

# Genauere Positions- und Geschwindigkeitsmessung mittels Inkrementaldrehgeber zur Regelung synchroner Servoachsen

Prof. Dr.-Ing. Jochen Abke, Computergestützte Messtechnik  
FH Lübeck, Fachbereich Elektrotechnik und Informatik  
[jochen.abke@fh-luebeck.de](mailto:jochen.abke@fh-luebeck.de)

Dipl.-Ing. Thomas Knauf, ThomasKnauf GmbH  
[thomas@thomasknauf.de](mailto:thomas@thomasknauf.de)

## Zusammenfassung

Diese Arbeit stellt eine FPGA-basierte Auswertung von inkrementellen Drehgebern zur Positions- und Geschwindigkeitsmessung an Servoachsen vor. Sie verzichtet auf eine Quadraturencoder-Auswertung über konstante Messzeiträume und verbessert die Genauigkeit der Geschwindigkeitsbestimmung durch eine flankenbezogene Signalauswertung. Es wird gezeigt, wie das Verfahren innerhalb einer Maschinensteuerung zur Regelung synchroner Servoachsen im Produktionsalltag verwendet wird.

## 1 Einleitung

Unter einer Servoachse wird heute allgemein ein drehzahlvariabler Antrieb verstanden, dessen Zielgröße die Position  $s$  und/oder die Geschwindigkeit  $v$  des zu bewegenden Objektes ist. Bei geringen Anforderungen an Drehmoment, Dynamik und Wirkungsgrad können mit Schrittmotoren einfache und kostengünstige Lösungen realisiert werden. Für alle anderen Positionieraufgaben haben sich geregelte Servoantriebe durchgesetzt. Dabei spielt die Genauigkeit der Sensoren eine entscheidende Rolle, denn letztlich ist ein Positioniersystem nur so gut wie sein Sensor. Die Genauigkeit der Sensorik hat daher einen maßgeblichen Einfluss auf die Qualität der Regelung einer Servoachse.

Zur Messwerterfassung dienen handelsübliche Inkrementaldrehgeber, die mechanisch an die Motorachsen gekoppelt sind. Das Auswerteprinzip für die Position (Lage) vereint Quadraturencoder, Nullpunktreferenzierung und Positionszähler.

Für die Berechnung der Geschwindigkeit aus der Differenz von zwei aufeinanderfolgenden Positionswerten wird im Rahmen dieser Arbeit ein flankenbasiertes Auswerteverfahren vorgestellt. Die Auswerteelektronik für die Messwerterfassung wird in konfigurierbarer Logik

(FPGA) in Hardware parallel ausgeführt, um mehrere Motorachsen absolut gleichzeitig und verzögerungsfrei auszuwerten. Das Verfahren lässt sich theoretisch auf eine beliebige Anzahl an Motorachsen skalieren. Der Zeitpunkt jeder Drehgeberflanke wird mit einer Genauigkeit von 6 ns erfasst. Auf diesem Wege werden auch für die Geschwindigkeit exakte Messwerte bestimmt ( $v=ds/dt$ ).

Durch die Kombination mit einem Mikrocontroller wird der Regelkreis geschlossen und sämtliche Achsen mit hoher Genauigkeit synchronisiert. Das aus anderen Projekten bewährte Regelungsprinzip [5] benötigt keine Bahnkurvenberechnung und passt sich in jedem Regelungszyklus unmittelbar an geänderte Soll-Vorgaben und Ist-Messwerte an.

Die Bedienung und Überwachung des Systems geschieht über eine Benutzeroberfläche auf der Basis der Internet-Standards HTML5 und Javascript. Jeder gewöhnliche Webbrowser kann sich als Client mit dem im Regelungssystem integrierten Webserver verbinden. Über dieselbe Schnittstelle erfolgt auch eine grafische Visualisierung der Motorbewegungen für Diagnosezwecke.

## 2 Struktur zur Regelung synchroner Servoachsen

Die verwendete Grundstruktur zur Regelung synchroner Servoachsen ist in Abbildung 1 beschrieben.

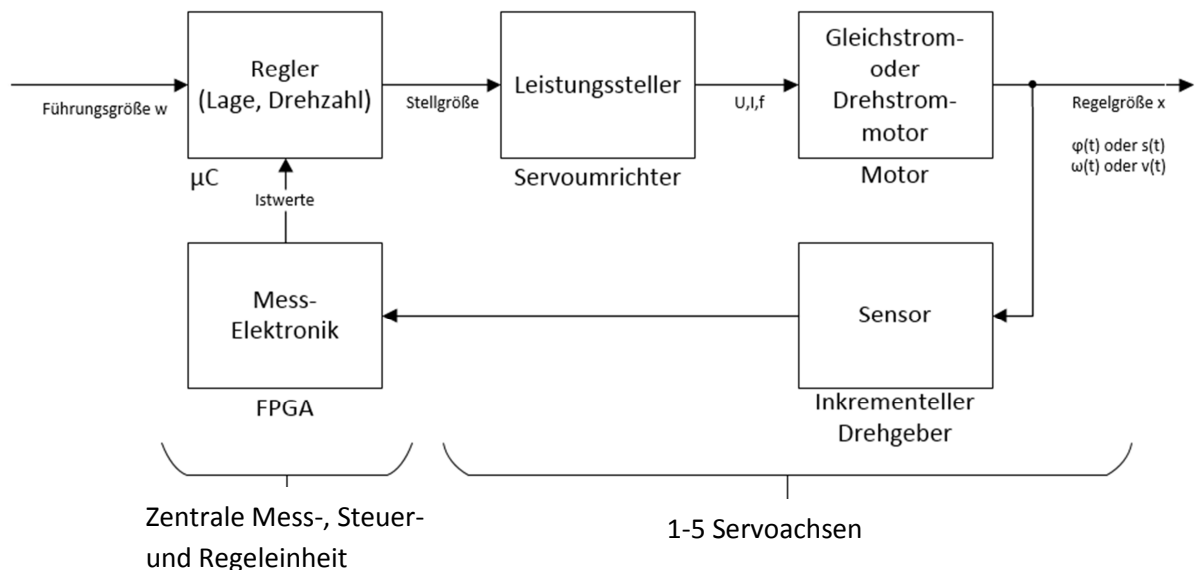


Abbildung 1: Struktur zur Regelung synchroner Servoachsen

Als Servomotoren werden überwiegend Gleichstrom- oder Drehstrommaschinen eingesetzt. Im Rahmen dieser Arbeit werden bürstenlose Synchronmotoren benutzt. Ein Regler berechnet aus der Abweichung der Istwerte von den Sollwerten (Führungsgöße  $w$ ) eine Stellgröße für den Servoverstärker, der durch Pulsbreitenmodulation (PWM) der Zwischenkreisspannung dem Motor den dreiphasigen, in Frequenz und Amplitude steuerbaren Strom einprägt. Moderne Servovrichter enthalten bereits integrierte Regler für übergeordnete Positions- oder Drehzahlregelungen. Die damit realisierbare dezentrale Struktur eignet sich aber schlecht für die Synchronisation mehrerer Achsen, weil die Zeitsysteme der Einzelkomponenten nicht synchron sind.

In Abbildung 1 ist zu erkennen, dass sich in der hier vorgestellten zentralen Struktur der Regler außerhalb des Servoumrichters befindet und durch einen Mikrocontroller realisiert wird. Der Umrichter arbeitet daher als reiner Leistungssteller, der seine Stellgröße über einen CAN-Bus vom Mikrocontroller erhält.

### 3 Messwerterfassung

#### 3.1 Messung der Position mit inkrementellen Drehgebern

Bei Servomotoren ist in der Grundausstattung ein Resolver integriert, der die Winkellage (Position) des Rotors in eine elektrische Größe wandelt. Gegenüber den Resolvieren erreichen inkrementelle Drehgeber eine höhere Auflösung und werden daher in vielen Servoantrieben als zusätzlicher Sensor über eine drehsteife Kupplung mit der Motorwelle verbunden.

Ein inkrementelles Drehgebersignal besteht aus 2 digitalen Signalen A, B mit einem Puls-Pausen-Verhältnis von 50%, die um 90° phasenverschoben sind. Pro Umdrehung wiederholt sich die Signalform mehrfach. Die Anzahl der Wiederholungen (Teilungen bzw. Inkremente) bestimmt die Auflösung des Sensors. Die meisten Sensoren geben ein drittes Signal (R) aus, das einen sogenannten Referenz- bzw. Nullimpuls einmal pro Umdrehung liefert. Durch die Auswertung des Nullimpulses ist die absolute Lage innerhalb einer Drehgeberumdrehung bekannt.

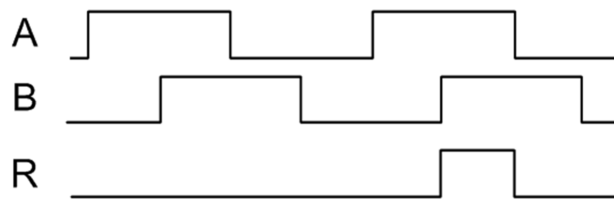


Abbildung 2: Signale eines inkrementellen Drehgebers

Zur Erhöhung der Auflösung können sinusförmige Signale A und B eingesetzt werden. Damit kann eine Teilung (Inkrement) mit weiteren Unterteilungen interpoliert werden. Je nach Drehgeber findet diese Interpolation bereits in der Sensoreinheit statt. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein entsprechender Drehgeber der Firma Wachendorf mit 25000 Inkrementen pro Umdrehung eingesetzt.

Für die Auswertung digitaler Gebersignale ist zunächst eine Erkennung der Drehrichtung durch die Phasenlage der Signale A und B (A ist in Bezug auf B vor- oder nachteilend) erforderlich. In Abhängigkeit der Drehrichtung werden die Inkremente (Einfachzählung) oder die Flanken (Vierfachzählung) mit einem Vor-/Rückwärtszähler gezählt. Der Zählerstand entspricht der Anzahl, der seit dem Überfahren der Referenzmarke R gezählten Flanken und ist demnach ein Maß für die Position (bzw. den Winkel) der Achse. Die ermittelten Positionswerte stellen aufgrund des inkrementellen Auswerteverfahrens diskrete Werte da und weichen um 1 LSB der Geberauflösung von der tatsächlichen Position ab. Dieses Diskretisierungsrauschen  $\Delta\phi$  beträgt bei dem verwendeten Drehgeber (25000 Inkremente)

$$\Delta\varphi = \pm \frac{360^\circ}{4 \times 25000} = \pm 0,0036^\circ \quad (1)$$

Üblich ist die Auswertung von inkrementellen Drehgebern mit Quadraturencodern, die mittlerweile in vielen Mikrocontrollern als Hardwarekomponente zur Verfügung stehen. Zur Regelung synchroner Achsen müssen die Positionen aller Motoren zu einem gleichen Zeitpunkt erfasst werden. Daher wurden die Quadraturencoder mit einem FPGA realisiert, in dem alle Auswertungen parallel ablaufen. Wenn der Inkrementaldrehgeber genau auf der Grenze einer Flanke steht, können allerdings durch kleinste Erschütterungen ständige Zählerstandsänderungen auftreten. Um dieses zu vermeiden, wurde eine Hysterese von 1/4-Teilung implementiert.

### 3.2 Messung der Drehzahl

Die Regelung eines Positionierantriebs benötigt neben der aktuellen Position (Lage) auch den Istwert der Geschwindigkeit bzw. der Drehzahl als Rückführungswert. Als Geschwindigkeitssensoren können prinzipiell Gleichstrom- oder Drehstromtacho verwendet werden. Bei beiden Varianten liegt nach einer Gleichrichtung ein analoger Spannungswert als Maß für die Drehzahl vor. Da Regelungen von Servoachsen heute fast ausschließlich mit digitalen Reglern aufgebaut sind, wäre in einem solchen Fall eine Analog-Digitalwandlung notwendig.

Daher werden inkrementelle Drehgeber zunehmend auch zur Drehzahlmessung verwendet, indem die Geschwindigkeit durch Bildung von Differenzquotienten aus zwei benachbarten Positionswerten im Abstand einer Messperiode errechnet wird.

Die Geschwindigkeit  $v$  eines translatorisch bewegten Objektes kann generell über die Änderung des Weges  $ds$  innerhalb einer Messzeit  $dt$  nach der Formel  $v = \frac{ds}{dt}$  bestimmt werden. Analog gilt für die rotatorische Bewegung:  $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$ .

Durch den Quadraturencoder ist – wie oben beschrieben – eine Position (bzw. Winkel) eindeutig einem Zählerstand zugeordnet. Die Veränderung des Zählerstandes  $dZ$  pro Zeiteinheit  $dt$  ist demnach ein Maß für die Drehzahl des Antriebs. Die Messzeit (typischerweise zwischen 0,5 und 1ms) hängt von der konkreten Antriebsaufgabe ab und sollte prinzipiell für jede Servoachse separat einstellbar sein, um Messartefakte aufgrund unterschiedlicher Resonanzfrequenzen der Achsen zu unterdrücken.

Das Diskretisierungsrauschen der Positionsbestimmung führt zu einem verrauschten Drehzahlwert, weil bei niedrigen Drehzahlen ein Zählwert, der pro Zeitintervall mehr oder weniger erkannt wird, zu einem beachtlichen Einfluss bei der Geschwindigkeitsberechnung führt.  $\Delta\varphi$  ist die Differenz zweier Zählwerte, deren Einzelfehler sich bei der Betrachtung des maximal möglichen Fehlers addieren.

Die Messabweichung („Fehler“)  $\Delta\omega$  zum wahren Wert beträgt bei einer Messzeit  $t = 1\text{ms}$  für den hier verwendeten Drehgeber (25000 Inkremente, 4 Flankenauswertung)

$$\Delta\omega = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{2 \text{ Zählwerte}}{1 \text{ ms}} \cdot \frac{1 \text{ U}}{100.000 \text{ Zählwerte}} = 0,02 \frac{\text{U}}{\text{s}} \quad (2)$$

Die Messabweichung ist für alle Geschwindigkeiten konstant und nur von der Auflösung (Anzahl Zählwerte pro Umdrehung) des verwendeten Drehgebers abhängig. Dreht die Achse mit einer Geschwindigkeit  $\omega = 3000 \text{ U/min} = 50 \text{ U/s}$ , so beträgt die relative Messabweichung  $f_\omega$

$$f_\omega = \frac{\Delta\omega}{\omega} = \frac{0,02 \text{ U/s}}{50 \text{ U/s}} = 0,0004 = 0,04 \% \quad (3)$$

Aus Gleichung 3 wird ersichtlich, dass der relative Fehler für kleinere Drehzahlen größer wird. Dreht die Achse langsam, mit z.B. 1 Umdrehung in 10 Sekunden, beträgt der relative Fehler schon 20%.

$$f_\omega = \frac{\Delta\omega}{\omega} = \frac{0,02 \text{ U/s}}{0,1 \text{ U/s}} = 0,2 = 20 \% \quad (4)$$

Anhand dieses Beispiels sieht man, dass dieses Verfahren zur Geschwindigkeitsberechnung für langsame Drehzahlen nur bedingt geeignet ist. Als Kompromiss ließe sich die Messzeit  $dt$  erhöhen, wodurch aber die Dynamik der Servoachse leidet und was im Stillstand zu einer „weichen“ Achse führen würde.

### 3.3 Flankenbasierte Geschwindigkeitsmessung für inkrementelle Drehgeber

Das Problem des Diskretisierungsrauschens lässt sich umgehen, indem die Messzeit nicht konstant bleibt, sondern exakt als Zeit zwischen zwei Flanken definiert wird (Abbildung 3).

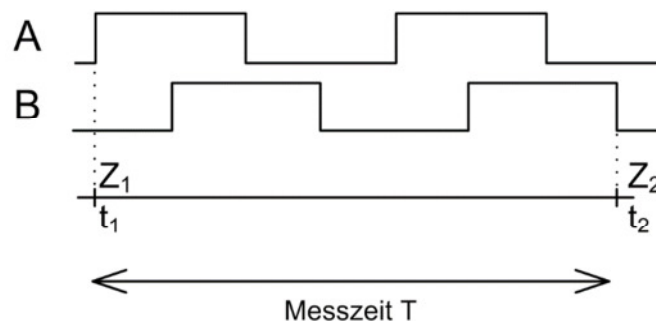


Abbildung 3: Signale eines inkrementellen Drehgebers

Innerhalb dieser Messzeit liefert der Quadraturencoder (in Abhängigkeit der Auflösung und der Winkeländerung  $d\varphi$ ) eine Differenz des Zählwertes  $Z$ . Petrella et al. [6] haben die Vorzüge dieses Verfahrens gegenüber dem oben beschriebenen Verfahren herausgestellt. Somit lässt sich die Winkelgeschwindigkeit ausdrücken als

$$\omega = \frac{\text{Zähldifferenz}}{\text{Messzeit}} = \frac{Z}{T} = \frac{Z_2 - Z_1}{t_2 - t_1} \quad (5)$$

Messabweichungen ("Fehler") entstehen durch Ungenauigkeiten in der Zeitmessung  $t_2 - t_1$  und in den Drehgeberflanken selbst (Jitter). Sie werden durch die beiden Summanden des totalen Differentials (Gleichung 6) repräsentiert.

$$\Delta\omega = \left| \frac{d\omega}{dT} \right| \cdot \Delta T + \left| \frac{d\omega}{dZ} \right| \cdot \Delta Z = \left| -Z \cdot \frac{1}{T^2} \right| \cdot \Delta T + \frac{1}{T} \cdot \Delta Z = \frac{\omega}{T} \cdot \Delta T \quad (6)$$

Die Drehgeber-Genauigkeit liegt außerhalb des Einflussbereiches der Auswerteelektronik und wird daher an dieser Stelle nicht weiter diskutiert ( $\Delta Z=0$ ). Für die auswertungsbedingten Geschwindigkeitsabweichungen sind allein Zeitungenauigkeiten  $\Delta T$  maßgeblich. Betrachtet man diesbezüglich die relative Abweichung (Fehler)  $f$  der Geschwindigkeitsauswertung, gelangt man zu folgenden Erkenntnissen:

$$f = \frac{\Delta\omega}{\omega} = \frac{\Delta T}{T} \quad (7)$$

1. Die relative Abweichung ist für alle Drehzahlen konstant. Dieses Verfahren ist also nicht auf einen Drehzahlbereich beschränkt [6].
2. Die Genauigkeit des Verfahrens ist unabhängig von der Auflösung der Drehgeber!
3. Das Verfahren benötigt eine möglichst genaue Zeitmessung, damit die Zeitabweichung  $\Delta T$  klein wird.

In dieser Arbeit werden die Inkrementaldrehgeber mit 168 MHz in einem FPGA ausgewertet. Die Zeit jeder Flanke kann daher mit einer maximalen Abweichung von  $1/168 \mu\text{s}$  erfasst werden. Der maximale Fehler der Zeitdifferenz zwischen 2 Flanken beträgt daher  $\Delta T \sim 12 \text{ ns}$ . Betrachtet man wieder eine übliche Messperiode von  $T=1 \text{ ms}$ , so kann die relative Abweichung  $f$  berechnet werden.

$$f = \frac{\Delta T}{T} = \frac{12 \text{ ns}}{1 \text{ ms}} = 12 \text{ ppm} \quad (8)$$

Damit verschwindet der auswertungsbedingte Fehleranteil gegenüber den Ungenauigkeiten, die die handelsüblichen Drehgeber selbst mit sich bringen.

## 4 Integration der Sensorik in den Regelkreis

Elektrische Servoantriebe weisen im Allgemeinen eine kaskadierte Regelungsstruktur auf. In mehreren überlagerten Regelkreisen werden die wesentlichen Zustandsgrößen Drehmoment (Strom), Drehzahl und Lage separat geregelt. Der überlagerte Regler berechnet jeweils den Sollwert für den unterlagerten Regelkreis.

In manchen Positionieranwendungen (z.B. bei einem Querschneider) wird nicht nur die Lage, sondern auch ein Zeitpunkt vorgegeben, wann der Sollwert erreicht werden muss. Üblich ist dann die Berechnung von Bahnkurven (in der Steuerung), aus der die Sollwerte für die Regelungskaskade generiert werden. Immer, wenn sich an den Vorgaben (Lage, Zeitpunkt) etwas ändert, müsste eine Neuberechnung der Bahnkurve erfolgen. Reaktionen auf derartige Ereignisse sind daher langsam.

Aus diesem Grund haben sich für solche Anwendungsfälle alternative Regelungskonzepte durchgesetzt [4] [5]. Das hier eingesetzte Regelungsprinzip [5] hat sich in vielen Projekten bewährt und benötigt keine Bahnkurvenberechnung. In jedem Regelungszyklus kann unmittelbar auf geänderte Soll-Vorgaben und Ist-Messwerte reagiert werden. Das Verfahren ist für die Punkt-zu-Punkt-Bewegung träger Massen prädestiniert, und zwar auch dann, wenn die Motoren in den jeweiligen Zielpunkten in Bewegung sind, d.h. eine von Null verschiedene Geschwindigkeit besitzen.

Die erforderlichen Sollwerte für die einzelnen Servoachsen werden zentral durch eine einzige übergeordnete Prozesssteuerung im Mikrocontroller berechnet und an die Regelalgorithmen übergeben. Dadurch ergeben sich insbesondere für die Synchronisation mehrerer Achsen erhebliche Vorteile.

1. Die Messwerte aller Achsen werden zum gleichen Zeitpunkt erfasst.
2. Es gibt keine Verzögerungen durch die Kommunikation zwischen dezentralen Regelungen.

Zum Nachweis der Genauigkeit kommt wieder das FPGA ins Spiel. Die Sollwerte (Lage, Zeit) werden ebenfalls an das FPGA übergeben. Durch die Parallelstruktur, die durch die Architektur des FPGA automatisch garantiert ist, können alle Servoachsen gleichzeitig überwacht werden. Für jede Positionieraufgabe wird die Abweichung zwischen der Soll- und der Istzeit bei der erreichten Solllage und die Abweichung zwischen der Soll- und der Istlage bei der erreichten Sollzeit bestimmt.

Dabei zeigt die Praxis, dass sich Zeitabweichungen von  $< 2 \mu\text{s}$  erreichen lassen. Für eine mit  $v = 2 \text{ m/s}$  bewegte Achse bedeutet dies eine Synchronisationsgenauigkeit von  $4 \mu\text{m}$ .

## 5 Steuerung und Überwachung

Der  $\mu\text{C}$  hat als zentrales Element des Servo-Boards neben der Steuerungs- und Regelungsfunktion als dritte wichtige Aufgabe, die Kommunikation mit der Außenwelt zur Parametrierung, Steuerung und Überwachung aller Servoachsen (siehe Abbildung 4).

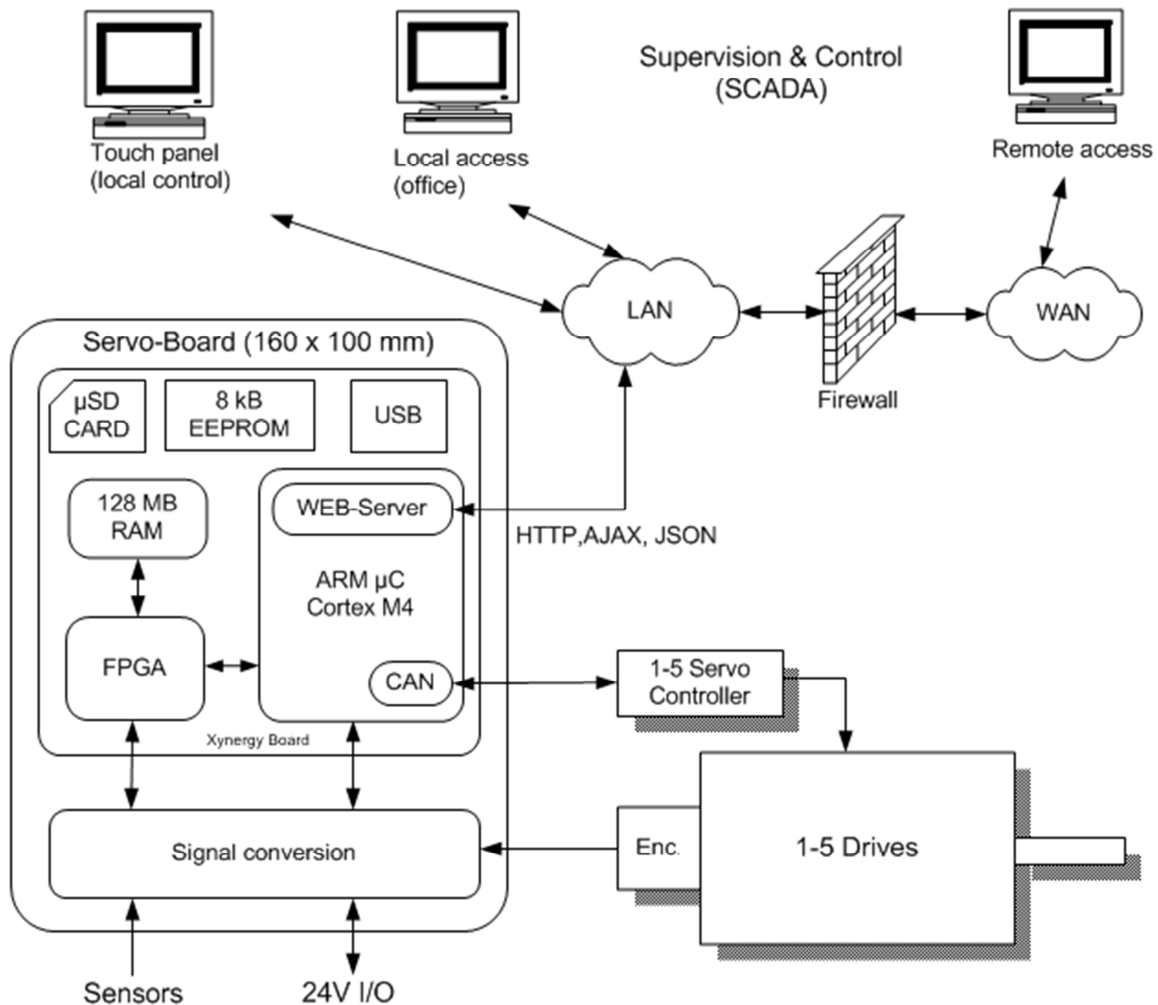


Abbildung 4: Struktur des Gesamtsystems

Als Client ist jeder beliebige HTML5-fähige Internetbrowser geeignet. Aus der Weboberfläche heraus können Ein- und Ausgänge überwacht werden, Sollwerte für die Regelung gesetzt werden und sämtliche Einstellungen des Systems vorgenommen werden.



Abbildung 5 zeigt beispielhaft den graphischen Verlauf von Motorgeschwindigkeit und Motorstrom. Das Servo-Board verfügt über ein 128 MB großes RAM, indem sämtliche Bewegungsdaten aller Achsen für die letzten 10 Minuten für Diagnosezwecke gespeichert sind.

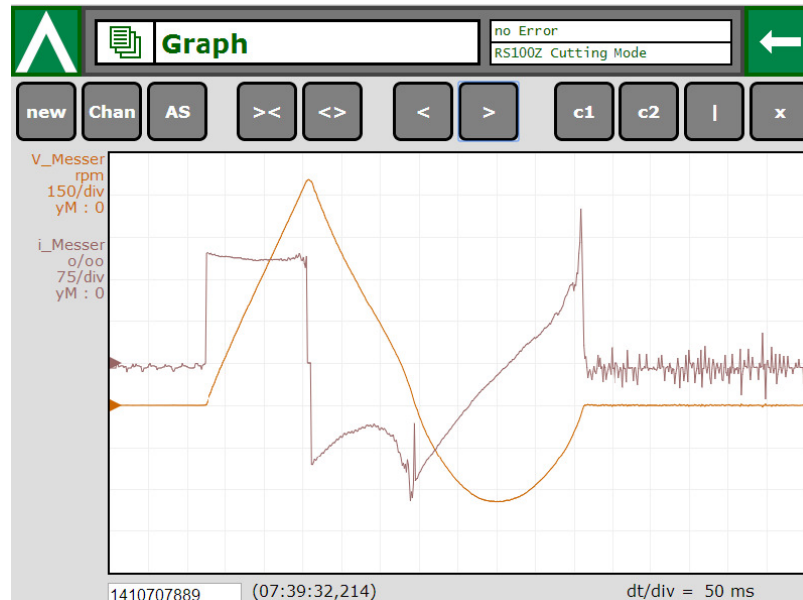


Abbildung 5: WEB-basierte Benutzeroberfläche

Da nur Standardprotokolle verwendet werden, kann aber auch ein SCADA-System als Client per Webservice alle Messwerte abrufen. Das System ist für eine Integration in Industrie 4.0 Umgebungen vorbereitet.

## 6 Zusammenfassung

Die in dieser Arbeit vorgestellte Struktur zur Regelung synchroner Servoachsen beinhaltet einen zentralen Regler für alle Achsen. Die Istwerte für Position und Geschwindigkeit aller Motoren werden mittels FPGA zeitgleich mit einer Zeitauflösung von 6 ns erfasst. Die Auswertung der Geschwindigkeit erfolgt auf Basis von inkrementellen Drehgebern mit einem Algorithmus, der über den gesamten Drehzahlbereich einen konstanten relativen Auswertefehler von 6 ppm aufweist. Erste Applikationen in zwei Projekten haben die Anwendbarkeit des hier vorgestellten Systems zur Synchronisation mehrerer Servoachsen gezeigt. Durch eine Ethernet basierte Standardschnittstelle (Web-Service) kann die Einheit sowohl über das lokale Intranet als auch über das weltweite Internet von überall parametrisiert, gesteuert und überwacht werden. Eine mögliche Integration in Industrie 4.0-Umgebungen ist damit gegeben.

## Literatur

- [1] Probst, U. : Servoantriebe in der Automatisierungstechnik, VIEWEG+TEUBNER, 2011.
- [2] Schulze, M.: Elektrische Servoantriebe, HANSER, 2008.
- [3] Sciavicco, L., Siciliano, B.: Modeling and Control of Robot Manipulators, McGraw-Hill, 1996
- [4] Kröger, T., Spiegel, G. : Trajektorien online berechnen, computer-automation, 2013
- [5] Knauf, T. : Numerisches Verfahren zur schnellen und exakten Lage- und Drehzahlregelung von Elektromotoren, Patentschrift DE 196 20 706, 1997
- [6] Petrella, R., Tursini, M., Peretti, L., Zigliotto, M : Speed measurement algorithms for low-resolution incremental encoder equipped drives: a comparative analysis, Electrical Machines and Power Electronics, 2007. ACEMP '07. International Aegean Conference, p. 780 – 787, 2007