

Fišer, Pavel, Dipl.-Ing.

Jirásko, Petr, Dr.-Ing.

Václavík, Miroslav, Prof. Dr.-Ing.

Problematik der Einzweckmaschinen mit elektronischen Kurvenscheiben

1 Einführung

Die Firma *VÚTS, a.s.*, beschäftigt sich mit der Konstruktion und Herstellung von speziellen Einzweckmaschinen, die sie mit ihren entwickelten die Umsetzung der zuständigen Technologie ermöglichenden Steuerungssystemen bestückt. *Die Abteilung für Mechatronik* führt mehr als 10 Jahre die Anwendungsforschung von elektronischen Kurvenscheiben basierend auf HW und SW-Komponenten von *Yaskawa (Japan)* / 2 / durch. Da die Anwendung von elektronischen Kurvenscheiben mit den eigenen Steuersystemen zusammenhängt, wurde ein allgemeines Steuersystem entwickelt, das auf dem Konzept einer Zustandsmaschine mit manueller und automatischer Betriebsart basiert. Dieses Konzept ist im Bereich der Steuersysteme für Werkzeugmaschinen üblich. Der grundlegende Unterschied liegt jedoch in der automatischen Betriebsart, bei der die Programmlogik der *elektronischen Kurvenscheiben* zum Steuern einzelner NC-Achsen verwendet wird. Die Bewegung der Arbeitsglieder bzw. einzelner Achsen wird von den *Bewegungsgesetzen* abgeleitet, einschließlich der *ersten und der zweiten Ableitungen*, die in den *Vorwärtskopplungen der Geschwindigkeit und des Momentes* der Kaskadenregelstruktur in dem Servo-Wandler verwendet sind. Das Konzept des Steuersystems mit elektronischen Kurvenscheiben wurde für eine Anzahl von Einzweckmaschinen verwendet, von denen zwei Vertreter erwähnt werden.

2 Elektronische Kurvenscheibe, Bewegungsgesetz und Bewegungsfunktion

Elektronische Kurvenscheibe ist ein *Servo-Antrieb* (ein mit einem Frequenz-Wandler-Servo-Wandler gespeister und mit einem Controller gesteuerter *Synchron-Servomotor*), der auf der Abtriebswelle des Rotors des Servomotors die erregende *Bewegungsfunktion* realisiert, mit Ausnutzung der dynamischen Eigenschaften der Bewegungsgesetze bzw. deren Ableitungen (der 1. und der 2.). Derart ordnet die Bewegungsfunktion die Winkelgröße der Welle des Servomotors der Zeit zu, die Längengröße in dem Fall eines linearen

Servomotors. Den Controller kann man im *SPS (PLC)* -Bereich und im kontinuierlichen Bewegungsbereich durch die Entwicklungsumgebung programmieren. Die elektronische Kurvenscheibe von VÚTS (*HW Yaskawa*) wird im *SPS (PLC)* -Bereich programmiert. Bei jedem Durchgang (Scan) des *SPS (PLC)*-Programm werden *Position, Geschwindigkeit und Größe des Moments* des Servomotors durch Ausgangs-O-Register definiert. Die meisten Hersteller von elektronischen Kurvenscheiben verwenden eine Kaskadenregelstruktur der Servo-Wandler, die aus dem Lageregler (im Allgemeinen proportional), dem Drehzahlregler (in der Regel proportional-integrierend) und einem Drehmomentregler (bzw. einem Stromregler, im Allgemeinen proportional-integrierend) besteht. Vom Gesichtspunkt der Maschinenbauernwendungen der Antriebe der Getriebe-Arbeitsglieder ist unter dem Begriff elektronische Kurvenscheibe eine solche Anwendung des Servomotors (als eines Leistungskraftgliedes) gemeint, die eine Alternative zu den Antrieben, die die möglichen Kombinationen von mit konventionellen Asynchronmotoren angetriebenen Kurven-Gelenkgetrieben sind.

In grundlegenden Merkmalen ist die Produktionsmaschine ein System von Getrieben, die die gegebene Technologie umsetzen, zum Beispiel mit zusammengesetzten Kurvengetrieben. Generell kann gesagt werden, dass es zwischen der *konventionellen Kurvenscheibe* und dem *Arbeitsglied* mit der gewünschten Bewegung eine kinematischen Kette von ebenen oder räumlichen Getrieben gibt, die die gewünschte Arbeitsbewegung auf das Basiselement des grundlegenden Kurvengetriebes (Aufgabe der kinematischen *Synthese*), beispielsweise auf *den Schwinghebel einer radialen Kurvenscheibe*, umwandelt. Abhängig von der Geometrie des Grundkurvengetriebes bestimmt man dann durch die Berechnung der kinematischen *Synthese* die Koordinaten der aktiven Kurvenscheibenfläche. *Es ist möglich*, die Rotationsbewegung des Schwinghebels einer konventionellen radialen Kurvenscheibe der Welle des elektronisch gesteuerten *Servomotors zuzuordnen*, bzw. der Servomotor-Welle das transformierte Bewegungsgesetz des Schwinghebels, einschließlich der 1. und 2. Ableitung, zuzuordnen.

Die Funktion, die der *Zeit* eine Positionsgröße eines bestimmten Gliedes eines zusammengesetzten Kurvengetriebes zuordnet, werden wir als eine *Bewegungsfunktion* dieses Gliedes nennen. Die Bewegungsfunktion der elektronischen Kurvenscheibe (theoretisch, tatsächlich) ist die Bewegung der Welle des Servomotors (*Slave*) nach der Zeit, und diese Bewegungsfunktion erregt ein dynamisches System der Übertragungsgetriebe der kinematischen Kette, an deren Ende ein Arbeitsglied ist. Die entsprechenden Ableitungen der Bewegungsfunktion nach *Zeit* sind die Größen *Geschwindigkeit* und *Beschleunigung*.

Die Funktion, die einer *Position* des bestimmten Elementes die Positionsgröße eines anderen Elementes des zusammengesetzten Kurvengetriebes zuordnet, werden wir als *Bewegungsgesetz* / 1, 5 ,7/ bezeichnen. Das Bewegungsgesetz der elektronischen

Kurvenscheibe ist die theoretische Funktion der Welle des Servomotors (*Slave*) zu der Position der virtuellen Welle (*Master*), bzw. der virtuellen Rotation. Die zugehörigen Ableitungen des Bewegungsgesetzes nach Position der virtuellen Welle sind *die erste und die zweite Ableitungen* des Bewegungsgesetzes (die Null-Ableitung wird oft als der Hub selbst bezeichnet).

Die Beziehung zwischen dem *Bewegungsgesetz* und der *Bewegungsfunktion* des gleichen Gliedes, beispielsweise des angetriebenen Gliedes des Grundkurvengetriebes ist gemäß den Beziehungen (1), wo das Bewegungsgesetz mit dem Symbol Π bezeichnet ist, und zwar zwischen dem Eingangs- und Ausgangselement mit den allgemeinen Koordinaten q .

$$\begin{aligned} q_3 &= \Pi(q_2) \\ \dot{q}_3 &= \Pi'(q_2)\dot{q}_2 \\ \ddot{q}_3 &= \Pi''(q_2)\dot{q}_2^2 + \Pi'(q_2)\ddot{q}_2 \end{aligned} \quad (1)$$

Das Bewegungsgesetz (0., 1. und 2. Ableitung) einer elektronischen Kurvenscheibe, die durch die Winkelgeschwindigkeit und die Beschleunigung der virtuellen Welle umgewandelt ist, ist die theoretische Bewegungsfunktion. Die Differenz zwischen der gewünschten *theoretischen* (Soll-Funktion) und der *tatsächlichen* Bewegungsfunktion (Ist-Funktion) ist die *Positionsgenauigkeit* der *Bewegungsfunktion* der elektronischen Kurvenscheibe (im Folgenden bezeichnet als *PERR*). Eines der Ziele der Anwendung der elektronischen Kurvenscheiben ist es, die bestmögliche Abstimmung der theoretischen Bewegungsfunktion mit der tatsächlichen auf der Welle des Servomotors zu erreichen. Der Wert *PERR* ist prinzipiell und dessen Größe ist die Funktion der Parameter in der Kaskadenregelung im Servo-Wandler (Yaskawa), der äußeren dynamischen (trägen) und technologischen (Produktions-) Belastung / 2,3,4,6 /.

3 Umsetzung der Bewegungsgesetze im Steuersystem von Yaskawa

Durch Verallgemeinerung kommen wir zu dem Schluss, dass die *Realisierung einer elektronischen Kurvenscheibe* in der Entwicklungsumgebung eines *beliebigen* Antriebssteuerungssystems die Verarbeitung der Daten des *Bewegungsgesetzes* mit dessen Ableitungen (Hub, 1. und 2. Ableitung) in die *Bewegungsfunktion* (Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung) der *Abtriebswelle* des Servomotors ist. Das System verarbeitet die *Geschwindigkeits- und Beschleunigungswerte* weiter in *Vorwärtskopplungen* (*Feed Forward*, siehe rote Pfeile in *Bild 5*) der *Geschwindigkeit* und des *Drehmoments* in Bezug auf die Trägheitsmassen und andere externe (technologische) Kraftbelastung.

Die elektronische Kurvenscheibe wird in dem SPS (PLC)-Bereich programmiert (*Ladder Diagramm – HSS -Bereich*). In jedem Zeitdurchgang (*High-Scan*) durch das SPS (PLC)-Programm werden durch die *Ausgangsregister* (OLxxxx) die **Position** (im Grunde genommen ist es die Information, die angibt, um wie viele *Inkrement-Pulse* sich im Zeitintervall des *High-Scans* der Servomotor-Encoder bzw. die Welle des Servomotors dreht), **Drehzahl** und **Drehmomentgröße** des Servomotors definiert. Datensätze kinetostatischer Größen werden in die Speicherbereiche des Controllers übertragen, wo sie weiter auf Grund von definierten Einheiten unabhängig nach Bedarf transformiert werden. Dies sind insbesondere die Skalierung, die gegenseitige Phasenverschiebung der Werte der 1. und 2. Ableitung des Bewegungsgesetzes mit Rücksicht auf den Hub, verschiedene unabhängige Superpositionen (Überlagerungen) mit beliebigen Daten mit dem Ziel, den *Positionsfehler* (*PERR*) der Bewegungsfunktion der elektronischen Kurvenscheibe zu minimieren.

Der Grundbaustein der in der SPS (PLC) programmierten Steuerung (Entwicklungsumgebung MPE720-Yaskawa) ist die *Benutzerfunktion*. Die Benutzerfunktion ist mit ihren *Ein- und Ausgängen* und der *bidirektionalen Adresskommunikation* in *Bild 1* aus der Yaskawa-Dokumentation und als allgemeine Funktion *MFCE1* im SPS (PLC)-Kontaktplan (*Ladder Diagramm-PLC*) dargestellt. Die Produktivität der Programmierarbeit und die Zusammenarbeit mehrerer Programmierer an einem Projekt des Steuersystems erforderte eine Vereinheitlichung, bzw. eine *Benutzerfunktionsschablone*, die immer gleich bleibt oder gemäß den vereinbarten Regeln geändert wird. Dies erleichtert die Orientierung und Erstellung von Dokumentationen von entwickelten Programmen und Benutzerfunktionen. Die Struktur der Schablone der allgemeinen Benutzerfunktion *MFCE1* gemäß *Bild 1* befindet sich in *Bild 2*.

Gemäß *Bild 1* hat jede Funktion immer einen Eingang (*[B] Ein/Aus*) (*[B]On/Off*) sowie andere mögliche spezifische *Eingänge* und *Ausgänge*, und immer eine miteinander kommunizierende Schnittstelle, die durch die Adresse (*[A] work1W*) festgelegt ist. Die Konvention in der Bezeichnung der Adresse *1W* symbolisiert, dass zur Kommunikation ein *lokales 16-Bit-Register D* verwendet ist. Am besten wird diese Datenkommunikation in *Bild 2* erklärt. Die Funktion *MFCE1* führt keine konkrete Aktivität aus, nur auf der Grundlage des Eingangs *[B] Ein/Aus* *[B]On/Off* und der internen Bedingungen (*IF*) der strukturierten Bereiche des Codes definiert sie die *Ausgangsvariablen* und die jeweiligen Bits des *externen Registers*, bzw. der lokale Kommunikationsadresse *DA00006* (siehe *Bild 1*). Durch die Überwachung dieser Werte (Bits) kann festgestellt werden, welcher strukturierte Bereich der Funktion aktiv ist. Die Funktionsschablone ist auf Grund der strukturierten Überlappungskonstruktionen *IF ... ELSE ... END_IF* aufgebaut, unter der Voraussetzung, dass die Funktion im Kontaktplan (im *Ladder Diagramm*) immer *aktiv* ist. Mit anderen Worten bedeutet dies, dass die Eingangsvariable des Eingangs *[B] On/Off* immer *definiert* ist und die Werte *ON*

oder *OFF* erhält, mit dem Anfangswert *OFF*. Es ist möglich, mit dieser Logik ein von Benutzerfunktionen zusammengesetztes System zu schaffen, in denen immer bestimmte Teile der Strukturen des Codes der Funktionen immer aktiv sind, basierend auf beliebigen definierten Eingängen von der *HMI* (z.B. Touchscreen). Neue Benutzerfunktionen werden so erstellt, dass in die entsprechenden Bereiche der allgemeinen Struktur *MFCE1* Teile des Codes geschrieben werden, die unter den Bedingungen spezifische Aktionen (*Variablen- definitionen, Berechnungen, Servomotor-Steuerungen, etc.*) ausüben.

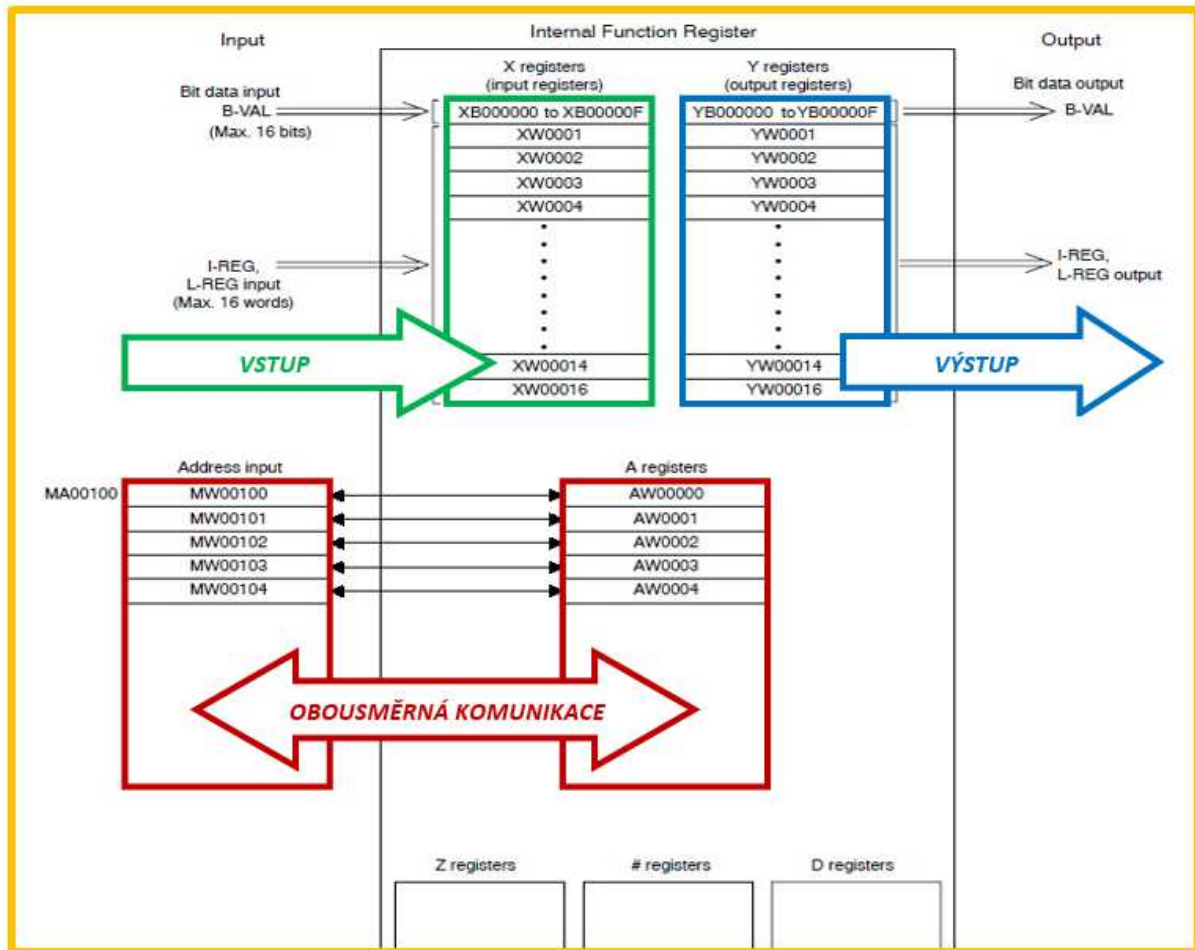


Bild 1 Benutzerfunktion (Eingänge, Ausgänge und Kommunikation, MFCE1 in PLC)

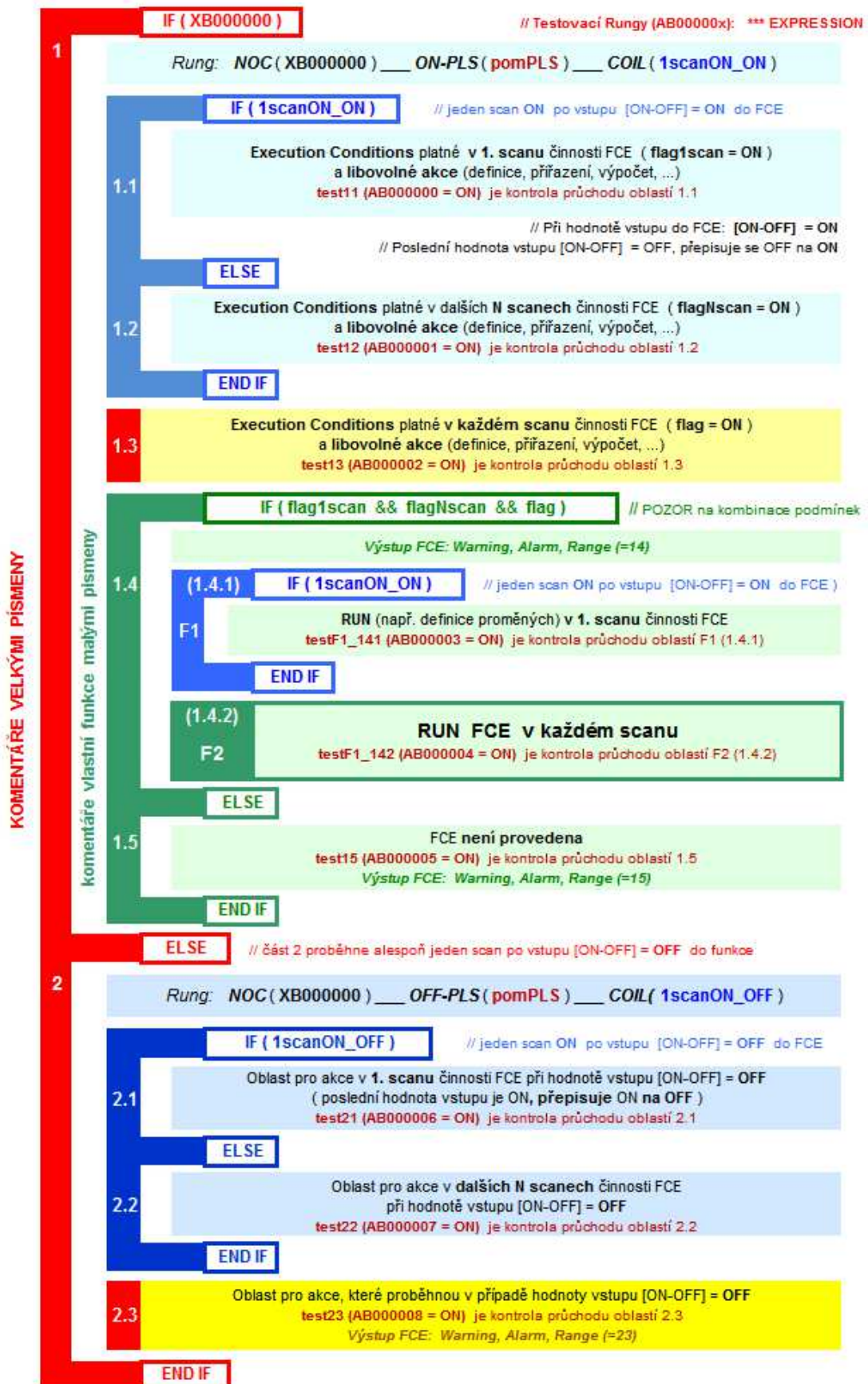


Bild 2 Schablone der unifizierten allgemeinen Benutzerfunktion MFCE1

Die Benutzerfunktion *CAM_V1* gemäß *Bild 3* realisiert das gewünschte *Bewegungsgesetz*. Die Funktion *CAM_V1* wird entsprechend der allgemeinen Struktur der Schablone *MFCE1* programmiert. Im Hinblick auf die Produktivität der Forschungsarbeiten ist die Funktion für beide Steuerungsarten (*Positions- und Phasensteuerung*) (*Position a Phase Control*) ausgelegt. Die Hauptkommunikations-Schnittstelle ist die Adresse (*[A] work50W*), die die zugehörigen Parameter definiert und deren Kombinationen bestimmt. Das Ziel der so programmierten Funktion *CAM_V1* ist es, die Eigenschaften beider Steuerungsarten hinsichtlich der *Positioniergenauigkeit der PERR-Bewegungsfunktion* zu untersuchen. Basierend auf den festgestellten Eigenschaften wird die *CAM_V1*-Funktion für einen bestimmten Steuerungstyp mit den notwendigen Eingaben modifiziert. Auf diese Weise erfolgt die Entwicklung der Funktionen der *CAM_Vxy*-Kategorie, die für eine bestimmte Arbeitsbewegung (*Workflow*) der Anwendung optimiert werden.

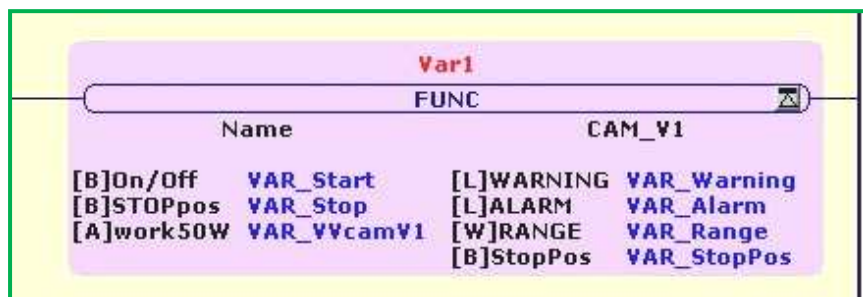


Bild 3 Benutzerfunktion *CAM_V1* der elektronischen Kurvenscheibe Yaskawa (Ladder in Anlage 6)

Mit den so aufgebauten Funktionsblöcken (Benutzerfunktionen) wird im Wesentlichen ein Steuerungssystem im Konzept einer *Zustandsmaschine* gemäß *Bild 4* geschaffen.

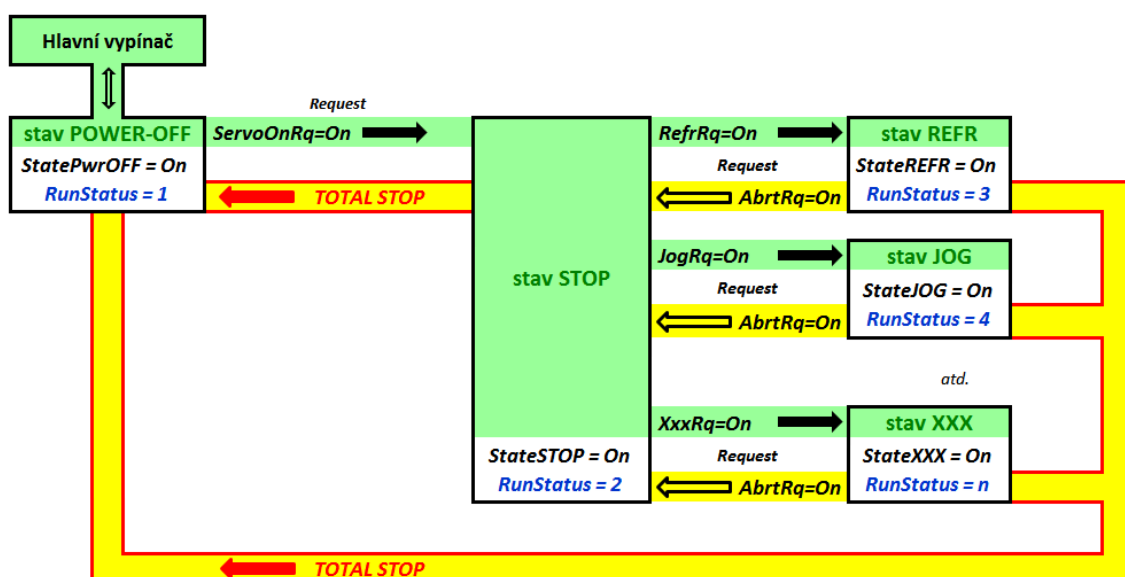


Bild 4 Schema des Zustands-Steuersystems der Maschine

4 Steuerung von Servo-Antrieben

Die Steuerung (Regelung) von Servo-Antrieben erfolgt über Parameter, die vom Hersteller zur Verfügung stehen. Wir verwenden das System der elektronischen Kurvenscheibe *Yaskawa* (*SigmaV* Servo-Antriebe, die Controllern der Serie *MP2000 / 3000*). Ziel ist es, die Parameterwerte so festzulegen, dass die elektromagnetische Kopplung *Stator/Rotor* so steif wie möglich ist (aus Sicht der technischen Mechanik). In *Bild 5* ist ein Ausschnitt der Kaskadenregelung des Servo-Wandlers mit den verwendeten Parametern:

Pn100 ... Speed Loop Gain [Hz]

Pn101 ... Speed Loop Integral Time Constant [ms]

Pn102 ... Position Loop Gain [s^{-1}]

Pn401 ... Torque Reference Filter Time Constant [ms]

Der Hersteller empfiehlt auch die Werte dieser Parameter in zehn Steuerstufen, wobei die Werkseinstellung *Stufe 4* ist, die die Parameter Pn100 / Pn101 / Pn102 / Pn401 bei den Werten 40 [Hz] / 20 [ms] / 40 [s^{-1}] ms] aufweist.

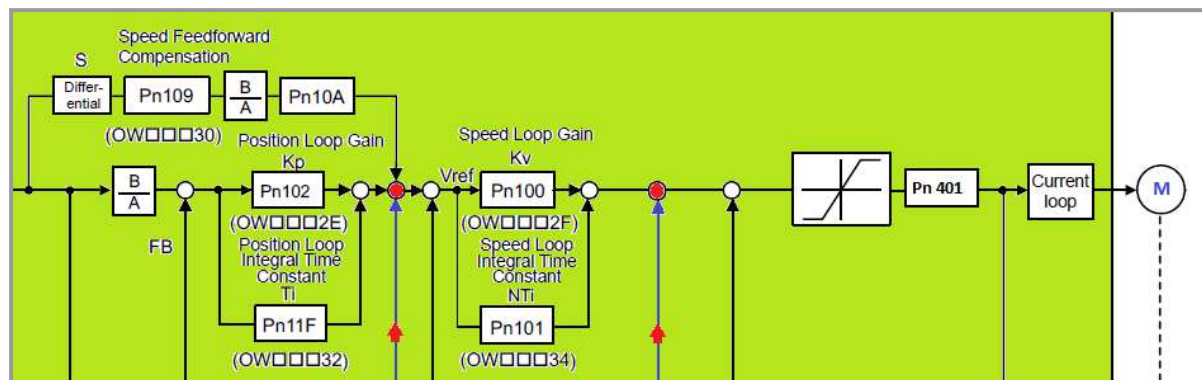


Bild 5 Kaskadenregelungsstruktur der Servo-Wandler Yaskawa (*SigmaV*)

Es gibt keinen Platz hier für eine tiefere Analyse der *Yaskawa-Antriebssteuerungsmethodik* in verschiedenen elektronischen Kurvenscheibenanwendungen. Wir weisen lediglich darauf hin, dass die korrekte Einstellung der Steuerparameter *wesentlich* ist, im Hinblick auf die realisierte Technologie mit den Anforderungen an eine hohe Positionierungsgenauigkeit des Arbeitsgliedes des Getriebes. Die Werte der Steuerparameter bzw. die Positionierungsgenauigkeit des Arbeitselements in der Konstruktionsphase der Maschine abzuschätzen, ist es ohne frühere Erfahrung mit einer ähnlichen Vorrichtung sehr problematisch.

Es gibt verschiedene Ansätze, Parameter zu identifizieren. Das *Yaskawa*-System bietet verschiedene *Autotuning-Modi*, die sich aber bei uns nicht bewährt haben. Die automatische Parametereinstellung hat die erforderlichen Werte nicht erreicht. In *Bild 7* haben wir am Versuchstand mit Direkt Drehantrieb und Last die manuelle Parametereinstellung nach dem folgenden Verfahren (Schritte 1 bis 3 vom Hersteller empfohlen) abgestimmt, wenn die

Ausgangswerte der Parameter die *Stufe 4* sind ($Pn100 / Pn101 / Pn102 / Pn401 = 40 \text{ [Hz]} / 20 \text{ [ms]} / 40 \text{ [s}^{-1}] / 1 \text{ [ms]}$):

1. Senkung um 10-20% $Pn401$, Kontrolle $Pn401 \leq 1000/(2\pi \cdot Pn100 \cdot 4)$
2. Erhöhung um 10-20% $Pn100$ und Senkung um 10-20% $Pn101$, Kontrolle $Pn101 \geq 4000/(2\pi \cdot Pn100)$
3. Erhöhung $Pn102$ unter die Grenze *Stable Gain*, d.h. $Pn102 \leq 2\pi \cdot Pn100/4$

Die Schritte 1 bis 3 können bis zum Vibrationspegel wiederholt werden. In unserem Fall verfolgen wir jedoch einen Positionsfehler und die Identifikation beenden wir dann, wenn der Positionsfehler signifikant zu senken stoppt oder die erforderliche Größe erreicht. In *Bild 6* ist eine PERR-Positionsfehler-Aufzeichnung beim Ausführen eines Bewegungsgesetzes nach VDI 2143/5, dessen *zweite Ableitung* rot gezeichnet ist. Die grüne Funktion ist *PERR* bei der Regulierstufe 4, die violette Funktion *PERR* ist bei der manuellen Einstellung der Steuer-(Regel)-Parameter gemäß *Bild 7* des Antriebs *Yaskawa SGMCS-1-EN* (0,805 kgm² Last, Drehzahl der virtuellen Welle 56 s⁻¹). Die Drehzahl ist so eingestellt, dass das maximale dynamische Trägheitsmoment (Last und Rotor) den Nennwert gemäß dem Katalogblatt des Herstellers (*Rated Torque* = 150 Nm) erreicht. Das Steuerungssystem verarbeitet *Positionsdaten* und Daten der *ersten und zweiten Ableitungen* des Bewegungsgesetzes in Vorwärtskopplungen der Geschwindigkeit ($Pn109 = 0\%$ gemäß *Bild 5*) und des Drehmoments (*Feed Forward*, siehe rote Pfeile in *Bild 5*). Die PERR-Größe ist eine Konsequenz nur der *prinzipiellen* Nachgiebigkeit der elektromagnetischen Kopplung *Stator/Rotor*. Für eine genauere Vorstellung ist der PERR-Positionsfehler im Bogenmaß am Halbmesser $180/\pi$ (etwa 57 mm) in *Bild 6* und *Bild 8* ausgedrückt.

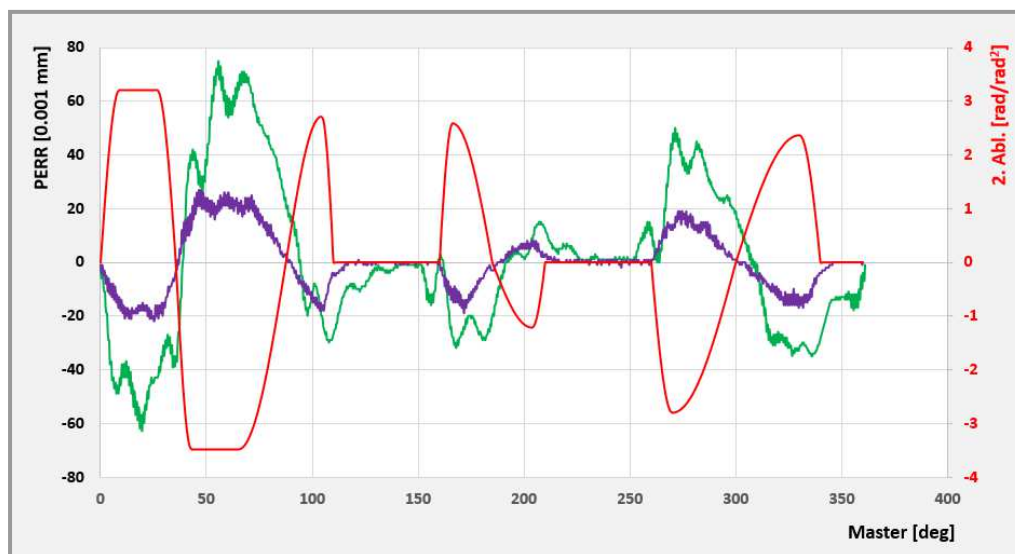
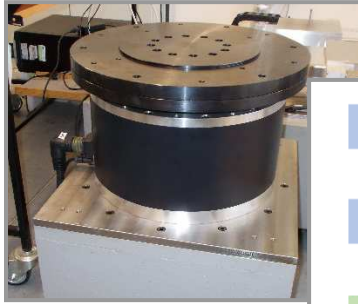


Bild 6 PERR und 2. Ableitung des realisierten Bewegungsgesetzes gemäß VDI 2143



2	Speed Loop Gain	Pn100	[Hz]	99.5			
		OW802F					
2	Speed Loop Integral Time Constant	Pn101	[ms]	6.55	$\gamma =$	Stable Gain	Critical Gain
		OW8034				6.40	(>) 1.60
3	Position Loop Gain	Pn102	[s ⁻¹]	150	$\Lambda =$	Stable Gain	Critical Gain
		OW802E				156.29	(<) 625.18
1	Torque Reference Filter Time Constant	Pn401	[ms]	0.33	$\Lambda =$	Stable Gain	Critical Gain
						0.40	(<) 1.60

Bild 7 Versuchsstand und Steuerparameter für die violette Funktion PERR in Bild 6

5 Positionsfehler PERR

Wie bereits gesagt, hängt der *Positionsfehler PERR* der *Bewegungsfunktion* von den Steuerparametern und der Dynamik von Trägheits- und externen Belastungskräften ab. Im Falle des Tests auf dem Versuchsstand gemäß *Bild 7* handelt es sich nur um dynamische Massenkräfte der Last und des Rotors des Servomotors. Die Daten des *Bewegungsgesetzes* und die *Masseparameter* (Last, Rotor) werden in jedem Durchgang *SPS-PLC (scan 1ms)* in die Position der Servomotor-Welle und der Vorwärtskopplungen verarbeitet. Nach *Bild 6* (violette Daten) ist es klar, dass der Charakter von *PERR* spiegellich in Bezug auf die 2. Ableitung des Bewegungsgesetzes ist. Eine weitere *PERR*-Minimierung kann erreicht werden, indem die Daten der 2. Ableitung verwendet werden, die im Speicher des Controllers verfügbar sind und sie nach der notwendigen Transformation mit den Positionsdaten (6) zusammenzuführen. Eine effektive Option ist dann, die gegenseitige Phasenverschiebung der Daten der 1. und 2. Ableitungen des Bewegungsgesetzes zu verwenden, einschließlich der Skalierung ihrer Werte. In *Bild 8* ist *PERR* bei der Phasenverschiebung der 1. Ableitung um 0,17 Grad [deg] in der gleichen Aufgabe nach dem Bild 6 (*PERR* wurde um etwa das Vierfache verringert).

Der Grund, warum wir die Größe von *PERR* und seine Minimierung in Anwendungen von elektronischen Kurvenscheiben betonen, sind die Erfordernisse präziser Fertigungstechnologien (z. B. Einzweck-Bearbeitungsmaschinen) und die korrekte Funktion des mechatronischen *Differentials* in Anwendungen von nichtperiodischen (Schritt-) Bewegungsgesetzen, wo die gewünschte Ruhe eine Überlagerung (Superposition) der Bewegungen eines klassischen und eines elektronischen Getriebes ist.

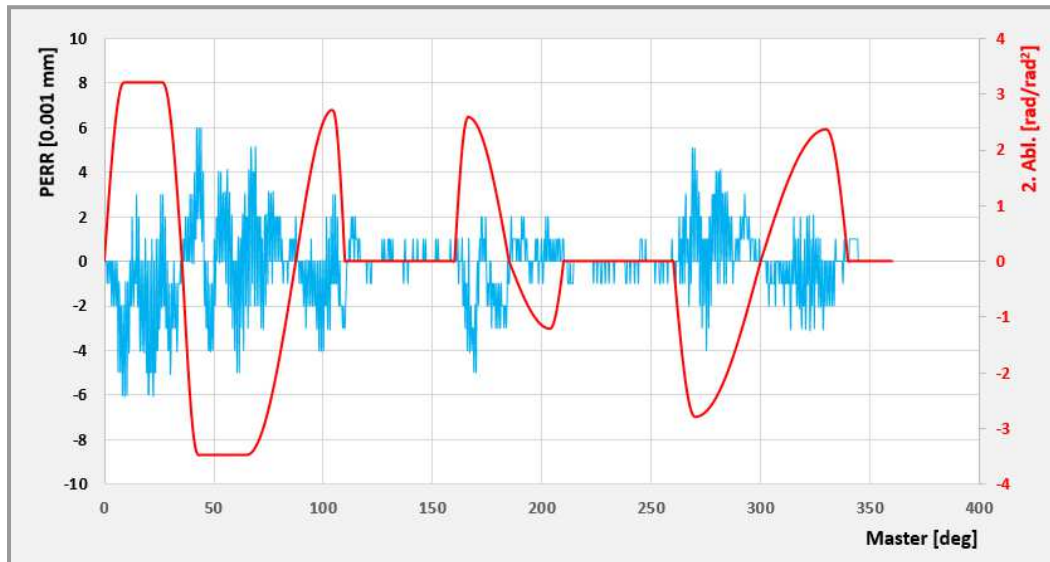


Bild 8 Minimalisierter PERR und die 2. Ableitung des Bewegungsgesetzes gemäß VDI 2143

6 Dynamische Versuchsstände

In der Anwendungsforschung von Yaskawa elektronischen Kurvenscheiben wurden mehrere dynamische Versuchsstände gebaut, um die Eigenschaften der elektronischen Kurvenscheiben und deren Anwendungspotential zu testen. Die Versuchsstände dienen auch dazu, diskrete Rechenmodelle zu verifizieren. In *Bild 9* ist ein Versuchsstand der Standard-Drehservomotoren mit starrem und flexiblem Ausgang, wo die Geschwindigkeit des Servomotors durch ein Lagerreduziergetriebe ins Langsame herabgesetzt wird. In *Bild 10* sind Versuchsstände mit einem Direktreh- und zwei Linear-Servomotoren zu sehen.

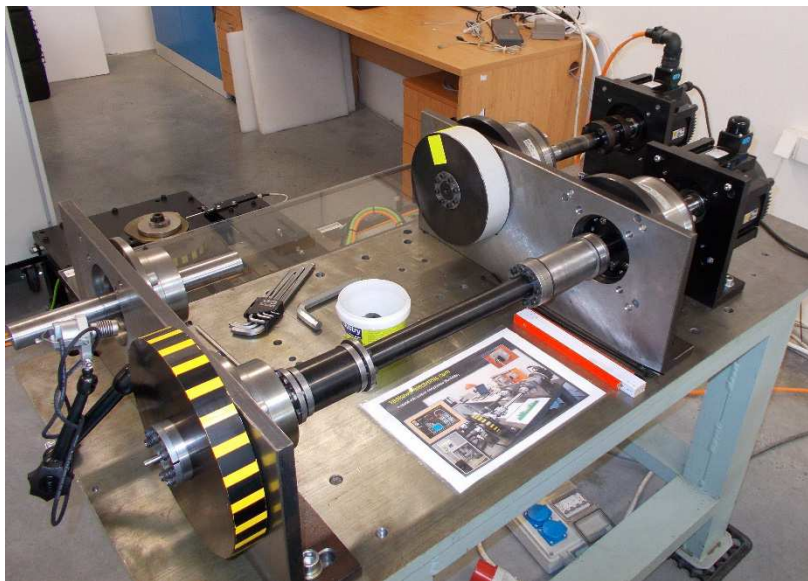


Bild 9 Versuchsstand der standardmäßigen Rotations-Servo-Antriebe mit Lagerreduziergetrieben

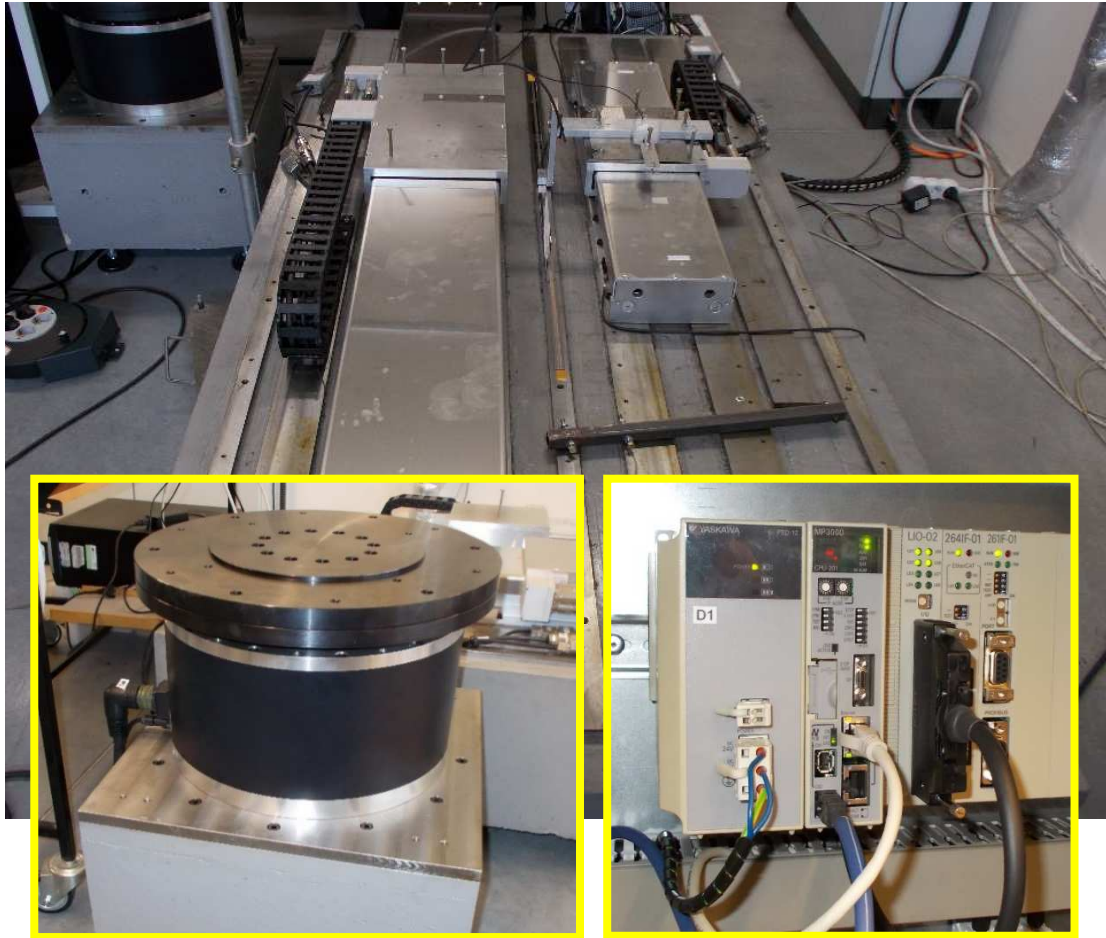


Bild 10 Versuchsstände der direkten Antriebe mit dem Controller der MP3000-Serienreihe

7 Anwendung – Schleifmaschinen von Radialkurvenscheiben

Die BRV-300 CNC Radialkurven-Schleifmaschine *nach Bild 11* ist auf Basis von Baueinheiten namhafter Hersteller gebaut. Dies sind in erster Linie Antriebe, die Schneeberger Linearachse, die GMN-Spindel und der Yaskawa MP2300 Steuercontroller. Der Maschinenrahmen ist als der erste in der Tschechischen Republik mit der Mineralgusstechnik Schneeberger-Technologie hergestellt worden. Das Steuerungssystem wurde in VÚTS auf der Grundlage einer Langzeituntersuchung der Anwendungen der elektronischen Kurvenscheiben, die in das System integriert sind und eine effiziente Steuerung der NC-Produktionsachsen entsprechend den verschiedenen Schleifbedingungen ermöglichen, vollständig entwickelt. Das Steuersystem ermöglicht eine dimensionale Analyse der Kontur einer Kurvenscheibe durchzuführen, ohne das Werkstück von der Maschine zu entfernen. Die Rotations-Interpolationsachse wird durch einen direkten Drehantrieb realisiert, die gleitende Interpolationsachse wird dann von einer Lineareinheit ausgeführt und einem Standard-Drehservomotor angetrieben. In *Bild 12* ist eine Aufzeichnung von Positionsfehlern beider Achsen. Das Schleifen der Kurvenscheibenkontur ist eine Bewegung mit

vernachlässigbaren dynamischen Trägheitskräften, deshalb ist die Hauptproblematik das eigene CNC-Steuerungssystem mit Anforderungen, die die Kurvenscheiben-Schleiftechnologie vorschreibt.



Bild 11 BRV-300 CNC Radialkurven-Schleifmaschine

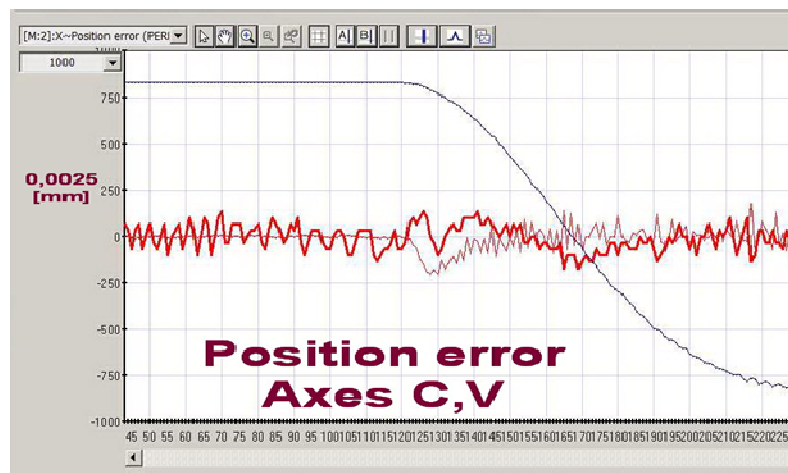


Bild 12 Positionsfehler der C und V - Produktionsachsen

8 Anwendung – Fräsmaschine für Holzlamellen der Zollstöcke

Die Einzigartigkeit der Maschine besteht im Karusselldrehtisch von einem Trägheitsmoment 80 [kgm²] mit 21 gesteuerten Achsen, die Verarbeitung durchführen, basierend auf den Dateien der Bewegungsgesetze (Position, 1. und 2. Ableitung). Der Karusseltisch ist ebenfalls konzeptionell mit einer elektronischen Kurvenscheibe und einer konstanten Übersetzung in der Form vom Axial-Schneckenantrieb konstruiert, der kinematisch als eine axiale Kurvenscheibe mit Schwinghebel und Rolle definiert ist. Auf dem Drehtisch wird das Hauptmerkmal der elektronischen Kurvenscheiben mit dem Hauptanwendungs-Problem demonstriert, welches darin besteht, *die gewünschte Positionsgenauigkeit zu erreichen*. Die Positionsgenauigkeit der bearbeiteten Lamellen wurde in der Größenordnung von Hundertsteln von Millimetern (Achsen-Toleranz der bearbeiteten Konfiguration) benötigt. Diese moderne, elektronisch gesteuerte Maschine ersetzte das Konzept einer klassischen Kurvengelenkmaschine mit einem durch einen Asynchronmotor realisierten Haupt-Zentralantrieb. Es ist ein beispielhafter Einsatz des mechatronischen Lösungsansatzes zur Lösung der Maschine, bei dem ein schneller Wechsel der Bewegungsfunktionen erforderlich ist, bzw. Ändern der bearbeiteten Konfiguration in der Zollstocklamelle.

Folgende Bilder stellen dar:

Bild 13: Eine der möglichen Varianten der bearbeiteten Baugruppe. Die Achsentoleranz der bearbeiteten Baugruppe beträgt 0,05 [mm]. Die Bearbeitung erfolgt über verschiedene Werkzeuge in der ebenen Bewegung der X- und Z-Interpolationsachsen.

Bild 14: CAD-Modell einer kompletten Maschine mit optischen Barrieren mit dem HMI-Bildschirm

Bild 15: Oberer und unterer Bearbeitungspunkt mit X- und Z-Interpolations-NC-Achsen. Die Lamelle wird in einer Position beidseitig bearbeitet. Die Tiefe ist immer konstant und wird basierend auf der Laserstrahldickenmessung der Lamelle gesteuert.

Bild 16: Schematische Darstellung eines Karussell-Drehtisches mit konstantem Übersetzungsverhältnis $i = 40$ zwischen der Servomotor-Welle und der Arbeitsdrehung. Die Axialschnecke ist als axiale Doppelkurvenscheibe mit Schwinghebel und Rolle ausgeführt.

Bild 17: Positionierfehler des Servomotors in allen 16 Positionen. Der Maschinenzklus ist 60 [min-1]. Schrittzeit bzw. Dreh- und Ruhezeit ist 0,5 [sec]. Es war nicht möglich, die Steuerparameterwerte des Servo-Wandlers auf eine „höhere“ Steifigkeit der elektromagnetischen Kopplung Stator/Rotor einzustellen, aus Resonanzgründen einiger Getriebeteile. Die Bearbeitungs-Realzeit ist so auf ca. 0,35 [sec] verkürzt.

Bild 18: Maschine beim Kunden.

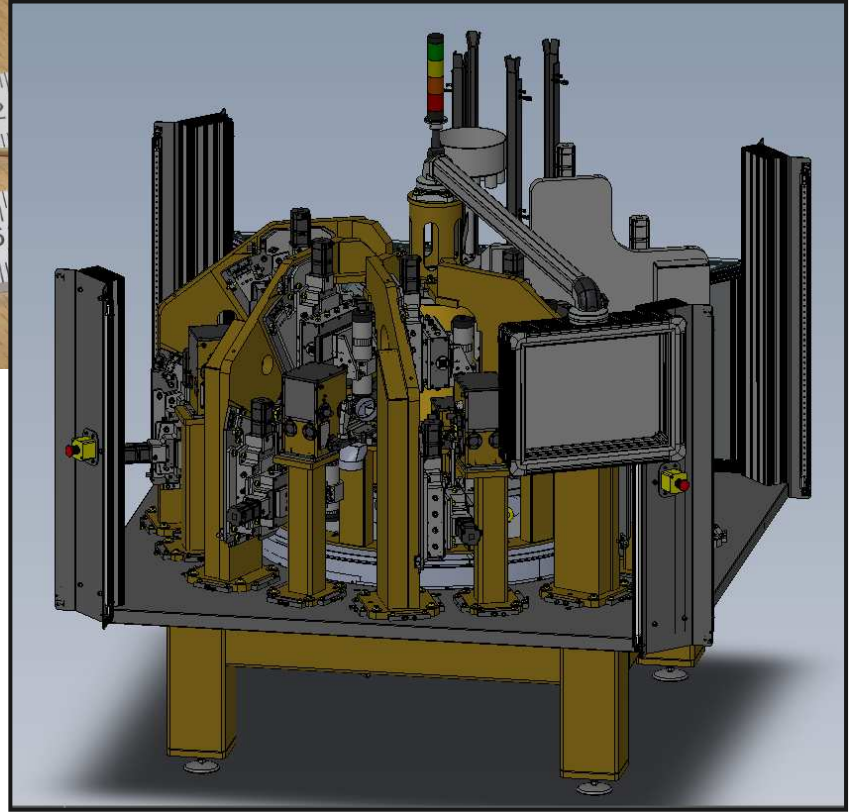
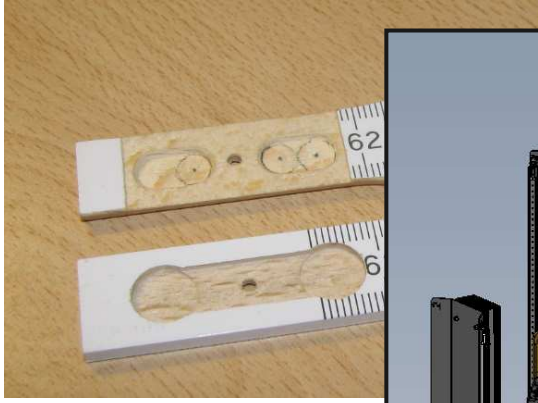


Bild 13 Lamelle des Zollstockes

Bild 14 CAD Maschinenmodell

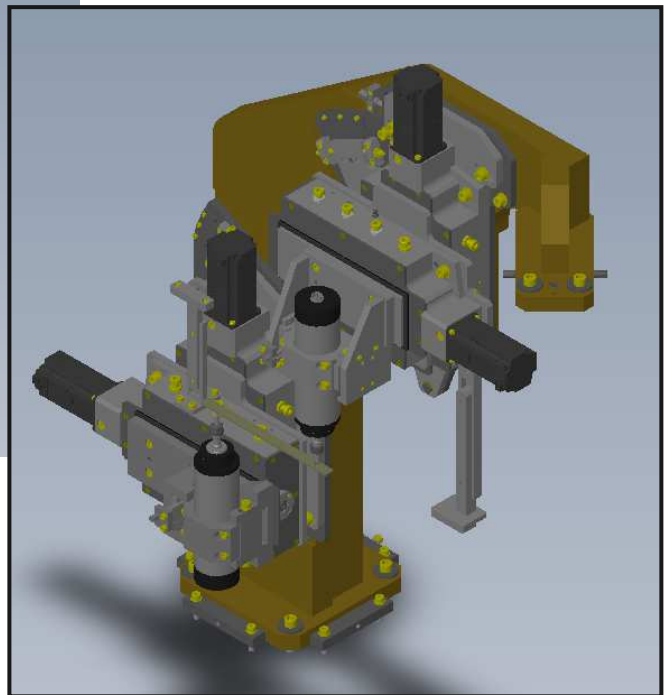
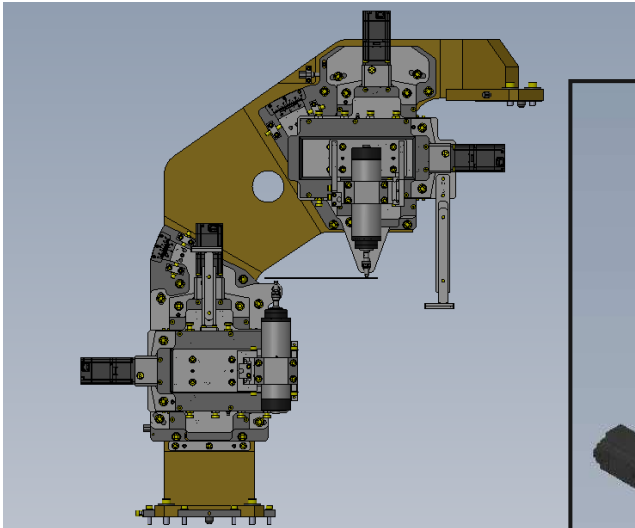


Bild 15 CAD Modell der Bearbeitungsposition

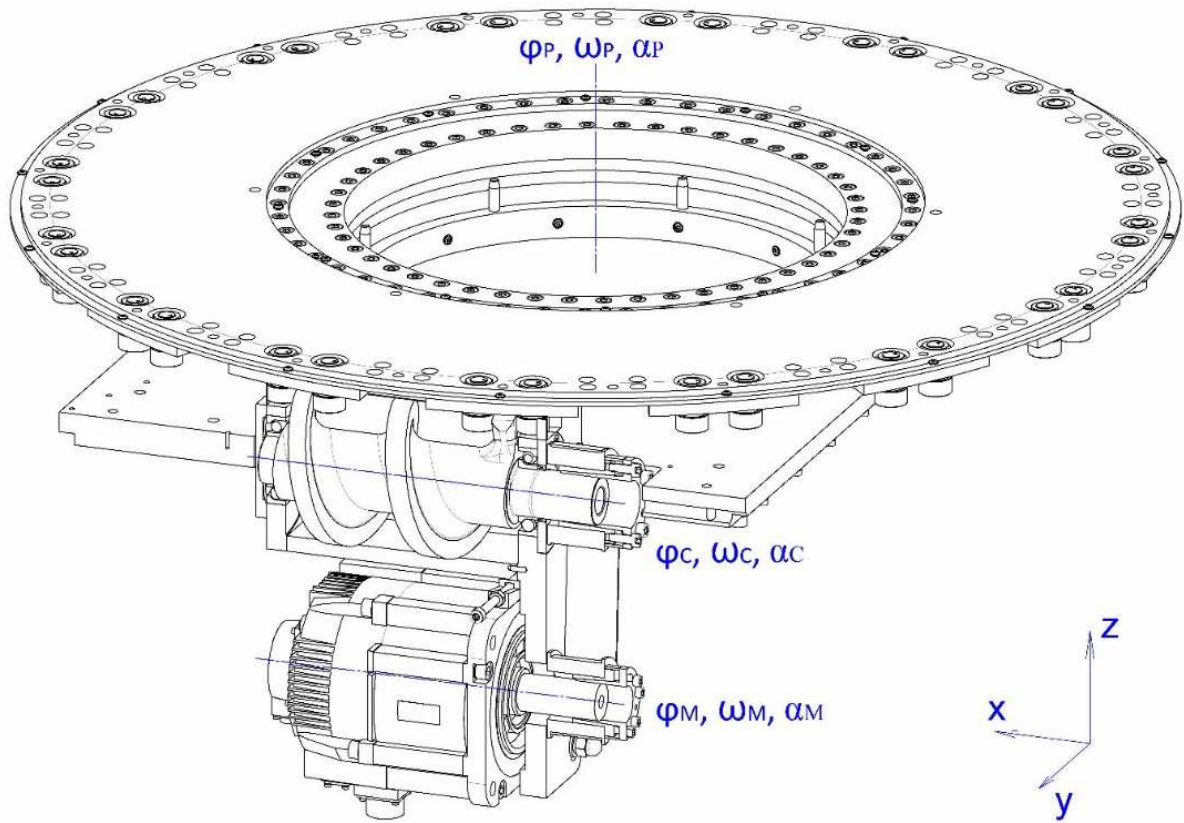


Bild 16 Karussell-Drehmaschine

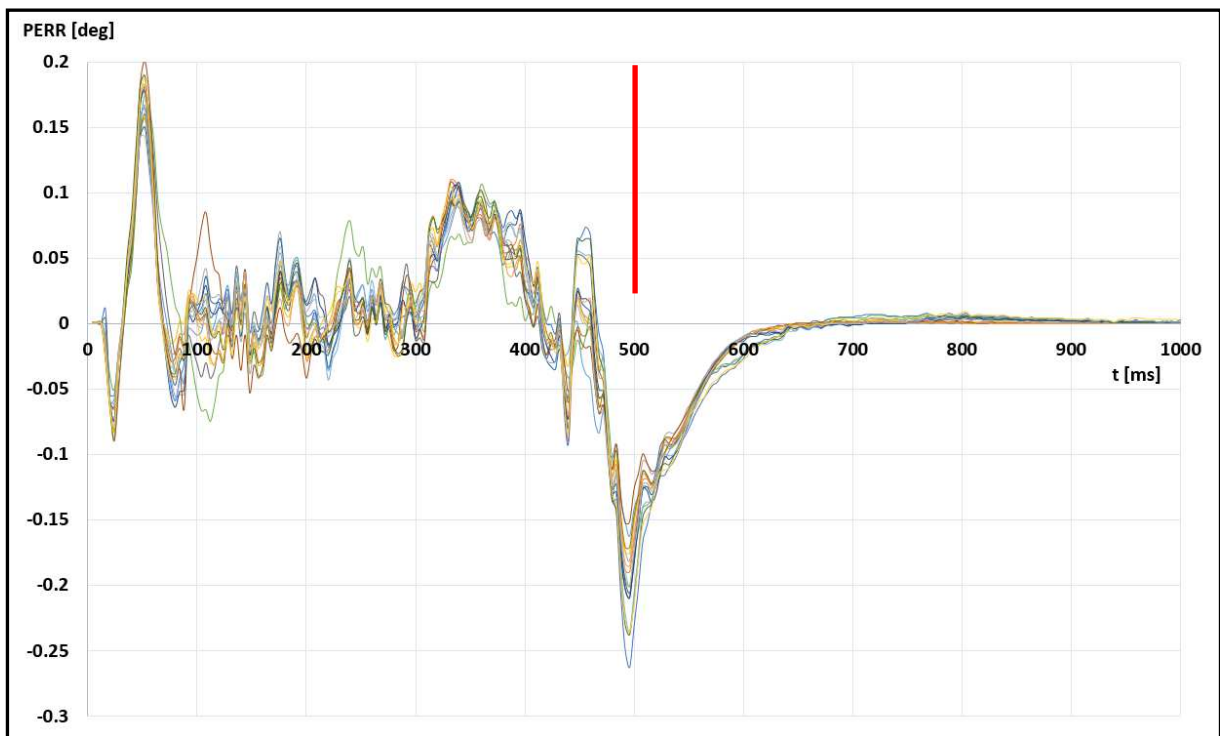


Bild 17 Positionsfehler des Servomotors PERR



Bild 18 Maschine in dem Fertigungsbetrieb des Kunden

9 Schlussfolgerung

Für die Zeitdauer, in der sich VÚTS, a.s., mit dem Thema der elektronischen Kurvenscheiben befasst, wurde eine Reihe von Anwendungen implementiert. Dies ist hauptsächlich die Realisierung von Arbeitsbewegungen von Getrieben der Einzweckmaschinen mit unterschiedlichen Anforderungen an *PERR* Positionierfehler. Es waren schon immer Anwendungen einschließlich kompletter Maschinensteuerungssysteme. Dazu gehören beispielsweise spezielle Holzbearbeitungsmaschinen und interpolierende NC-Achsenantriebe der Schleifmaschine für Radialkurvenscheiben. Als ein großes Problem bei den Anwendungen von elektronischen Kurvenscheiben in ähnlich anspruchsvollen Maschinen sehen wir in der problematischen Abschätzung der Steuerparameter des Servo-Wandlers und in der Größe der passiven Widerstände, die den Positionsfehler beeinflussen. In Anwendungen, in denen hohe Anforderungen an die Genauigkeit der Position von Arbeitselementen mit hoher Dynamik der Trägheitskräfte gestellt werden (Maschine gemäß Kapitel 7), ist dies oft ein sehr riskanter Schritt. Die Anwendungen von elektronischen Kurvenscheiben erfordern in diesen Fällen graduelle Entwicklungsschritte.

10 Literaturverzeichnis

- /1/ Koloc Z., Václavík M.: Cam Mechanisms, Elsevier 1993
- /2/ Václavík M., Jirásko P.: Research and Application of Displacement Laws of Electronic Cams, 12th IFToMM World Congress, Besançon (France), June 18-21, 2007
- /3/ Jirásko P., Dostrašil P., Václavík M.: Approximation of periodic displacement law with Fourier series in the applications of mechanisms with electronic cam.
2015 MeTrApp IGM, Aachen
- /4/ Jirásko P., Dostrašil P., Václavík M.: Approximation of non-periodic step displacement laws with a Fourier series in the applications of electronic cams. 14th World Congress in Mechanism and Machine Science, Taipei, Taiwan, 25-30 October, 2015
- /5/ VDI 2143 Bewegungsgesetze für Kurvengetriebe (Praktische Anwendung), 1987
- /6/ Jirásko P., Bušek M.: Position accuracy of motion functions of electronic cams,
IFTToMM Liberec 2008
- /7/ Volmer J., und Autorenkollektiv: Getriebetechnik-Kurvengetriebe,
VEB Verlag Technik Berlin 1989