzupassen.

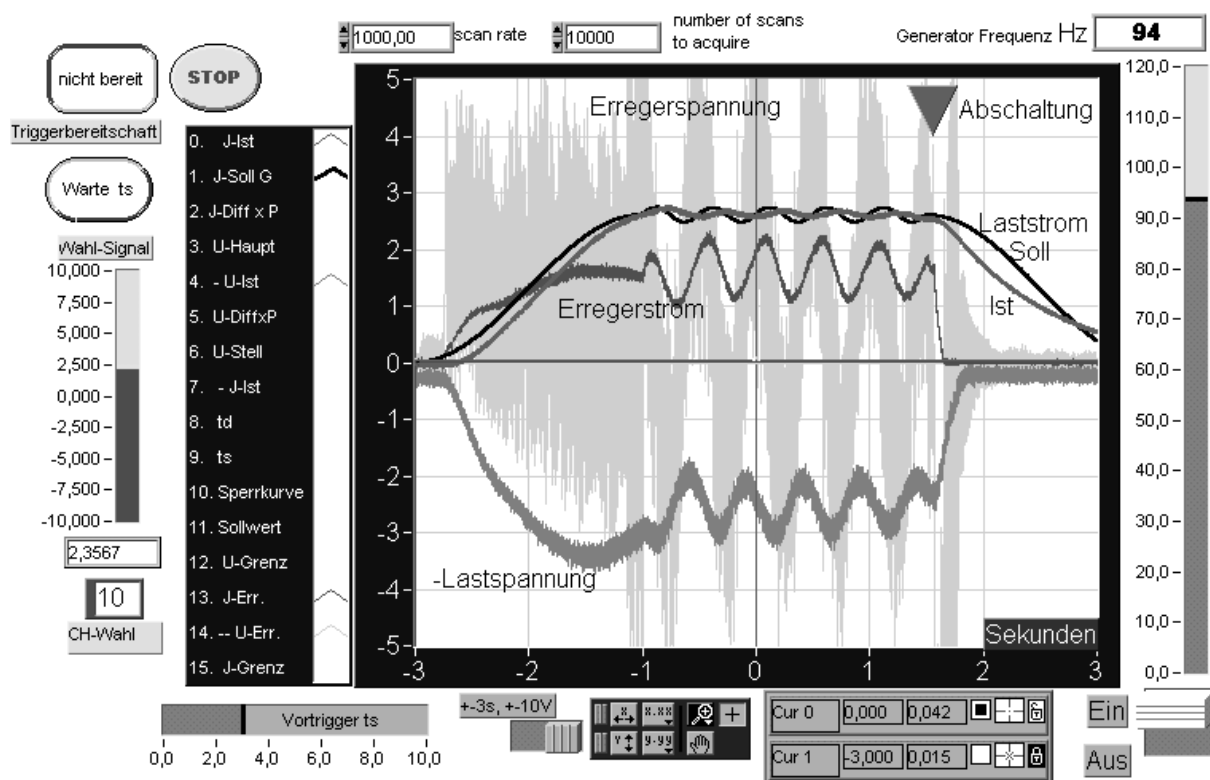


Fig.8 Maximale Modulation des EZ2-Generators mit W7AS als Last bei 2Hz

In Fig.8 sind die gemessenen Spannungen und Ströme des EZ2-Generators dargestellt. Dem Strompuls von insgesamt 6 Sekunden Dauer wurde im Flat-top ($\sim 2s$) eine Frequenz von 2Hz mit einer Amplitude von $\sim 2\%$ des Maximalbereichs als Führungsgröße geregelt überlagert. Wie den Meßkurven entnommen werden kann, ist bereits schon mit dieser einen, moderaten Modulationsfrequenz der Thyristor-Steller für die Erregerspannung fast voll angesteuert.

Anders ausgedrückt: Es wäre selbst bei voller Aussteuerung der Erregerspannung bei 2Hz eine Laststrommodulation nur bis 2% erzielbar. Bei einer Frequenz von 20Hz wären es noch einmal fast 3 Dekaden weniger (vergl. Fig.5) d.h. 20ppM, die selbst von einem 16bit Digital-Regler nicht mehr richtig verarbeitet werden könnten.

Eine Messung, wie sie in Fig.8 dargestellt ist, kostet etwa 200EUR lediglich für die elektrische Energie um das EZ2-Schwungrad auf Drehzahl zu bringen. Es wäre deshalb kaum finanzierbar, und zeitlich viel zu aufwendig, den Frequenzgang im Bodediagramm auf diese Weise Punkt für Punkt aufzunehmen.

Ein eleganterer Weg wäre es, dem Regelkreis am Eingang ein weißes Rauschen einzugeben und die Übertragungsfunktion am Ausgang mittels komplexer Fouriertransformation zu bestimmen. In den Programmen LabView und BridgeView sind für diesen Zweck virtuelle Instrumente vorgesehen, die so aufeinander abgestimmt sind, daß sie auf optimale Weise die Transferfunktion berechnen können.

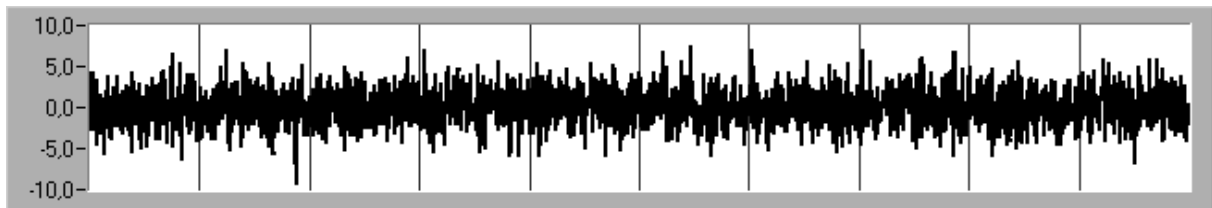


Fig.9 Bei "Periodic Random Noise" als "weißes Rauschen" entfallen bei 1024 samples auf jede der 1024 Frequenzen Amplituden von nur 0,01V.

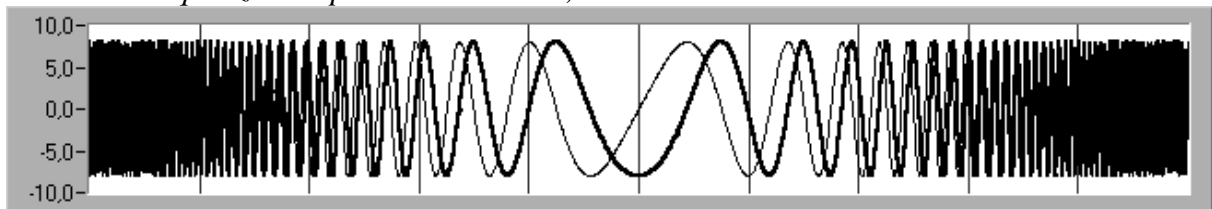


Fig.10 "Logarithmische Wobbelung" (Sinus und Cosinus) zur Ansteuerung des Lock-In Vektorvoltmeters für Real- und Imaginärteil. Hier stehen für kurze Zeit für jede Frequenz volle 10V zur Verfügung.

Es muß dabei aber bedacht werden, daß bei weißem Rauschen und auch bei dem virtuellen Instrument "Periodic Random Noise" (Fig.9) auf jede Spektrallinie nur sehr kleine Amplituden entfallen, die jeweils am Ausgang der Strecke sehr schnell unter die Auflösungsgrenze des Datenerfassungssystems fallen. Wie mit Fig.3 deutlich gemacht wurde, entstehen dann an den Digitalisierungsstufen Oberwellen. Die Fouriertransformation kann aber nicht eindeutig unterscheiden, ob die gemessenen Frequenzanteile von der stimulierenden Frequenz oder von den Oberwellen tieferer Frequenzen herrühren.

Lock-In Vektorvoltmeter

Mittels synchroner Meßverstärker (Lock-In-Verstärker) können auch noch Signale gemessen werden, die um Größenordnungen kleinere Amplitude haben als das Rauschen, dem sie überlagert sind. Bei geschalteten Stellern, wie z.B. bei den netzgeführten EZ2-Stromrichtern (Fig.6) für die Erregerspannung (Fig.8 hellgrau), oder bei Hüllkurven-Gleichrichtung (Fig.14b), wie bei der EZ2-Lastspannung. (Fig.8 mittelgrau), handelt es sich um "massives Rauschen", aus dem im Zeitbereich ein kleines Modulationssignal nicht mehr zu erkennen ist.

Aus diesem Grund wurden spezielle Lock-In-Verstärker entwickelt und patentiert, die winzige korrelierende Effekte aus großen Signalen mit optimaler Geschwindigkeit herauslösen können. Verwendet man davon zwei und steuert sie um 90Grad phasenverschoben an, so erhält man Real- und Imaginärteil für die Transfer-Funktion im Nyquist-Diagramm (Fig.11 unten) oder umgerechnet, Amplitude und Phase im Bode-Diagramm (Fig.13).

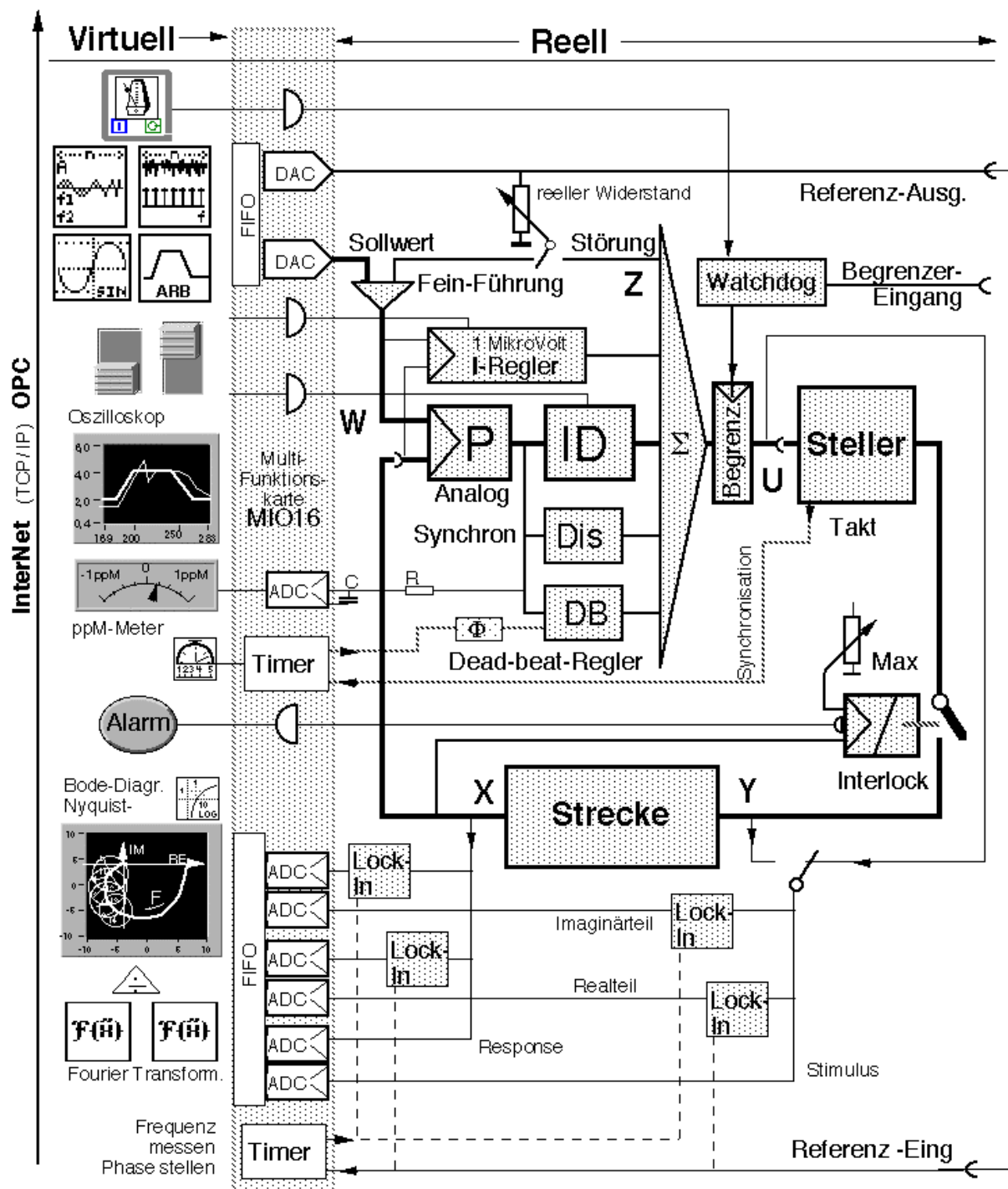


Fig.11 Übersicht über die Funktionalität des Hybrid-Regler Systems "AnaSync".

Die Sollkurvenvorgabe im Betriebsmodus wird über zwei digitale 16bit DAC's des MIO16XE10-Multifunktionsboards ausgegeben. Ein Ausgang steuert den Sockel, während der zweite, ohmisch auf 1% geteilt, die Feinheiten übernimmt, so daß in der Summe mit einer Auflösung von <math>< 1\text{ppm}</math> bzw. 20bit gesteuert werden kann.

Die Vielzahl von Begrenzungen und Interlocks, die bei EZ2 und W7AS mit SIMADYN_C und "AnaLock" Bausteinen ausgeführt wurden, sind hier jeweils nur für ein Signal angedeutet. Eine Watchdog kann die Überwachung der virtuellen Instrumente übernehmen, um den Prozeß gegebenenfalls über den Begrenzungsregler kontrolliert in den sicheren Zustand zu führen.

Die bis 50kHz Synchronfrequenz einsetzbaren Lock-In Vektorvoltmeter (Fig.11 unten bzw. Fig12 Mitte) sind in Analogtechnik realisiert und haben deshalb selbst keine Grenze in der Auflösung. Durch längere Meßzeit und nachgeschaltetem digitalen Tiefpaßfilter (vi) kann das noch

verbleibende Rauschen weiter unterdrückt werden. Die Verzerrung, die bei steiler Wobbelung auftritt, wird zwischen Hochlauf und Rücklauf mit einem LabView Programm ausgemittelt. Eine spezielle Wobbelkurve (Fig.10), deren Frequenz zur Zeitachse einen logarithmischen Zusammenhang hat und die keinen Phasensprung am Umkehrpunkt aufweist, ergibt eine gute Messung für Bode-Diagramme auch dann, wenn Digitale Regler oder geschaltete Steller und andere Oberwellen erzeugende, nichtlineare Elemente sich im Regelkreis befinden.

Bei EZ2 ist die Regelung in zwei Kaskaden aufgeteilt. Während die äußere Schleife den Strom in der Last regelt, sorgt die innere Spannungs-Regelschleife für die Linearisierung der Hystereseffekte und die Beschleunigung der Erregung.

Modulare Elektronik

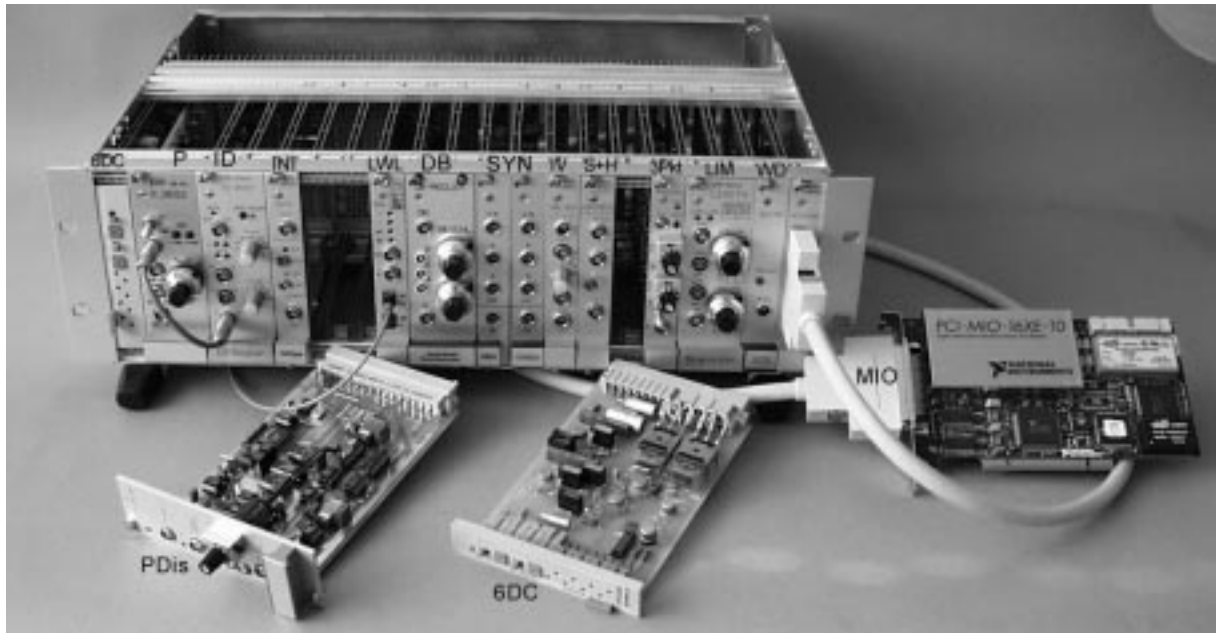


Fig.12 Modulares Hybrid-Regler-Optimierungssystem "AnaSync", zusammengestellt aus Analog PID-Regler {P&ID}, Synchron PD-Regler {PDis}, I-Regler(1MikroV) {INT}, Dead-beat-Regler {DB}, zweifach Lock-In-Vektorvoltmeter{SYN}, Instrumentenverstärker {IV} und Synchron-Gleichrichter {S+H}.

Ferner sind folgende Sicherheits-Module hinzugefügt SIMADYN_C-Begrenzungsschalter {6DC}, "FM-Lichtleiter Modul {LWL} und "fail-safe"-Schaltregler {3Pkt}.

Der Anschluß an den PC oder Mac erfolgt über das Multifunktionsboard {MIO}.

Eine Watchdog {WD} sorgt bei Ausfall des PCs über den Begrenzungsregler {LIM} für eine kontrollierte Steuerung des Prozesses in einen sicheren Zustand.

Alle Module sind auch eigenständig funktionsfähig und untereinander verdrahtbar.

In dem 19Zoll Rahmen (Fig.12) sind bis zu 16 Europakarten-Module in beliebiger Kombination an die 16 Analog-Eingänge, 2 Analog-Ausgänge, 2 Timer und 8 Binärsignale eines MIO16 Multifunktionsboards, ähnlich wie SCXI-Geräte, standardisiert anschließbar.

Damit stehen praktisch alle virtuellen Instrumente verschiedener Plattformen (PCI, PXI, VXI von PC, Mac oder Sun) direkt zur Verfügung. Programme in LabView bzw. BridgeView gestatten z.B. die Steuerung von Sollwertkurven mit "haversine" Rampen und beliebigen Modulationen. (vergl. Laststrom-Sollwert Fig.8)

Spezielle Programme dienen der Ermittlung einer optimalen Einstellung von Regelkreisen mit analogen, synchronen und digitalen Reglern (z.B. auch SIMADYN_D oder LabView_RT).

Strecken mit linearen und nichtlinearen Verzögerungen höherer Ordnung und geschaltete Steller wie netzgeführte Stromrichter oder IGBT's werden dabei individuell berücksichtigt und durch den Lock-In-Vektorvoltmeter richtig gemessen.

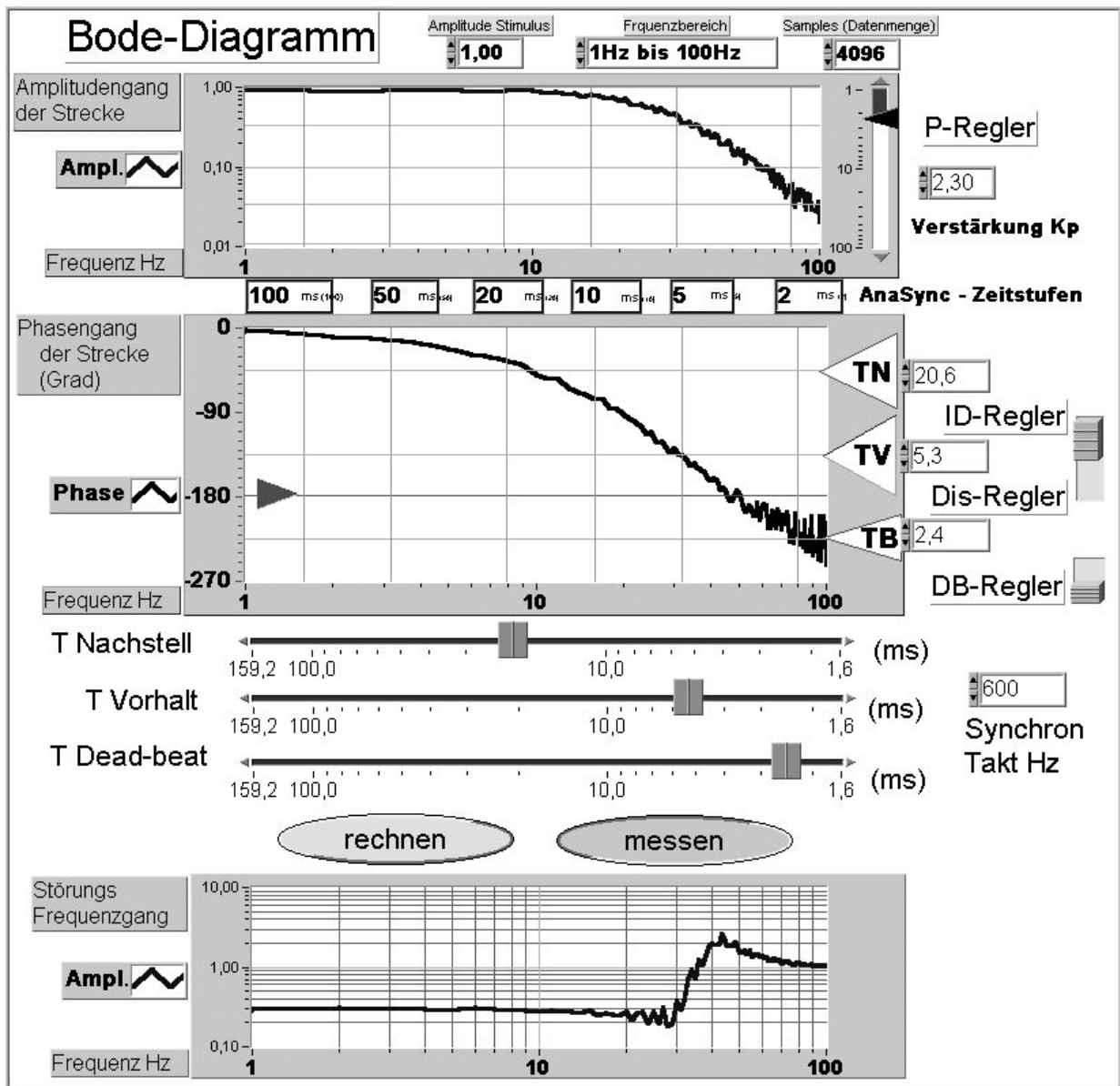


Fig.13 LabView-Programm zur halbautomatischen Einstellung der optimalen Reglerkoeffizienten Vorhaltzeit (TV), Nachstellzeit (TN), Deadbeatzeit (TB) und Regelverstärkung (Kp). Als Stabilitätskriterium kann die Überhöhung des Störungs-Frequenzganges dienen (Faktor 2 entspricht optimal flachem Führungs-Frequenzgang).

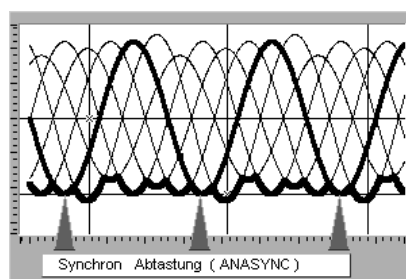


Fig.14a&b Reflex-Lichtschranke an EZ2 zur Synchronisation des Dead-beat-Reglers mit der Generator-Drehzahl (1200...1600U/Min = 20...26Hz)

Synchron Abtastung

Nicht alle Erreger-Teilwicklungen und deren Eisenhysterese sind genau gleich. Dadurch ergibt sich eine niederfrequente Störgröße (Hüllkurve Fig.14b). Durch Synchron-Abtastung einer Phase wurde deshalb eine Meßgröße gebildet, bei der die Ungleichmäßigkeiten der Hüllkurve auch ohne

niederfrequentes Glättungs-Filter entfallen. Hiermit kann sogar im Rahmen des Stellbereichs mit Hilfe eines Dead-beat-Reglers dieser Störung entgegen gewirkt werden.

Ein weiterer Vorteil der Synchron-Abtastung (Fig.14a&b) ist es, daß im Gegensatz zum gleichgerichteten Hüllkurven-Signal, ein vorzeichenrichtiges Maß für das Erregerfeld entsteht. Dadurch kann mit Hilfe eines Vier-Quadranten-Stromrichters die Remanenz (Fig.7) und damit auch die Lastspannung problemlos auf Null geregelt werden, was mit keinem anderen Meßsignal nach der Gleichrichtung möglich wäre.

Stabilitätsgrenze digitaler Regler

Betrachtet man die Stromregelung in einer Spule (Fig.15a) mit einem schnellen Verstärker als Steller, so kann mit einem analogen P-Regler praktisch jede beliebige Regelgeschwindigkeit und Regelgenauigkeit durch die Höhe der Verstärkung (K_p) erzielt werden. Die Stabilität ist dabei in extrem weitem Bereich nicht gefährdet, was das Nyquist Diagramm (Fig.15b) für diese Strecke mit Verzögerung 1.Ordnung bestätigt.

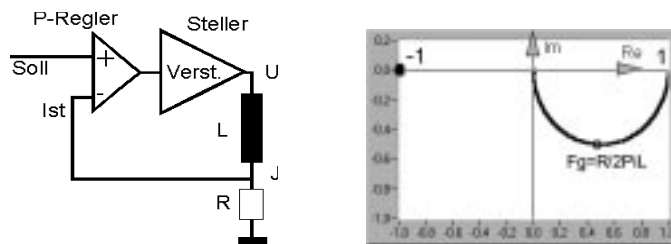


Fig.15a&b Spulenstromregelkreis und Nyquist-Diagramm bei Verwendung eines Analog-P-Reglers

Würde man anstelle des analogen einen digitalen P-Regler mit dem Rechenzyklus und der Abtastzeit T einsetzen, so ist nicht nur der Frequenzgang des Abtastgliedes (d.h. Digitalisierung) $H(f) = (1 - \exp(-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot T)) / (j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot T)$ zu berücksichtigen (Fig.17a, dicke Kurve), sondern auch die Nyquistfrequenz $F_n = 1/2 \cdot T$, welche definiert ist durch die Überlagerung der Nutzfrequenz F mit der Spiegelfrequenz $F_T - F$ (Fig.16d).

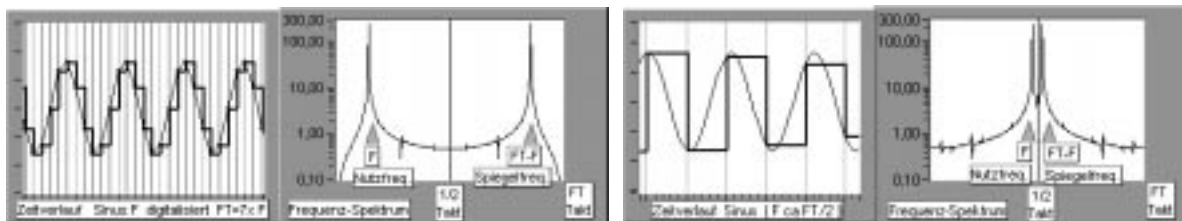


Fig.16a,b,c,d Durch die Zeitschritte der Digitalisierung einer Sinusschwingung entsteht die Spiegelfrequenz $F_T - F$, ($F_T = 1/T$). Wenn $F = 1/2T$ ist fällt die Nutzfrequenz mit der Spiegelfrequenz zusammen und es entsteht die Nyquistfrequenz

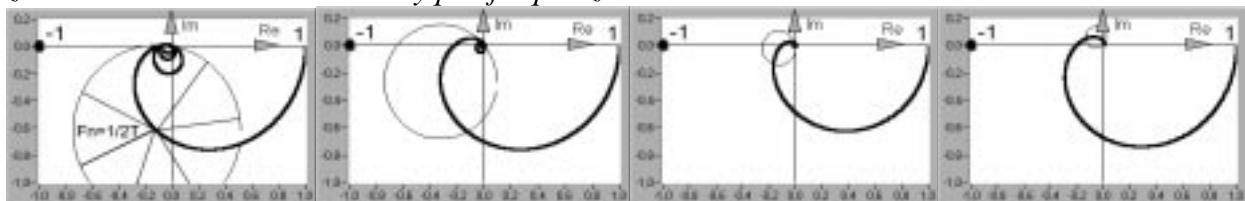


Fig.17a,b,c,d Nyquistdiagramme mit Nyquistfrequenz eines Abtastgliedes im Kreis mit verschiedenen Verzögerungen (a: ohne $T_g = L/R$, b: $T_g < T$, c: $T_g = 2T$ d: mit Anti-Alias-Filter)

Da die Phasenlage der Spiegelfrequenz nicht definiert ist und die Amplitude der Spiegelfrequenz gleich der Amplitude der Nutzfrequenz ist, ergibt die Ortskurve aller Vektorsummen einen Kreis im Nyquist Diagramm (Fig.17a,b,c,d). Auch dieser Kreis darf ebenso wie die Frequenzgangkurve den singulären Punkt -1 nicht umschließen, wenn der Regelkreis stabil sein soll.

Um die Überlagerung von Spiegelfrequenzen zu vermeiden, schreibt das Abtasttheorem vor, alle Frequenzen oberhalb und gleich der Nyquistfrequenz $FN=1/2T$ durch ein Anti-alias-Filter zu unterdrücken. Das ist theoretisch leicht gesagt, aber praktisch nur durch reelle Analog-Filter zu realisieren. Diese haben aber auch zwangsläufig eine negative Phasendrehung und keine scharfe Frequenzbegrenzung.

Das bedeutet, daß die Nyquistfrequenz weder vollständig unterdrückt, noch die Stabilität des Regelkreises dadurch verbessert werden kann. Der Regelkreis würde dann lediglich nicht mehr bei der Nyquistfrequenz, sondern bereits bei einer tieferen Frequenz zur Selbsterregung neigen (Fig.17d). Durch das Anti-alias-Filter wird die Regelstrecke erster Ordnung zu einer Strecke zweiter Ordnung, die nur durch einen differenzierenden Regler (PD) optimiert werden könnte, aber dieser würde wiederum die Nyquistfrequenz anheben und damit das Problem der digitalen Regler erneut hervorheben.

Synchronisierte Regler

Um einen Regelkreis trotz zeitdiskreter Elemente wie netzgeführte Stromrichter oder IGBT's möglichst schnell und trotzdem optimal robust regeln zu können, wurden synchronisierbare Analog-Regler mit Dead-beat Eigenschaften entwickelt und patentiert. [4]

Werden diese mit der Rechenzyklusfrequenz eines digitalen Reglers synchronisiert und mit einer Phasenverschiebung versehen, so kann die Phase der Spiegelfrequenz im Nyquistkreis (Fig.17) beeinflußt und dadurch regelungstechnisch beherrscht und weitgehend unschädlich gemacht werden. Die Nyquistfrequenz muß dann nicht mehr durch starke, verzögernde Anti-alias Filter unterdrückt werden. Dadurch wird eine höhere Regelungsbandbreite und höhere Stabilität ermöglicht.

Bei einem Betrieb mit netzgeführten Stromrichtern, wie bei EZ2, treten zusätzlich zur Nyquistfrequenz $1/T$ des Thyristortaktes noch weitere subharmonische Frequenzen auf ($1/3T$, $1/4T$ usw.) die regelungstechnisch im Nyquistdiagramm ähnlich wie die Nyquistfrequenz zu behandeln sind. [5]

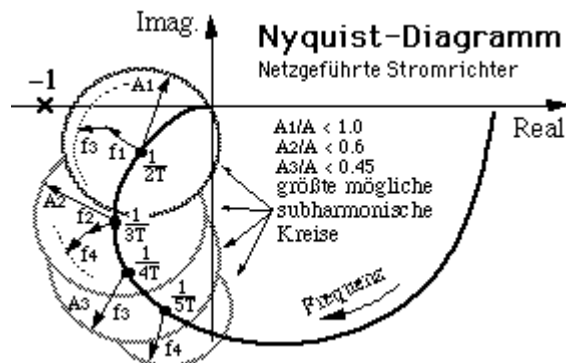


Fig.18 Bei Netzgeführten Stromrichtern müssen subharmonische Frequenzen bis herab zur Netzfrequenz beachtet werden

Interferenzen

Die Taktfrequenz des 12-pulsigen netzgeführten EZ2-Stromrichter ($FTs=600\text{Hz}$) und die Taktfrequenz von modernen Digitalreglern (SIMADYN_D oder LabView_RT) ($Tr \sim 1$ bis 2ms bzw. $FTr=500..1000\text{Hz}$) liegen so hoch, daß sich bei der EZ2-Strecke 3.Ordnung mit Zeitkonstanten von $1,7\text{s}$, $1,0\text{s}$ und $0,2\text{s}$ eigentlich kein Problem mit subharmonischen Frequenzen ergeben sollte.

Jedes dieser zeitdiskreten Elemente alleine wäre auch kein Problem, aber durch die Kombination aus Digitalregler und netzgeführtem Stromrichter mischen sich die Taktfrequenzen FTs und FTr sowie die Spiegelfrequenzen und die subharmonischen Frequenzen untereinander. Dadurch entstehen auch niederfrequente Interferenzfrequenzen, welche in den Nutzbereich fallen können.

Diese niederfrequenten Interferenzen können nicht durch ein Anti-alias-Filter beseitigt werden, weil die Zündung der Stromrichter ja direkt durch den Digital-Regler erfolgt.

Bei EZ2 bildete sich unglücklicherweise eine Frequenz von etwa 1Hz , welche zunächst die Forschungsarbeiten an W7AS störten. Die Firma Siemens hat daraufhin den Standard

SIMADYN_D-Regler gegen einen wesentlich schnelleren DSP-Regler $F_{Tr}=5\text{kHz}$ ($T_r=200\text{Mikrosekunden}$) ausgewechselt, so daß die meisten dominanten Mischfrequenzen in den Bereich oberhalb der Nutzfrequenzen fallen, wo sie nicht mehr stören können.

Um der Problematik dieser Interferenzen ganz aus dem Wege zu gehen, wurde am MPI für Plasmaphysik in Garching in enger Zusammenarbeit mit der Technischen Universität München, Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik, Prof. Dr.-Ing. G. Schmidt, zeitdiskrete Analog-Regler entwickelt, die innerhalb 1 Mikrosekunde auf jede einzelne der variierenden Zündflanken eines netzgeführten Stromrichters oder IGBTs synchronisiert werden können. (siehe [4] [5])

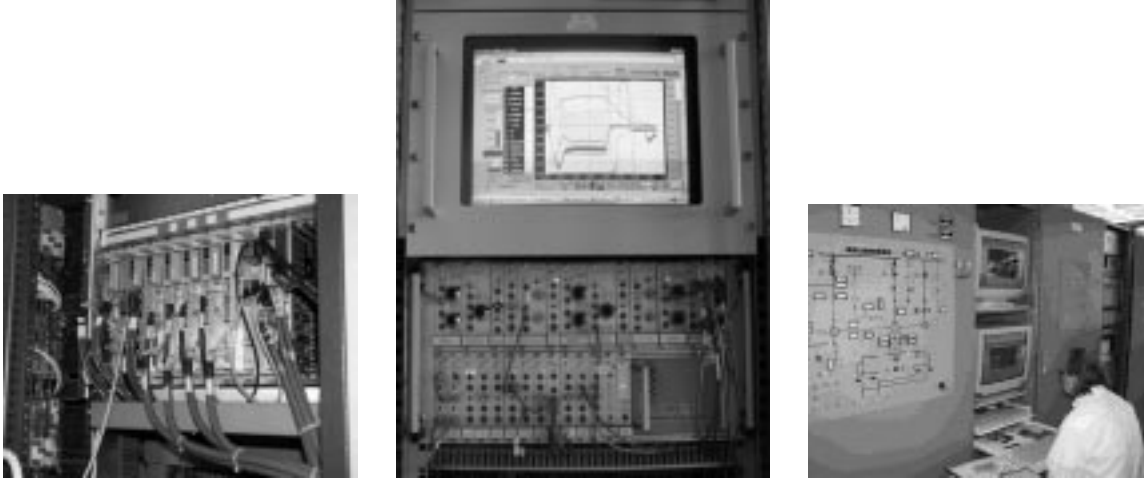


Fig.19a,b,c SIMADYN-D-Regler, AnaSync-Regler mit LabView und Schalttafeln an EZ2 mit SIMATIC-Steuerung, WinCC-Ereignis-Protokollierung und Servern zur Fernsteuerung über H1/ISO oder TCP/IP Protokoll (OPC in Vorbereitung)

Literatur und Websites

- [1] *Max-Planck-Institut für Plasmaphysik* Experimentieranlagen
<http://www.ipp.mpg.de/ipp/bereiche.html>
- [2] *Siemens* Prüfanlagen
http://www.atd.siemens.de/test-facilities/research/qual_01.html
- [3] *Schmidt, G.:* Grundlagen der Regelungstechnik Springer Verlag
 ISBN 3-540-11068-2
- [4] *Schneider, F., Gresser, F., Eixenberger, H:* "Zeitoptimale Regler synchronisiert mit geschalteten Stellern (PDF- Bericht: 7 Seiten)
<http://www.rzg.mpg.de/~fns/>
- [5] *Schneider, F.:* "Optimierte Regelung der Plasmalage in den Tokamaks ASDEX und TCV mit Berücksichtigung der netzgeführten Stromrichtersteller".
 (Dissertation 1990) S.81-93
 Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik
 Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Schmidt Technische Universität München
 auch als Report IPP III/168 erhältlich über Frank Schneider
 Max-Planck-Institut für Plasmaphysik Abt. E3/W7XA D-85748 Garching
 e-mail: Frank.Schneider@ipp.mpg.de