Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper“).

doi.org/10.37544/1436–4980–2024–05–6

Eine offene Forschungsplattform

MoNA – Die modulare Werkzeugmaschine

D. Dietrich, O. Jud, D. Kurth, A. Lechler, V. Leipe, M. Nistler, C. Reiff, A. Schulte, L. Steinle, A. Verl

ZUSAMMENFASSUNG Die Herstellung individualisierter Produkte in geringen Stückzahlen kombiniert mit kurzen Innovationszyklen stellt die Produktionstechnik vor Herausforderungen. Rekonfigurierbare Fertigungsanlagen mit flexibler Funktionalität und Technologie können Teil der Lösung sein. Ein neuartiges Konzept für eine modulare Werkzeugmaschine umfasst austauschbare Prozessmodule und eine flexible Steuerung. Die Anlage wird für Forschung auf den Gebieten der Steuerungs-, Regelungs- und Maschinentechnik genutzt.

STICHWÖRTER

Maschinenbau, Konstruktion, Steuerungen

MoNA – The modular machine tool – An open research platform

ABSTRACT Manufacturing of individualized products in small quantities combined with short innovation cycles poses challenges for production technology. Reconfigurable production systems with flexible functionality and technology can be part of the solution. A novel concept for a modular machine tool incorporates interchangeable process modules and a flexible control system. The machine is used for research in the fields of control and machine technology.

1 Einleitung und Motivation

Modulare Werkzeugmaschinen sind in den letzten Jahren in den Fokus von Forschung und Industrie gerückt. Dieser Beitrag beleuchtet die Motivation, die Herausforderungen und zeigt einen konkreten Lösungsansatz zur Umsetzung einer modularen Werkzeugmaschine. Dazu wird im Rahmen des „InnovationsCampus Mobilität der Zukunft“ (ICM) am Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW) der Universität Stuttgart die modulare Werkzeugmaschine MoNA realisiert.

1.1 Motivation

Die traditionelle Fertigungslandschaft ist durch hohe Stückzahlen und Standardisierung geprägt. Gleichzeitig geht der Trend seit einigen Jahren zu immer individuelleren Produkten in kleinen Stückzahlen [1] und zu immer kürzeren Innovationszyklen. Getrieben durch neue Gesetze und Umweltauflagen im Rahmen des „European Green Deal“, der Europa bis 2050 zum klimaneutralen Kontinent machen soll und bereits 2030 eine Senkung der Netto-Treibhausgasemissionen um mindestens 55 % voraussetzt [2]. Bestehende Ansätze konventioneller Werkzeugmaschinen führen aber in vielen Fällen zu ineffizienter Ressourcennutzung, unnötigen Stillstandszeiten und eingeschränkten Möglichkeiten zur Anpassung an sich ändernde Anforderungen. Die Inflexibilität bestehender Fertigungssysteme gilt vor allem für neue Technologien und Kapazitätssteigerungen. Diese sind oft nur mit immensem Aufwand in bestehenden Werkzeugmaschinen umsetzbar, da die Komponenten einer Maschine nicht einfach ausgetauscht oder ersetzt werden können [3]. Dies hat zur Folge, dass für größere Anpassungen aus wirtschaftlichen Gründen eine neue Maschine angeschafft werden muss, was wiederum zwangsläufig mit Emissionen verbunden ist.

Die Motivation für die Entwicklung modularer Werkzeugmaschinen liegt in der Notwendigkeit, diesen Herausforderungen zu begegnen und eine agilere und kosteneffizientere Fertigung zu ermöglichen, die kurze Innovationszyklen unterstützt. Die Anpassungsfähigkeit und Flexibilität modularer Werkzeugmaschinen bietet einen vielversprechenden Lösungsansatz für diese Herausforderungen.

Durch die Modularisierung wird eine Entkopplung der einzelnen Maschinenkomponenten erreicht. So können diese unabhängig voneinander ausgetauscht oder ergänzt werden. *Stehle et al.* [4] beschreiben diesen Prozess als (Re-)Konfiguration, ein Begriff, den *Koren et al.* bereits 1999 geprägt haben [5]. Dabei können die Funktionalität (in Bezug auf die Bearbeitungstechnologie), die Kapazität (in Bezug auf das Produktvolumen) und die eingesetzten Technologien jederzeit und innerhalb kürzester Zeit angepasst werden.

Dazu sind definierte und möglichst universell kompatible Schnittstellen sowohl auf der Hard- als auch auf der Softwareseite erforderlich. Die einzelnen Module sollten dabei funktionsorientiert ausgewählt und gekapselt werden.

1.2 Zielsetzung der Forschung

Ziel der Forschung ist es, Konzepte zu entwickeln und zu untersuchen, wie modulare Werkzeugmaschinen in Zukunft gestaltet werden können. Dabei werden sowohl die mechanische

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-05-6 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

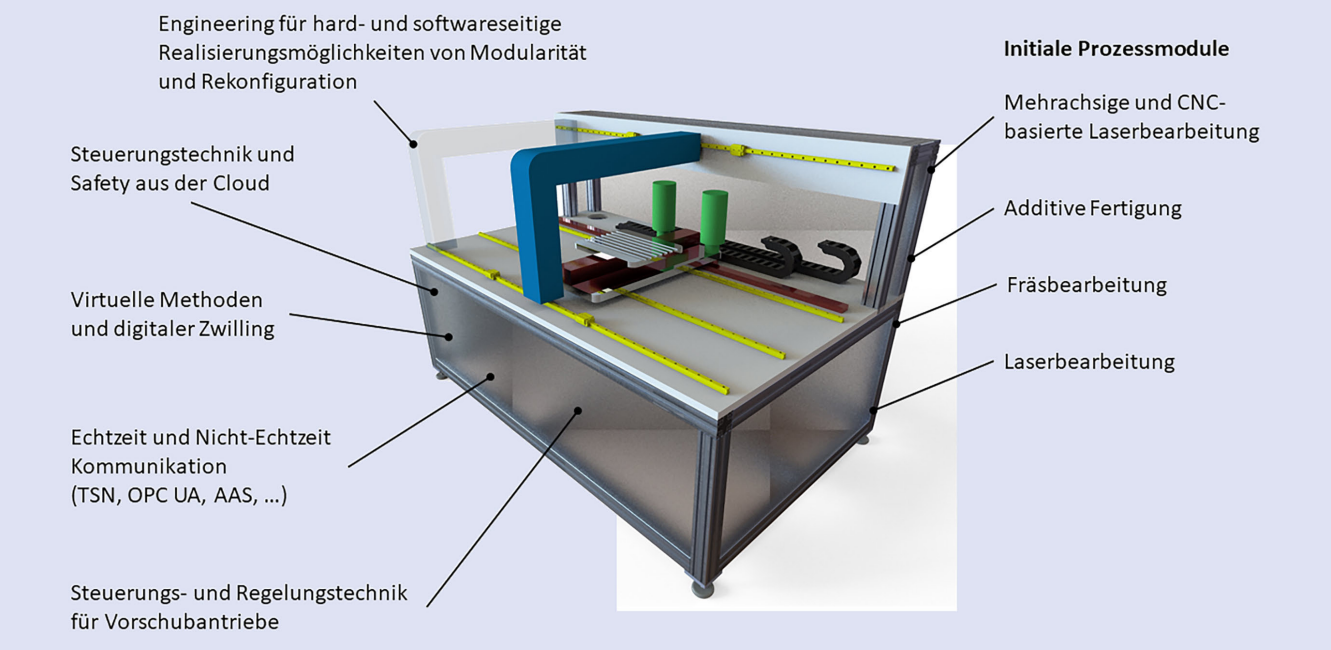

Bild 1. Am ISW adressierte Forschungsthemen an MoNA. *Foto: ISW*

und elektrische Konstruktion als auch die Steuerungsarchitektur, die Kommunikation und die Inbetriebnahme bei der Rekonfiguration betrachtet.

Bild 1 zeigt die Forschungskomplexe, die im Rahmen der am ISW entstehenden modularen Werkzeugmaschine MoNA adressiert werden.

Primäres Ziel ist die Realisierung einer Werkzeugmaschine mit austauschbaren Prozessmodulen. Die Prozessmodule werden über Portale in die Maschine eingebracht. Die steuerungstechnische Integration der Portale erfolgt über standardisierte Schnittstellen, die eine Inbetriebnahme des Portals während des Betriebs ermöglichen. Die modularen Werkzeugmaschinen der Zukunft erfordern eine hochflexible Steuerungsarchitektur für eine nahtlose Integration und Rekonfiguration von Prozessmodulen.

Die Konstruktion und Entwicklung modularer Werkzeugmaschinen erfordert einen ganzheitlichen Ansatz, der mechanische, elektrische, steuerungs- und kommunikationstechnische Aspekte berücksichtigt. Nur mit integriertem Ansatz können die Vorteile voll ausgeschöpft und die Effizienz und Flexibilität der Fertigungsprozesse maximiert werden.

Im Folgenden wird zunächst die Konzeption, Auslegung und Konstruktion der modularen Werkzeugmaschine beschrieben. In Kapitel 3 wird die zugrunde liegende Steuerungsarchitektur und in Kapitel 4 werden die im ersten Schritt geplanten Prozessmodule vorgestellt. Abschließend werden eine Zusammenfassung und ein Ausblick gegeben.

2 Mechanische Entwicklung und Konstruktion

Der Konstruktionsprozess des Gesamtsystems orientiert sich an der allgemeinen Vorgehensweise der Produktentwicklung (vergleiche VDI 2221). Dabei werden zunächst grundlegende mechanische und mechatronische Komponenten vorausgewählt und mit den Werkzeugen der allgemeinen Anforderungsanalyse bearbeitet. Dies umfasst die Erstellung eines umfassenden Anforderungskataloges, die Durchführung einer Analyse zur Vorauswahl und die Bewertung geeigneter Lösungsvarianten mittels morphologischem Kasten und Auswahlliste. Nach der Vorauswahl und der endgültigen Entscheidung über eine Bewertung mit der Scoring-Methode nach [6] erfolgt der eigentliche Konstruktionsprozess mit dem Ziel eines detaillierten Gesamtkonzeptes.

2.1 Anforderungen an das mechatronische Gesamtsystem

Um den Entwicklungs- und Konstruktionsprozess detailliert und definiert durchlaufen zu können, war zunächst die Erstellung eines Anforderungskatalogs nötig. In diesem wurden Anforderungen und Wünsche formuliert, welche das zu entwerfende Gesamtsystem definieren und mit wichtigen Randbedingungen für die Entwicklungsschritte versehen.

Zuerst wurden die initialen Anforderungen an das mechatronische Gesamtsystem aufgestellt, wobei im weiteren Verlauf eine feindisperse Betrachtung für die Anforderungen an Mechanik und Steuerungstechnik durchgeführt wurde. Wesentliche Bewertungskriterien zur Differenzierung waren, neben der Bauraumbegrenzung, die Möglichkeit zur Untersuchung unterschiedlichster Forschungsthemen, die Skalierbarkeit der Forschungsergebnisse, die Umsetzung verschiedener Fertigungstechnologien wie etwa 3D-Druck, Fräsen sowie die Bearbeitung mittels Laserstrahl, die Erweiterbarkeit der Prozesse, Mechanik, Steuerungskomponenten und somit der Forschungsthemen durch Modularität sowie die schnelle Um- und Rekonfiguration. Gemäß VDI 2221 wurden die sich aus dem morphologischen Kasten ergebenden Lösungsvarianten abschließend hinsichtlich der definierten Hauptanforderungen bewertet.

Die **Tabelle** zeigt die Hauptanforderungen mit den jeweiligen Gewichtungsfaktoren. Zur Bewertung der Entwurfsansätze wurde die Scoring-Methode nach [6] verwendet. Dabei wurde jeder Hauptanforderung ein Gewichtungsfaktor zugeordnet. Die jeweilige Gewichtung wurde mit einem Wert zwischen eins (nicht

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-05-6 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

Tabelle. Hauptanforderungen und Score des präferierten Konstruktionskonzepts.

Hauptanforderung	Lösung	Score	Gewichtung	Punkte
Bauraum	Schweißgestell, Begrenzung für Transportierbarkeit	3	25 %	0,75
Forschung an Produktionsanlage	Modularität, austauschbare Prozessmodule, Rapid-Control-Prototyping-System, flexibler Schaltschrank	4	20 %	0,80
Skalierbarkeit der Ergebnisse	Verwendung von Industriekomponenten	3	5 %	0,15
Flexibilität hinsichtlich Fertigungstechnologien	Erweiterbare Prozessmodule für Portale, flexibler Schaltschrank	4	20 %	0,80
Erweiterbarkeit durch Modularität	fester Grundaufbau und austauschbare Prozess-portale mit standardisierten Schnittstellen	4	15 %	0,60
Um- und Rekonfiguration	Standardisierte Schnitt-stellen, austauschbare Portale, flexible Steuerung	4	15 %	0,45
GESAMTBEWERTUNG	-	-	-	3,7/4 (92,5 %)

erfüllt) und vier (vollständig erfüllt) multipliziert und als Dezimalzahl dargestellt. Anschließend wurde die Summe aller Punktzahlen gebildet. Nachfolgend ist diese Bewertung für die bevorzugte Lösungsvariante dargestellt.

Die Vorauswahl zeigt, dass das bevorzugte Konstruktionskonzept ein geschweißtes Gestell aufweist und somit hinsichtlich des Bauraums gut geeignet ist. Die Bewertung mit nur 3 von 4 Punkten ergibt sich aus der Größe der Gesamtanlage. Die Modularität durch standardisierte Prozessportale sowie standardisierte Schnittstellen ist gegeben und wird dementsprechend mit sehr gut bewertet. Die Skalierbarkeit der Ergebnisse auf beliebige andere Anlagen ist durch die Verwendung von Industriekomponenten und relevanten Antriebssystemen gegeben und wird ebenso wie die Um- und Neukonfiguration mit 3 von 4 Punkten bewertet. Einschränkungen in der Skalierbarkeit bilden primär mechanische Grenzen. Wesentliche Anforderungen wie die Abbildung unterschiedlicher Prozesse sowie die Modularität können jedoch durch die Maschine sehr gut erfüllt werden. Hier sei ergänzt, dass auch bei der Durchführung unterschiedlicher Fertigungsprozesse der Fokus auf den Forschungsfragen im Bereich Steuerungstechnik liegt. Obwohl die Portalbauweise für Prozesse mit hohen Bearbeitungskräften nicht optimal ist, können sie auf der Maschine abgebildet werden und Untersuchungen zur Steuerung und Regelung angewendet werden.

Mit einer Bewertung von über 90 % erfüllt das Anlagenkonzept alle Hauptanforderungen sehr gut. Aufgrund der etwas geringeren Gewichtung der Skalierbarkeit beziehungsweise der Um- und Neukonfiguration kann das Gesamtergebnis hier als sehr gut bewertet werden.

2.2 Ausarbeitung des mechatronischen Systems

Auf Basis des erarbeiteten Konzeptes erfolgte im nächsten Schritt die Detaillierung, die Auswahl der Komponenten und die endgültige Konstruktion der Maschine. Randbedingung war der gewählte maximale Bauraum von 2,6 m Breite, 1,6 m Tiefe und 2,2 m Höhe. Entsprechend den Anforderungen und der Konzeptauswahl besteht die Maschine aus einer festen Grundstruktur und Prozessmodulen. Der Grundaufbau enthält das Schweißgestell, eine sichere Einhausung und die Grundachsen bestehend aus X-Y-Aufbau und Dreh-Schwenktisch. Die Prozessmodule sind als verschiebbare, aber während des Betriebs statische Portale in der Maschine ausgeführt, an denen neben dem Endeffektor eine Z-Achse montiert werden kann. Dadurch sind bei einem Modulwechsel keine Umbauten an der restlichen Maschine notwendig, was eine kurze Umbauphase und schnelle Wiederinbetriebnahme ermöglicht.

Ein stabiler Schweißrahmen, der für die Aufnahme der auftretenden Kräfte ausgelegt ist, bildet das Fundament der Maschine. Er nimmt die erforderlichen Schaltschränke und zwei Serverracks auf. Die Schaltschränke enthalten E/A-Module mit einer Vielzahl von digitalen und analogen Ein- und Ausgängen sowie die Umrichter für die Motoren. In den Serverracks sind der Steuerungs-IPC (Industrie-PC), ein Rapid-Control-Prototyping-System (RCP) sowie eine Lasersteuerung untergebracht. Auf die Steuerungsarchitektur und die verwendeten Komponenten wird in Kapitel 3 näher eingegangen.

Auf dem Grundgestell ist eine Grundplatte mit entsprechenden Schnittstellen zur Befestigung der Schutzumhausung und der Grundachsen angebracht. Die Bewegung des Maschinentisches in der X-Achse wird durch einen elektrisch verspannten Zahnstangen-Ritzel-Antrieb (ZRA) ermöglicht. Diese Art von Vorschubantrieben wird bevorzugt bei langen Verfahrwegen und hohen Lasten eingesetzt [7]. Im Gegensatz zu einem Kugelgewindetrieb (KGT) nimmt die Steifigkeit nicht mit der Verfahrlänge ab, sodass der Verfahrweg beliebig skaliert werden kann. Das Umkehrspiel, das bei Richtungsumkehr zwischen Ritzel und Zahnstange auftritt, wirkt sich negativ auf die Systemgenauigkeit aus. Eine Möglichkeit, das Umkehrspiel zu kompensieren, ist die elektrische Verspannung [8]. Dazu werden zwei redundante Antriebe

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-05-6 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

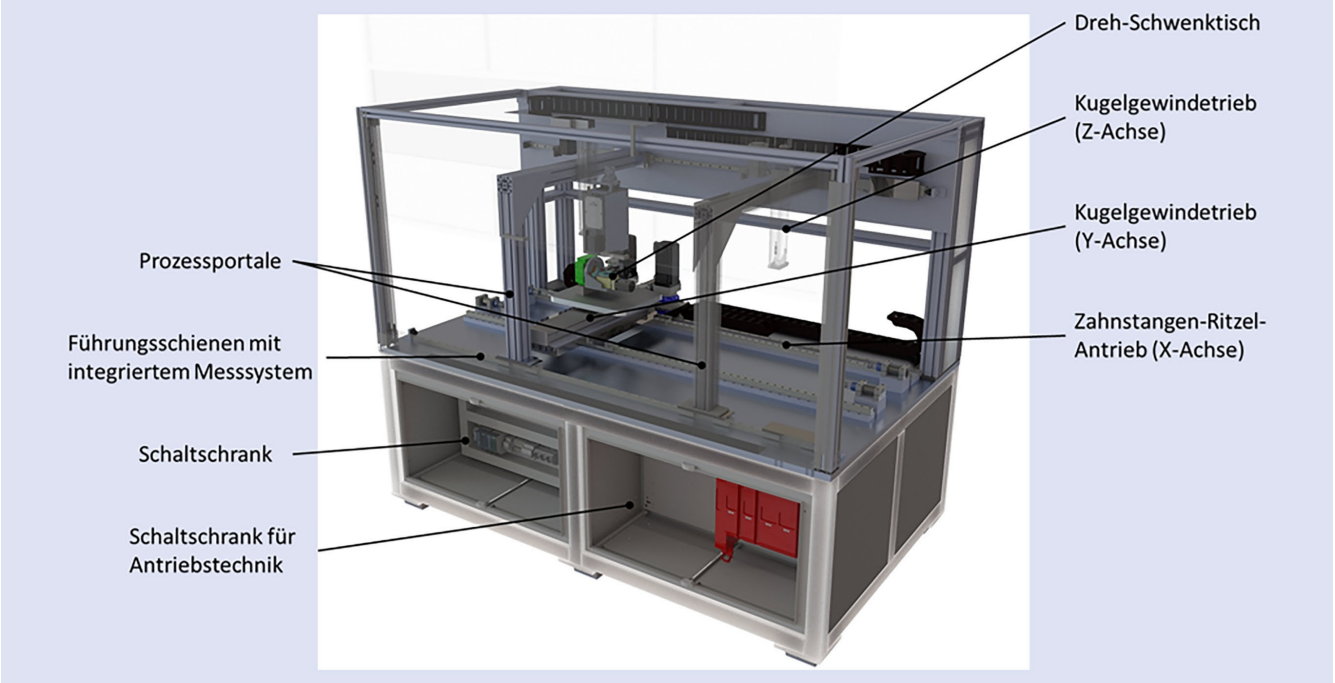

Bild 2. Konstruktion der modularen Maschine. *Foto: ISW*

durch die Antriebsregelung gegeneinander verspannt. Es besteht jedoch die Möglichkeit, die Maschine auf einen Einzelantrieb umzurüsten. Somit können wissenschaftliche Untersuchungen sowohl für die Konfiguration mit Einzelantrieb als auch für das verspannte System durchgeführt werden. Ein KGT dient als Y-Achse. So stehen die beiden relevantesten Antriebssysteme für Werkzeugmaschinen [9] für Untersuchungen zur Verfügung.

Auf der Y-Achse ist ein Maschinentisch montiert, sodass die Anlage in einer 3-Achs-Konfiguration betrieben werden kann. Gleichzeitig ist die Montage eines Dreh-/Schwenktisches mit fest verlegten Verbindungskabeln vorgesehen, sodass ein 5-Achs-Betrieb möglich ist. Um eine hohe Bearbeitungsgenauigkeit zu gewährleisten, sind in allen Linearachsen absolute Messsysteme verbaut.

Eine Schutzumhausung vervollständigt den Grundaufbau der Maschine. Da verschiedenste Prozesse und vor auch die Laserbearbeitung abgebildet werden, ist eine geschlossene Einhausung vorgesehen. Laserschutzfenster und in den Arbeitsraum eingebaute Kameras ermöglichen im Betrieb dennoch einen ausreichenden Einblick in die laufenden Prozesse.

Der Zugang zur Maschine erfolgt über eine automatisch betriebene Hubtür, die zusätzlich die Einbindung in eine automatisierte Produktionskette ermöglicht und zum Beispiel die Be- und Entladung durch ein fahrerloses Transportsystem zulässt. **Bild 2** zeigt den Aufbau der Maschine mit den Hauptkomponenten.

2.3 Prozessmodule

Um verschiedene Prozesse auf der Maschine abbilden und schnell umrüsten zu können sowie eine spätere Erweiterbarkeit zu gewährleisten, sind für verschiedene Prozesse einzelne Portale vorgesehen, welche den Endeffektor für den Prozess über den Grundachsen positionieren. Da je nach Prozess eine unterschiedliche Höhenpositionierung erforderlich ist, werden die Z-Achsen an das jeweilige Portal angebaut.

Die Portale werden über Führungsschienen vor den Grundachsen und an der Rückseite des Gestells geführt und können bei geringen Prozesskräften über Klemmelemente oder zur Erhöhung der Steifigkeit über vordefinierte Raster fixiert werden. Die hintere Führungsschiene ist zusätzlich mit einem Messsystem ausgestattet, sodass die Position der Portale nach Rekonfiguration bekannt ist und in der Steuerung berücksichtigt werden kann. Auf den Führungsschienen sind Führungswägen mit Adapterplatten montiert, sodass das Portal mit geringem Aufwand demontiert oder ein neues Portal montiert werden kann. Neben der mechanischen Befestigung sind für jedes Portal eine standardisierte Stromversorgung und Busanbindung vorgesehen.

3 Steuerungsarchitektur

Neben der mechatronischen Auslegung der Werkzeugmaschine ist auch die Steuerungsarchitektur zu konzipieren. Anforderungen ergeben sich zum einen aus der Modularisierung der Maschine selbst, wobei zentrale, durchgängige Komponenten sowie die flexible Anbindung der Prozessportale realisiert werden müssen. Zudem ergeben sich aus den verschiedenen geplanten, aber auch unbekannten zukünftigen Prozessen Anforderungen, etwa an die notwendige Kommunikation und die Zykluszeiten der Prozessdaten.

Um eine Forschungsplattform für vielseitige Projekte zu bieten, müssen Schnittstellen auf verschiedenen Hierarchieebenen der Steuerung ermöglicht werden. Dies betrifft Ebenen von der Antriebsregelung mit RCP-Systemen über die speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) und die numerische Steuerung (CNC) bis hin zu externen Schnittstellen zur Steuerung aus der Cloud oder dem plattformunabhängigen Datenaustausch über Open Platform Communications Unified Architecture (OPC UA). Zentraler Bestandteil ist die Anbindung von digitalen Zwillingen mit variabler Modelltiefe, welche die physikalischen Eigenschaften der realen Maschine in unterschiedlichen Detaillierungsgraden

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-05-6 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

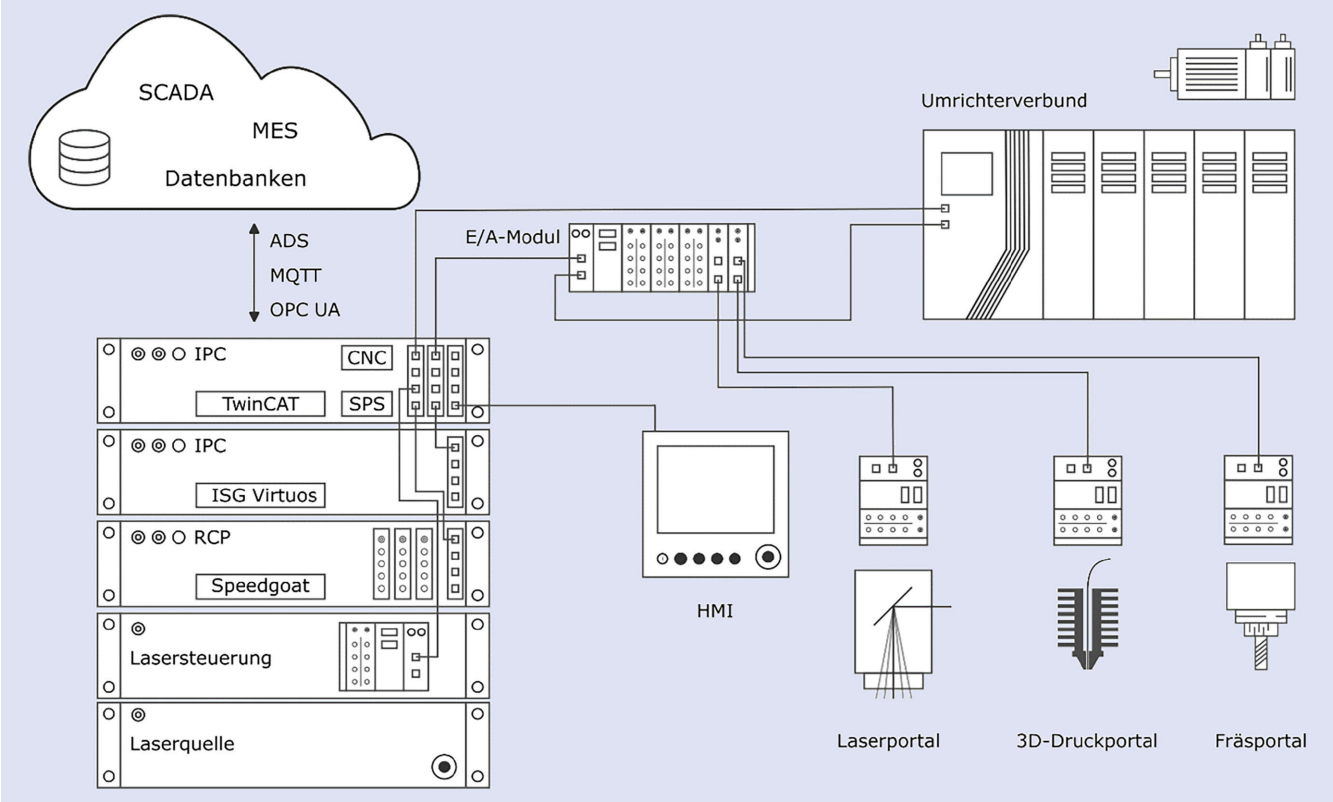

Bild 3. Schematische Darstellung der in der modularen Werkzeugmaschine verwendeten Steuerungsarchitektur. Die abgebildeten Leitungen stellen EtherCAT-Verbindungen dar. *Grafik: ISW*

enthalten. In den folgenden Abschnitten wird ein Überblick über die entworfene Steuerungsarchitektur gegeben. Abschließend wird auf die Kommunikation eingegangen, die die angestrebte Modularisierung ermöglicht.

3.1 Übersicht

Eine Übersicht der Steuerungsarchitektur ist in **Bild 3** dargestellt.

Die Basis bildet ein PC-basiertes Steuerungssystem, bestehend aus einem Industrie-PC (IPC) für die Logik- und Bewegungssteuerung in TwinCAT 3. Ergänzt wurde diese durch ein Speedgoat-RCP-System zur zeiteffizienten Entwicklung und Erprobung von Regelungs- und Steuerungsfunktionen nach den Prinzipien des „Model Based Design“ [10]. Ein weiterer IPC ermöglicht die betriebsbegleitende Echtzeitsimulation eines digitalen Zwillings in „ISG Virtuos“. Als einheitlicher Feldbus für alle Komponenten kommt EtherCAT als Ethernet-basierter Feldbus zum Einsatz. Der IPC mit der TwinCAT-Steuerung bildet dabei den EtherCAT-Master. Die Echtzeitsimulation in Virtuos ist ebenfalls über EtherCAT angebunden und bildet das Simulationsmodell und den Feldbus als Verhaltensmodell mit zusätzlicher 3D-Simulation ab. Dies erlaubt sowohl die virtuelle Inbetriebnahme als auch Simulationen parallel zum Betrieb. Dadurch ist zum Beispiel eine Kollisionsüberwachung möglich [11]. Es bestehen vielfältige Integrationsmöglichkeiten von Schnittstellen wie OPC UA oder Message Queuing Telemetry Transport (MQTT). Darüber hinaus können über das TwinCAT-Kommunikationsprotokoll Automation Device Specification (ADS) eigene Schnittstellen zur Anbindung an die Cloud umgesetzt werden, die direkten Zugriff auf die SPS und CNC in der Steuerung ermöglichen. Zusätzlich sind Anwendungen denkbar bei denen Steuerungsteile in die Cloud [12] oder die on-premise cloud [13] ausgelagert werden.

So entsteht eine hybride Steuerungsarchitektur der Maschine. Hybrid bezieht sich in diesem Zusammenhang auf den kombinierten zentralen und dezentralen Ansatz der Steuerungsarchitektur. Die fest verbauten Komponenten der Maschine - das RCP, die Umrichter der Hauptachsen, die Maschinenperipherie und die Lasersteuerung - sind in einem zentralen Schaltschrank oder Serverschrank untergebracht und direkt mit der zentralen Steuerung gekoppelt. Zu den dezentralen Komponenten gehören das Human Machine Interface (HMI) sowie die E/A-Module der einzelnen Prozessportale. Im Folgenden wird diese Steuerungsarchitektur näher beschrieben.

3.2 Zentrale Steuerungseinheit

Die zentrale Steuerungseinheit der Maschine bildet eine Linientopologie aus der zentralen IPC (TwinCAT-Steuerung und EtherCAT-Master), einem Eingangs- und Ausgangs-E/A-Modul für die zentrale Peripherie und dem genannten Umrichterverbund. Die Achssollwerte werden von der TwinCAT-CNC berechnet und über den Feldbus an die Umrichter übertragen, auf denen üblicherweise die Achsregelung berechnet wird. Zur Erforschung und Entwicklung neuartiger Regelungsverfahren können Teile der Antriebsregelung auf das RCP-System ausgelagert werden. Dieses ermöglicht die freie Implementierung von Embedded Software auf einem Unix-basierten Echtzeitbetriebssystem sowie das Prototyping von in Hardware realisierten Funktionen durch ein integriertes Field Programmable Gate Array (FPGA). Auf diese

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-05-6 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

Weise können beispielsweise modellbasierte oder lernende Regelungsverfahren an industrieller Antriebstechnik getestet und optimiert werden, bevor sie auf die entsprechende Zielhardware übertragen werden.

Die E/A-Module der Prozessportale der modularen Werkzeugmaschine sowie das RCP sind in einer sternförmigen Architektur an den zentralen IPC angebunden. Diese Architektur wird im Folgenden näher erläutert.

3.3 Dezentrale Module

Alle dezentralen E/A-Module, bis auf die HMI, sind über den Feldbus EtherCAT in einer Sterntopologie mit dem zentralen Buskoppler verbunden. So können diese Module flexibel ausgetauscht werden. Durch die EtherCAT Hot-Connect-Funktionalität ist ein Austausch bei laufender Anlage möglich. Dazu werden EtherCAT-Buskoppler mit ID-Switch eingesetzt. Diese erhalten eine eindeutige ID, die eine Einbindung in die Kommunikation unabhängig von der Position in der Bustopologie ermöglicht. In der Steuerung können so die einzelnen Prozessmodule auch nach dem Aus- und Einbau entsprechend zugeordnet werden. Damit kann auch den unterschiedlichen Anforderungen an Modularität in der Steuerung und Echtzeitkommunikation Rechnung getragen werden.

Damit die Module auch seitens der SPS flexibel austauschbar sind, sind alle Programmbausteine modularisiert und gekapselt. So entstehen im Steuerungsprojekt keine Abhängigkeiten, welche dazu führen, dass Prozessportale voneinander abhängig sind. Zudem können durch die Kapselung Programmbausteine automatisiert auf ihre Funktion getestet werden. Aufbauend auf der Modularisierung der Softwareschnittstellen wird ein modulares Stecksystem genutzt, um die Portale zu versorgen und anzubinden. Das Stecksystem enthält standardmäßig unter anderem die Spannungsversorgung mit 24, 48 und 230 V. Zusätzlich werden Pneumatik, EtherCAT und frei belegbare Kabel zur Verfügung gestellt.

4 Die Prozessmodule

Initial sind drei Prozessmodule vorgesehen. Eines für die Laserbearbeitung, eines für die spanende Fertigung und eines für die additive Fertigung. Die Prozessmodule können aufgrund des modularen Maschinenaufbaus und der modularen Steuerungsarchitektur sowohl unabhängig voneinander als auch in Kombination miteinander betrieben werden. Im Folgenden werden die einzelnen Module näher beschrieben.

4.1 Laser-Modul

Kernstück des Laserprozessmoduls ist ein dreiachsiger Galvanometer-Scanner (Axialscan Fiber-30, Firma Raylase), der auf einer höhenverstellbaren Lineareinheit montiert ist. Mit dem Galvanometer-Scanner kann ein Laserstrahl mit hoher Dynamik bewegt werden. Mit der dritten Achse kann zusätzlich der Fokus dynamisch eingestellt werden. Somit können auch dreidimensionale Werkstücke bearbeitet werden. In Kombination mit einem 2-kW-Faserlaser („TrueFiber 2000“, Firma Trumpf) ergeben sich verschiedene Anwendungsmöglichkeiten wie Gravieren, Markieren, Strukturieren und Remote-Schneiden.

Durch die am ISW entwickelte offene Steuerungsarchitektur kann auf die sonst üblichen Scannersteuerkarten verzichtet werden [14]. Konventionelle Steuerkarten besitzen keinen echtzeitfähigen Feldbus, über den Sollwerte für die Scannerachsen übertragen werden können. Stattdessen übertragen sie die Sollwerte in Form von vordefinierten Listen, wodurch eine echtzeitfähige Anbindung der Scannerachsen an das restliche System nicht einfach möglich ist.

Im Rahmen von Forschungsarbeiten wurde am ISW eine Scannersteuerung auf Basis von Beckhoff TwinCAT und Oversampling-Busklemmen entwickelt. Die Scannerachsen werden wie bisherige mechanische Achsen in das Steuerungsprojekt integriert und mit der CNC angesteuert. So können sie synchron zu allen anderen Achsen der Anlage kommandiert werden. In Kombination mit den XY-Grundachsen der Maschine und der Z-Achse des Portals entsteht ein redundantes System, das den Arbeitsraum des Scanners erweitert. Durch den vorhandenen Dreh-/Schwenktisch ergibt sich zusätzlich die Möglichkeit der mehrachsigen Laserbearbeitung.

4.2 Fräs-Modul

Das Fräsmodul soll langfristig für Forschungsarbeiten zum Thema software-definierte Wertstromprozesssysteme eingesetzt werden. Im Zuge des Forschungsprojekts soll gezeigt werden, wie durch den Austausch modularer Maschinenkomponenten die Eigenschaften der Maschine im Hinblick auf den Prozess optimiert werden können. Dabei stehen beispielsweise Eigenschaften wie Dynamik und Steifigkeit im Vordergrund. So verfügt das Fräsmodul neben einer Z-Achse über eine redundante Y-Achse. Je nach Anforderung, wie Wechsel von der Fräsbearbeitung von Stahl zur Bearbeitung von auf der Anlage gedruckten Kunststoffbauteilen, können die Eigenschaften durch Austausch dieser Achsen variiert werden. Für höhere Anforderungen bei der Bearbeitung festerer Materialien besteht zudem die Möglichkeit, ein Versteifungsportal ohne eigenes Prozessmodul mit dem Fräsmodul zu verbinden, um so die Steifigkeit des Fräsaufbaus zu erhöhen.

Diese Untersuchungen werden in Zusammenarbeit mit Partnerinstituten der Universität Stuttgart und dem Karlsruher Institut für Technologie durchgeführt. Für die software-definierten Wertstromprozesssysteme werden Ansätze der Wertstromkinematiken [15] weiter gedacht, um Hardware durch Modularität flexibler zu gestalten. Weitere Forschungsinhalte sind zum Beispiel die Integration von Prozesssimulation [16] in einen automatisierten Auslegungs- und Konfigurationsprozess der Maschine oder die Entwicklung eines Multisensor-Multiprozess-Endeffektors [17].

4.3 3D-Druck-Modul

Das 3D-Druck-Modul für die additive Fertigung nutzt das Schmelzschichtverfahren (englisch: Fused Filament Fabrication, FFF), bei dem schichtweise geschmolzene Kunststoffstränge auf einem Tisch abgelegt werden. Als Werkstoffe werden Thermoplaste mit einer Verarbeitungstemperatur zwischen 170 und 230 °C verwendet. Sie erstarren durch den Temperaturunterschied beim Ablegen auf dem Tisch und werden dadurch geometrisch stabil. Auf diese Weise können nach und nach mehrere Kunststoffschichten aufgetragen und somit unterschiedlichste Geometrien gedruckt oder Bauteile hergestellt werden.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-05-6 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

Das 3D-Druckmodul beziehungsweise die Druckkopfeinheit besteht im Wesentlichen aus drei anzusteuernden Elementen: einer Materialtransporteinheit, meist ein Schritt- oder Servomotor, der das drahtförmige Ausgangsmaterial mittels eines Rändels transportiert, einer Heizspirale, die den thermoplastischen Kunststoff durch Wärmeübertragung aufschmilzt und einem Temperatursensor, der zur Regelung auf die gewünschte Verarbeitungstemperatur benötigt wird. Die dazu nötige Steuerungshardware befindet sich modular in der Nähe des Druckkopfes und ist zum Datenaustausch mit der Kinematik über EtherCAT verbunden. Durch die synchrone Ansteuerung der kartesischen Achsen mit dem Druckkopf kann der Prozess vollständig automatisiert und in das modulare Anlagenkonzept integriert werden. Da dem Prozess eine 5-Achskinematik zur Verfügung steht, können steuerungstechnische Forschungsthemen adressiert werden, wie etwa die mehrachsige Bahnplanung von Extrusionsprozessen und Strategien zur Stützstrukturvermeidung. Weitere Anwendungsgebiete ergeben sich durch die Kombination mit den übrigen Modulen. Insbesondere die Betrachtung hybrider Prozesse aus konturnahen gedruckten Halbzeugen mit anschließender subtraktiver Fertigung zeigen Potenziale auf.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Der Trend zu individualisierten Produkten in kleinen Stückzahlen und verkürzten Innovationszyklen stellt die Produktionstechnik vor große Herausforderungen. Vor allem die mangelnde Flexibilität bestehender Produktionsanlagen erschwert die effiziente Fertigung häufig wechselnder Bauteile. Modulare Werkzeugmaschinen bieten hier einen vielversprechenden Lösungsansatz. Sie ermöglichen eine flexible Anpassung von Funktionalität, Kapazität und Technologie innerhalb kurzer Zeit und erlauben so eine agile und kosteneffiziente Fertigung.

Dennoch sind sowohl die Ansätze modularer Werkzeugmaschinen als auch das vorgestellte Konzept zur Realisierung kritisch zu hinterfragen. Trotz der erstrebten Flexibilität können zusätzliche Aufwände für die Rekonfiguration der Anlage entstehen, während ungenutzte Module die Produktivität im Vergleich zu spezialisierten Werkzeugmaschinen verringern. In Bezug auf das vorgestellte Konzept ergibt sich, vor allem in der Konstruktionsphase, ein großer Fokus auf der Erforschung steuerungstechnischer Modularität an einem transportablen Demonstrator. In diesem Zusammenhang ist seine Konstruktion vor allem unter den steuerungstechnischen Herausforderungen der Modularität für verschiedene Prozesse zu sehen und weniger unter der mechanischen Eignung für das Hochpräzisionsfräsen mit ausreichender Steifigkeit der Prozessportale. Nichtsdestotrotz kann das vorgestellte Konzept für genau diese Erprobung der Steuerung verschiedenster Prozesse auf einer Anlage dienen und als Forschungsplattform eine Grundlage für die weitere Erforschung modularer Werkzeugmaschinen bilden.

Die Realisierung solcher Anlagen hinsichtlich Konstruktion, Steuerungsarchitektur und Kommunikationstechnik ist Gegenstand aktueller Forschung. In diesem Zusammenhang wurde ein Konzept für eine modulare Werkzeugmaschine entwickelt. Dazu wurden verschiedene Konstruktionskonzepte miteinander verglichen. Der anschließend erarbeitete Ansatz besteht aus einer Grundkonstruktion mit zwei Linearachsen und einem Drehschwenktisch. Diese kann über definierte Schnittstellen mit austauschbaren Prozessmodulen erweitert werden. Eine sternförmige Bustopologie mit im laufenden Betrieb ankoppelbaren, dezentralen Steuerungseinheiten ermöglicht die flexible Erweiterung der Maschinensteuerung. Für eine effiziente Inbetriebnahme sowie Forschung und Entwicklung verfügt die Anlage über einen integrierten digitalen Zwilling sowie ein Rapid-Control-Prototyping-System.

Zur Realisierung verschiedener Prozesse wurden in einem ersten Schritt Prozessmodule für die Laser- und Fräsbearbeitung sowie den 3D-Druck entwickelt.

Nach Aufbau und Inbetriebnahme wird die Anlage zur Erprobung von Forschungsansätzen aus verschiedenen Fachgebieten, wie etwa rekonfigurierbare Steuerungstechnik, Kommunikationstechnik, Antriebstechnik, Safety aus der Cloud, virtuelle Inbetriebnahme und Bahnplanung von hybriden Prozessen genutzt.

Der Fokus liegt stets auf einer hohen Anpassungsfähigkeit und Erweiterbarkeit durch modularen und rekonfigurierbaren Aufbau, um den sich wandelnden Anforderungen der produzierenden Industrie gerecht zu werden.

FÖRDERHINWEIS

Die Autoren danken dem Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst des Landes Baden-Württemberg für die finanzielle Unterstützung der Projekte im Rahmen des „InnovationsCampus Mobilität der Zukunft“ (ICM).

Literatur

[1] Koren, Y.: The Global Manufacturing Revolution. Hoboken, New Jersey/ USA: Wiley 2010
[2] Europäischer Rat – Generalsekretariat des Rates: Tagung des Europäischen Rates (12. Dezember 2019) – Schlussfolgerungen 12. Dezember. Internet: www.consilium.europa.eu/media/41779/12-euco-final-conclusions-de.pdf. Zugriff am 30.04.2024
[3] Gauss, L.; Lacerda, D. P.; Sellitto, M. A.: Module-based machinery design: a method to support the design of modular machine families for reconfigurable manufacturing systems. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 102 (2019), 9–12, pp. 3911–3936
[4] Stehle, T.; Heisel, U.: Konfiguration und Rekonfiguration von Produktionssystemen. In: Spath, D.; Westkämper, E. (Hrsg.): Handbuch Unternehmensorganisation, S. 1–35., Heidelberg: Springer 2016
[5] Koren, Y.; Heisel, U.; Jovane, F. et al.: Reconfigurable Manufacturing Systems. CIRP Annals 48 (1999) 2, pp. 527–540
[6] Kühnapfel, J. B.: Scoring und Nutzwertanalysen. Ein Leitfaden für die Praxis. Wiesbaden: Springer Gabler 2021
[7] Uriarte, L.; Zatarain, M.; Axinte, D. et al.: Machine tools for large parts. CIRP Annals 62 (2013) 2, pp. 731–750.
[8] Engelberth, T.: Adaptive Verspannung von Zahnstange-Ritzel-Antrieben. Dissertation, Universität Stuttgart, 2019
[9] Brecher, C.; Weck, M.: Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme. Heidelberg: Springer Vieweg 2021
[10] Abel, D.; Bollig, A.: Rapid control prototyping. Methoden und Anwendungen. Heidelberg: Springer 2006
[11] Klingel, L.; Heine, A.; Acher, S. et al.: Simulation-Based Predictive Real-Time Collision Avoidance for Automated Production Systems. 2023 IEEE 19th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), Auckland, New Zealand,.2023, pp. 1–6
[12] Schlechtendahl, J.; Kretschmer, F.; Lechler, A. et al.: Communication Mechanisms for Cloud based Machine Controls. Procedia CIRP 17 (2014), pp. 830–834.
[13] Neubauer, M.; Reiff, C.; Walker, M. et al.: Cloud-based evaluation platform for software-defined manufacturing. at – Automatisierungstechnik 71 (2023) 5, pp. 351–363

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-05-6 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

[14] Reiff, C.; Bubeck, W.; Krawczyk, D. et al.: Learning Feedforward Control for Laser Powder Bed Fusion. Procedia CIRP 96 (2021), pp. 127–132.
[15] Mühlbeier, E.; Gönnheimer, P.; Hausmann, L. et al.: Value Stream Kinematics. In: Behrens, B.-A.; Brosius, A.; Hintze, W. et al. (Hrsg.): Production at the leading edge of technology, pp. 409–418. Heidelberg: Springer 2021
[16] Hilligardt, A.; Böhland, F.; Klose, J. et al.: A new approach for local cutting force modeling enabling the transfer between different milling conditions and tool geometries. Procedia CIRP 102 (2021), pp. 138–143.
[17] Wegert, R.; Alhamede, M. A.; Guski, V. et al.: Sensor-Integrated Tool for Self-Optimizing Single-Lip Deep Hole Drilling. International Journal of Automation Technology 16 (2022) 2, pp. 126–137

David Dietrich, M.Sc.
Oliver Jud, M.Sc.
Daniel Kurth, M.Sc.
Dr.-Ing. Armin Lechler
Valentin Leipe, M.Sc.
Maximilian Nistler, M.Sc.
Colin Reiff, M.Sc.
Alexander Schulte, M.Sc.
Lukas Steinle, M.Sc.

Prof. Dr.-Ing. Alexander Verl
info@isw.uni-stuttgart.de
Tel. +49 711 / 685-82410
Foto: ISW

Universität Stuttgart
Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW)
Seidenstr. 36, 70174 Stuttgart
www.isw.uni-stuttgart.de

* Alle Autoren haben gleichwertig zu dieser Veröffentlichung beigetragen und sind in alphabetischer Reihenfolge angegeben.

LIZENZ

Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-05-6 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access -