

SCIENTIFIC REPORTS

WISSENSCHAFTLICHE BERICHTE



Journal of the University of Applied Sciences Mittweida
Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule Mittweida

Prozessentwicklung 4.0



Nr. 2, 2015
ISSN 1437-7624

24th International Scientific Conference
Mittweida
November 19-20, 2015



Prozessentwicklung

Impressum:

Herausgeber:

Hochschule Mittweida
University of Applied Sciences
Der Rektor
Prof. Dr. phil. Ludwig Hilmer
Der Prorektor für Forschung und
Entwicklung
Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Thiem

Postanschrift:

Hochschule Mittweida
University of Applied Sciences
Referat für Forschung
Postfach 1457
D-09644 Mittweida

Redaktion dieser Ausgabe:

Hochschule Mittweida
University of Applied Sciences

Erscheinungsweise: unregelmäßig

Druck: WIRmachenDruck GmbH

Schutzgebühr: 15 €

Tagungsgruppenleiter:

Prof. Dr.-Ing. Leif Goldhahn
Prof. Dr.-Ing. Gerhard Gebhardt
Prof. Dr.-Ing. Alexander Winkler

Die Scientific Reports / Wissenschaftliche Berichte als Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule Mittweida (FH) University of Applied Sciences lösen die bisherigen Scientific Reports mit allen Volume I-III ab und erscheinen mit Nr. 1, 1998 ab November 1998 in neuem Layout und in neuer Zählung

Bisher 2015 erschienen:

E-Mobility and Reliability in Communication Networks Nr. 1, 2015

Die IWKM 2015 erscheint in den Bänden:

Prozessentwicklung 4.0	Nr. 2, 2015
Werkstoff- und Oberflächentechnik	Nr. 3, 2015
Lasertechnik	Nr. 4, 2015
Maßnahmen zur Lärminderung	Nr. 5, 2015
Moderne Bildungsangebote für die digitale Arbeitswelt	Nr. 6, 2015

Für den Inhalt der Beiträge sind die Autoren verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

Plenarvortrag	3
Ulrich Schmucker	

DIGITALES UND VIRTUELLES ENGINEERING FÜR TEILEFERTIGUNG UND MONTAGE

Model Based System Engineering	4
Otfrid Liepack Jet Propulsion Laboratory Pasadena, USA	

Cloudbasiertes Konstruieren in der Konzeptphase	5
Andreas Petzold C-CAM GmbH	

Ein Beitrag zur individuellen Produktentwicklung für die Industrie 4.0	9
Bernhard Meussen NORDAKADEMIE gAG	

Modellierung von Bedienhandlungen in Virtual Reality-Umgebungen	13
Leif Goldhahn, Dorit Bock Hochschule Mittweida	

QUALITÄTSMANAGEMENT UND MESSTECHNIK

Asset Tracking mittels kooperativer Lokalisierung in drahtlosen Sensornetzen	17
André Hanak Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS	

Hydraulische Ermittlung von Bohrungskonzizitäten zur Regelung einer mechanischen Fertigung	20
Jan Neumann Continental Automotive GmbH	

Evaluation of uncertainty of coordinate measurements treated as indirect measurements	21
Wojciech Płowucha, Władysław Jakubiec University of Bielsko-Biała	

Bewertung der Gewindequalität beim automatisierten Lehren	26
Stefanie Stöckel, Carsten Keller Fraunhofer IWU	

Bewertung der Computertomographie als integraler Bestandteil der Prüfmittelplanung	30
Sebastian Wagner Continental Automotive GmbH	

ROBOTIK UND STEUERUNGSTECHNIK

The Application of Matlab/Simulink for Control of Mechanisms with Parallel Kinematic Structure	34
Vladimír Bulej ¹ , Juraj Uriček ¹ , Manfred Eberth ² ¹ University of Zilina, ² AUDI AG	

Automatisiertes Laden eines E-Fahrzeuges mit Hilfe eines Roboters	38
Michael Jokesch ¹ , André Froß ² , Ulrike Thomas ¹ ¹ Technische Universität Chemnitz, ² Core Mountains GmbH	

Jacobi-Matrix basierte Bahnplanung für Roboter mit Achsredundanzen	42
Michael Walther, Kevin Hipp, Holger Schlegel, Reimund Neugebauer Technische Universität Chemnitz	

Sensorauswahl für die Zustandsschätzung eines elastischen Roboterarmes mit EKF und IMU	47
Juliane Hädrich, Holger Schlegel, André Sewohl, Reimund Neugebauer Technische Universität Chemnitz	
Algorithmen zur expliziten Kraftregelung für einen lagegeregelten Roboter	53
Alexander Winkler ¹ , Jozef Suchý ² ¹ Hochschule Mittweida, ² University of Matej Bel Banská Bystrica	
Potenzial eines neuen Laserwerkzeuges für die weitere Flexibilisierung der Automobilfertigung – robotergeführte Laserschweißzangen ohne zusätzliche Laserschutzeinhausung	57
Frank Riedel, Gerd Töberling, Jens H. Lippmann Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU)	
RESSOURCENEFFIZIENZ DURCH TECHNIK, MENSCH UND ORGANISATION	
Brauchen wir noch (“REFA-”) Methoden der Zeit- und Datenermittlung in der Welt variabler und kundenwunschorientierten Leistungsprozesse	60
Torsten Merkel Westfälische Hochschule Zwickau	
Word Class Manufacturing and ongoing improvement of workplaces	62
Dariusz Plinta, Monika Banach, Sławomir Kukla University of Bielsko-Biala	
Thermoforming process development	66
Matuszek Józef, Kinga Byrska-Bienias University of Bielsko-Biala	
Application of neural network in assembly	72
Izabela Kutschenreiter-Praszkiewicz University of Bielsko-Biala	
Produktion zwischen Wertstromdesign und MES	76
Mario Strucks Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden	
The System for Objects and Goods Identification in Industry through the Barcodes	80
Juraj Uríček, Vladimír Bulej, Ján Stanček University of Žilina	
Grundlagen und Potentiale zur ressourceneffizienten technologischen Planung der Fertigung	84
Leif Goldhahn, Dorit Bock, Robert Eckardt Hochschule Mittweida	
POSTERBEITRÄGE	
Importance of Geometrical Product Specification for modern industry	88
Pawel Rosner University of Bielsko-Biala	
Simulation of a tendon driven underactuated finger	91
Eduard Krylov ¹ , Pavel Potapov ² ¹ Kalashnikov Izhevsk State Technical University ² Moscow State Automobile and Road Technical University	

DIGITALE TECHNOLOGIEN ZUR ENTWICKLUNG UND ZUM BETRIEB VON MASCHINEN UND ANLAGEN

Ulrich Schmucker
Fraunhofer IFF Magdeburg

Die zunehmende Komplexität von Produkten und Prozessen, steigender Wettbewerbsdruck sowie die Globalisierung von Unternehmen und deren Zulieferer erfordern neue Herangehensweisen in der gesamten Prozesskette von der Produktplanung und –entwicklung über die Fertigung bis zur Nutzung beim Kunden. Insbesondere sehen sich Produktentwickler mit immer kürzeren Produktlebenszyklen bei gleichzeitig steigenden Anforderungen an das Produkt konfrontiert. Dieser Anforderung kann nur durch eine konsequente Nutzung von digitalem Entwurf sowie Modellierung und Simulation des Systemverhaltens begegnet werden. Im Ergebnis entstehen virtuelle Prototypen neuer Produkte mit getesteten und optimierten geometrischen und funktionalen Merkmalen. Reale Komponenten können danach in der virtuellen Umgebung einzeln und in ihrem Zusammenspiel getestet werden (Hardware-in-the-loop, Software-in-the-loop); auf diese Weise erfolgt der Übergang zum realen Prototypen aus optimierten Einzelkomponenten.

Am Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb und –automatisierung wurde ein Entwurfssystem für mechatronische Produkte entwickelt, welches eine durchgehende Erstellung und Verwendung von Daten von der ersten Idee bis zur Nutzung des Produkts erlaubt. Die hauptsächlichen Anwendungsgebiete sind im Bereich des Sondermaschinen- und Anlagenbaus mit einer typischen Losgröße von 1, wo zu spät entdeckte Entwurfsfehler zu gravierenden technischen und wirtschaftlichen Folgen führen können. Der Vortrag beschreibt die methodischen Grundlagen und die Realisierung des Systems, welches Daten aus mechanischen, elektrischen sowie steuerungs- und regelungstechnischen Entwurfssystemen semantisch miteinander verknüpft, Simulationsmodelle zum großen Teil automatisiert erzeugt sowie Programmentwicklung, Tests und Optimierungen vollständig am virtuellen Modell ermöglicht, bevor die Maschine oder Anlage gebaut wird. Die während der Entwicklung generierten Daten können darüber hinaus effektiv in der Betriebsphase, z.B. für Service und Instandhaltung, genutzt werden.

Eine Reihe von Praxisbeispielen mit Projekten, welche von IFF mit Hilfe des Entwurfssystems erfolgreich realisiert wurden, zeigt die Leistungsfähigkeit sowie zukünftig geplante Erweiterungen des Systems.

MODEL BASED SYSTEMS ENGINEERING

Otfrid Liepack

Jet Propulsion Laboratory, 4800 Oak Grove Drive Pasadena, U.S.A.

Der effektive Datenaustausch von Systemen und deren Subsystemen zwischen Mitarbeitern von Projekten an verschiedenen Standorten ist durch die heutige Vernetzung vereinfacht worden. Basierend auf Erkenntnissen im Software-Bereich, wurde gegen 2007 von INCOSE das Model Based Systems Engineering vorgestellt.

Bei dem Model Based Systems Engineering (MBSE) handelt es sich um eine systemtechnische Methodik, für die man zur Informationsübermittlung zwischen Nutzern ein Modell erstellt, welches den üblichen Dokumentenaustausch ersetzt. MBSE kann zu allen Lebenszyklen von Projekten eingesetzt werden, welches Design, Analyse und die Verifikation eines Projektes mit einschließt.

Bei dem Vortrag wird eine Übersicht über die Anwendungsbereiche und Modelltypen des MBSE vorgestellt. Vor- und Nachteile dieser neuartigen Methode im Bereich Systemtechnik werden abschließend diskutiert.

CLOUSBASIERTES KONSTRUIEREN IN DER KONZEPTPHASE

Andreas Petzold

C-CAM GmbH, Otto-Schmerbach-Straße 19, D-09117 Chemnitz

Im Rahmen der "Industrie 4.0" wird die Integration von Kunden und Geschäftspartnern in Geschäfts- und Wertschöpfungsprozesse angestrebt [1] [2]. Technologische Grundlage sind cyber-physische Systeme und das „Internet der Dinge“ [3]. Für global agierende Entwicklerteams bietet Cloud-basiertes Konstruieren die Möglichkeit, standortunabhängig gemeinsam Produkte zu entwerfen und zu bewerten. Auch im Home-Office Bereich besteht der Bedarf, sich am aktuellen Konstruktionsprozess des Unternehmens zu beteiligen. SOLIDWORKS® Conceptual Design ist eine Modellierungsumgebung, welche auf der 3DEXPERIENCE Plattform von DASSAULT SYSTEMES angeboten wird. In dieser auf Java basierten Anwendung können Konstrukteure in der Konzeptphase gleichzeitig an unterschiedlichen Bauteilen derselben Baugruppe arbeiten, diese wird dabei ständig aktualisiert. [4]

As part of the "Industry 4.0" integration of customers and partners in business and value creation processes is sought [1] [2]. Technological basis are cyber-physical systems and the "Internet of Things" [3]. For global operating development teams provides cloud-based Construction the possibility to design anywhere together products and evaluate them. Also in the home office area there is a need to participate in the actual design process of the company. SOLIDWORKS® Conceptual Design is a modeling environment which is offered on the 3DEXPERIENCE platform by DASSAULT SYSTEMES. This is based on Java application, designers can work simultaneously on different components of the same module in the concept phase, and this will be updated continuously. [4]

1. Einleitung

Die Anforderungen an den heutigen Produktentwicklungsprozess sind schnellere Konzeptionierung, mehr Innovation, bessere Zusammenarbeit und kürzere Markteinführungszeiten.

Die komplette Prozesskette, vom ersten Entwurf bis zum Produkt, wird mittlerweile am virtuellen Modell solange optimiert, dass die Realisierung selbst recht einfach und damit kostengünstig umsetzbar ist. Durch den hohen Grad der Vernetzung können global verstreute Entwicklerteams bereits heute gleichzeitig an denselben Projekten arbeiten. Voraussetzung hierzu sind zuverlässige und leistungsfähige Plattformen [5].

Die mechanische Konzeptionierung von Projekten nimmt fast ein Drittel der Projektlaufzeit in Anspruch. Hierbei entstehen durchschnittlich 6 Konstruktionsvarianten. Zudem wird in 98 Prozent der Unternehmen während der Konzepterstellung in Teams gearbeitet. Es liegt also auf der Hand, dass sich die Optimierung der Konzeptphase äußerst positiv auf die Wirtschaftlichkeit von Projekten auswirkt. [4]

Im Maschinen- und Anlagenbau werden über 70 Prozent der Selbstkosten eines Produktes bereits zu Beginn des Produktentwicklungsprozesses, nämlich während der Konstruktion, festgelegt. Die Konstruktionsabteilung selbst trägt nur mit ca. 6 Prozent zur Kostenentstehung bei. Kostenorientiertes Konstruieren wirkt sich demnach viel effektiver auf die Kostenbilanz aus, als Einsparungen beim Personal oder dessen Ausstattung [6].

Ein erfolgreiches Produkt hängt damit von einer effektiven Konzeptphase ab. Eine innovative, leistungsstarke und benutzerfreundliche Modellierungsumgebung ist somit Grundvoraussetzung für den Unternehmenserfolg [4]. Entwürfe müssen schnell im digitalen Modell erfasst werden, um sie im vernetzten Entwicklerteam zu teilen und weiterzuentwi-

ckeln, mit dem Ziel, in kurzer Zeit ein marktfähiges Produkt zu generieren.

2. Vorstellung der 3DEXPERIENCE Plattform

Die von Dassault Systèmes angebotene 3DEXPERIENCE Plattform ist eine Business Plattform, welche für interne Organisationseinheiten wie Marketing, Vertrieb und Technik den Unternehmen Softwarelösungen zur Verfügung stellt, welche im Wertschöpfungsprozess helfen, die Produktivität und die Kundenzufriedenheit zu steigern. Durch eine vereinheitlichte Bedienoberfläche der angebotenen Lösungen, wie 3D-Konstruktion, Analyse und Simulation, wird eine einfache Handhabung erreicht, welche auf einer interaktiven, teamorientierten Umgebung basiert. [7]

Der SOLIDWORKS® Kanal der 3DEXPERIENCE Plattform ermöglicht Konstrukteuren die Entwicklung innovativer Produkte in einer auf Zusammenarbeit ausgerichteten und vernetzten Umgebung. Mit der Lösung SOLIDWORKS® Conceptual Design lassen sich auf einfache Weise mechanische Konzepte entwickeln und prüfen, wodurch schnell fundierte Entscheidungen bei der Auswahl geeigneter Varianten getroffen werden können. Im Anschluss erfolgen die Detaillierung der Konstruktion sowie die Fertigung außerhalb der Plattform.

Konstruktionsentscheidungen werden dadurch beschleunigt, dass neben dem erfahrenen CAD Konstruktionsteams auch Nicht-CAD-Anwender, wie Führungskräfte und Projektmanager unabhängig von Standort und Gerät konstruktionsrelevante Informationen austauschen und somit beschleunigt zusammen arbeiten können. Die SOLIDWORKS® Lösungen auf der 3DEXPERIENCE Plattform bieten Konstruktionsteams, die abhängig ihrer zugewiesenen Nutzungsrechte gemeinsam entwerfen und konstruieren wollen, eine leistungsfähige und intuitive Modellierungsumgebung. [8]

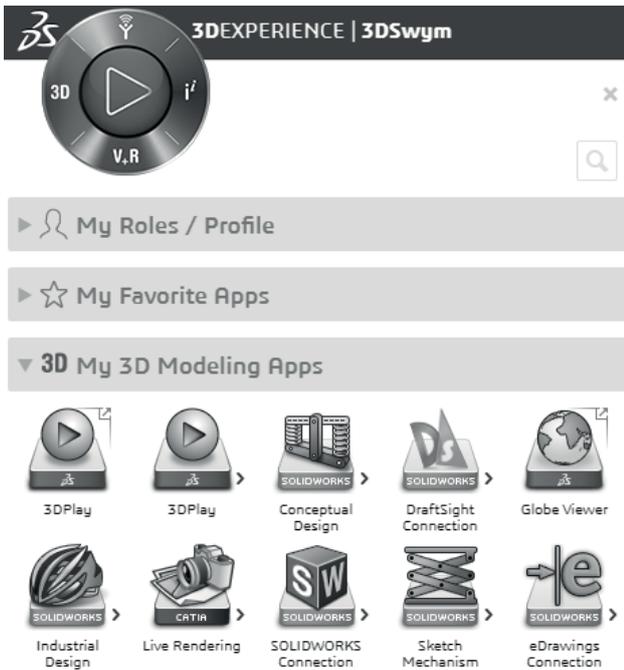


Bild 1: 3D Modellierungsanwendungen im SOLIDWORKS® Kanal der 3DEXPERIENCE Plattform [7]

Im Bild 1 ist ein Ausschnitt der 3DEXPERIENCE Plattform zu sehen. Der Kreis mit den 4 Segmenten im linken oberen Bereich der Abbildung ist das zentrale Navigationselement auf der Plattform, der sogenannte Kompass. Unter dem Button "3D" erhält man Zugriff auf die "3D Modeling Apps":

- *Conceptual Design*
Zum Erstellen von Konzepten
- *DraftSight®*
2D-CAD Software zur Bearbeitung und zum Betrachten von .dwg und .dxf Dateien
- *Industrial Design*
Zur Modellierung von Freiformflächen
- *Connection*
Ermöglicht die Verbindung zwischen der 3DEXPERIENCE Plattform und den Desktopanwendungen von SOLIDWORKS®
- *Sketch Mechanism*
Dient der schnellen Erfassung mechanischer Ideen auf Tablets in 2D, welche sich in SOLIDWORKS® Conceptual Design importieren lassen
- *eDrawings®*
Stellt die Möglichkeit 2D- und 3D Konstruktionen anzusehen und zu interpretieren, bereit. [8]

3. SOLIDWORKS® Conceptual Design

SOLIDWORKS® Conceptual Design (SWCD) bietet einfache Konstruktionswerkzeuge in einer Modellierungsumgebung, welche auf eine effektive Zusammenarbeit der Nutzer ausgelegt ist. Diese helfen beim schnellen Entwickeln, Evaluieren und Teilen von Konzepten. Die ergänzenden CAD Lösungen zeichnen folgende Punkte aus:

- Entwürfe können schnell digital erfasst werden
- 2D- und 3D-Konzepte können einfach erstellt werden
- Zeitgerechter Erhalt von Feedback von aktiven Projektinvolvierten
- Cloudbasierte Verwaltung von Daten

Bevor Zeit für die Entwicklung und Konstruktion aufgewendet wird, können mehrere Konzeptvarianten einfach verwaltet und evaluiert werden. Frühzeitige Konzeptentwürfe können mit SWCD dank intuitiver Abläufe und kontextbasierten Rückmeldungen einfach und schnell erzeugt werden. Die konzipierten virtuellen Prototypen verhalten sich durch das Hinzufügen von dynamikrelevanten Elementen, wie Federn (Steifigkeiten), Trägheiten, Motoren und Schwerkraft realistisch. Damit können Ideen, vor der Konstruktion detaillierter Modelle, in Echtzeit auf ihre Eignung hin geprüft werden, was letztlich Zeit und Geld spart. [9]

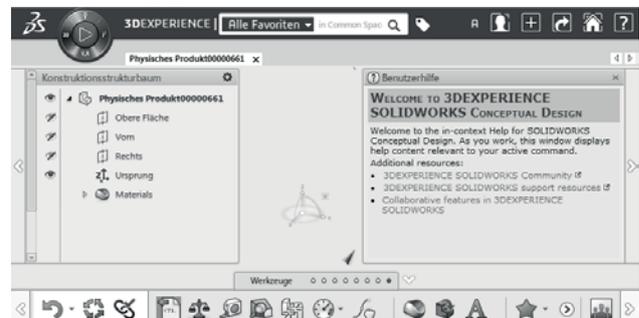


Bild 2: Modellierungsumgebung im SWCD

Die im Bild 2 gezeigte Oberfläche von SWCD ist in 5 Bereiche aufgeteilt. In der oberen Zeile befindet sich der Kompass zur Navigation innerhalb der 3DEXPERIENCE Plattform. Mit Hilfe der Suchleiste sind Dokumente effektiv auffindbar.

Ganz rechts sind die Pull-Down-Menüs zum Speichern der Dokumente, zum Aufruf der Hilfe, zur Nutzerprofilverwaltung und zum Zugriff auf Online-Communities angebracht. Auf der rechten Seite erhält man Zugriff auf die Benutzerhilfe und weitere Ressourcen.

Im unteren Teil befindet sich der Werkzeugkasten, mit dessen Tools die einzelnen Features zur Erzeugung der Modelle aufgerufen werden. Dieser Werkzeugkasten ist folgendermaßen untergliedert:

- Skizze (Skizzierwerkzeuge)
- Komponente (Volumenwerkzeuge)
- Baugruppe (Baugruppenwerkzeuge)
- Bewegung (Werkzeuge zur Erzeugung von Bewegungsstudien, wie z.B. Motoren und Steifigkeiten)
- Mechanismenkonstruktion (fügt Gelenke und Verbindungen hinzu, Getriebesynthese und -analyse)
- Ansicht (Ausrichtung, Schnittansicht, Darstellung der Kanten, etc.)
- Verwalten (Erstellen von Attributen, Verwal-

tung von Verantwortlichen und Archivverwaltung)

- Werkzeuge (Tools zum Evaluieren der Konstruktion)

Auf der linken Seite ist der Konstruktionsstrukturbaum mit den drei Standard-Ebenen, dem Ursprung und dem hinterlegten Material zusehen.

In der Mitte befindet sich der Arbeitsbereich, in dem die Modelle dargestellt werden.

4. Platform Contributor für SOLIDWORKS® als Cloud Verbindung

Platform Contributor für SOLIDWORKS® bietet eine sichere, individualisierbare und kooperative Entwicklungsumgebung für Konstruktionsteams und alle Projektbeteiligten mit einer transparenten Datenverwaltung in der Cloud. Anwender mit Plattformzugang können von SOLIDWORKS® CAD (Standard, Professional oder Premium), eDrawings® und DraftSight® Daten in der Cloud speichern, verwalten, teilen und mit anderen 3DEXPERIENCE Plattform-Anwendungen online nutzen.

Durch eine Zutrittskontrolle, verschlüsselte Kommunikationsprotokolle und branchenführenden Datensicherungs- und Wiederherstellungsverfahren, werden Daten geschützt. Das eingebettete und transparente Datenmanagementsystem stellt sicher, dass die Daten nie verloren gehen und nie überschrieben werden. [10]

5. Beispielhafte Mechanismenentwicklung mit SOLIDWORKS® Conceptual Design

Eine beispielhafte Mechanismenentwicklung wird am Theo Jansen Mechanismus [11] gezeigt (siehe Bild 3).

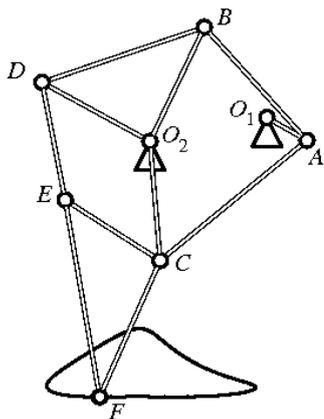


Bild 3: Theo Jansen Mechanismus [12]

Dabei handelt es sich um ein 8-gliedriges, ungleichförmig übersetzendes Getriebe, bei dem die Zwanglaufbedingung erfüllt ist. Ziel ist es, eine Schreitbewegung zu erzeugen, bei der während des Kontaktes des Fußes (Punkt F in Bild 3) mit dem Boden eine möglichst geradlinige und horizontale Bewegung mit gleichförmiger Geschwindigkeit erfolgt. Der Schritt nach vorn sollte ohne Bodenkontakt und mit höherer Geschwindigkeit erfolgen. Der Antrieb erfolgt durch die Kurbel O_1 -A. Die Anordnung ist relativ

zu sehen, da sich in der Realität der gesamte Mechanismus über den Boden bewegt, und nicht der Fuß über den Boden gleitet. Aus einer gleichmäßigen, kreisförmigen Drehbewegung wird also eine ungleichmäßige Schreitbewegung erzeugt.

Nun gilt es, geeignete Dimensionierungen der Getriebeteile vorzunehmen, um das gewünschte Ergebnis zu erhalten. Im 2D Mechanismus Design wird zunächst die Mechanismus Skizze im „Sketch Mechanism Mode“ erzeugt, indem die Verbindungselemente und Gelenke skizziert werden. Skizzen-segmente werden in ihrer Dimension als starr behandelt, um Bewegungen überprüfen zu können. Größenänderungen können durch Ziehen der Eckpunkte vorgenommen werden um direkt danach die Auswirkungen der Änderung durch Bewegungen (Verschieben von Segmenten durch Drag and Drop) des Mechanismus prüfen zu können. Da Abmessungen intern versteckt werden, müssen sie zur Darstellung und Editierung am entsprechenden Skizzen-segment ausgewählt werden. Jedes Skizzen-segment wird als Skizzenobjekt behandelt und mit einer eigenen Farbe versehen. Beziehungen werden nicht automatisiert hinzugefügt, sondern können nur manuell hinzugefügt werden, um Freiheitsgrade nicht ungewollt einzuschränken. Bewegungsstudien können direkt in der Skizze als „Mechanism Mode“ durchgeführt werden. SWCD bietet dazu lineare-, rotierende- und Bahnbewegungen als mögliche Aktoren von Mechanismen an.

Nach diesen Schritten ist der Mechanismus fertig gestaltet und kann in Bezug auf seine Anforderungen analysiert werden. Dazu können Bewegungsbahnen dargestellt werden. Wie im Bild 4 zu sehen, führt der Fußpunkt während einer Drehung der Antriebskurbel einen Schritt auf einer geradlinigen Bahn aus.

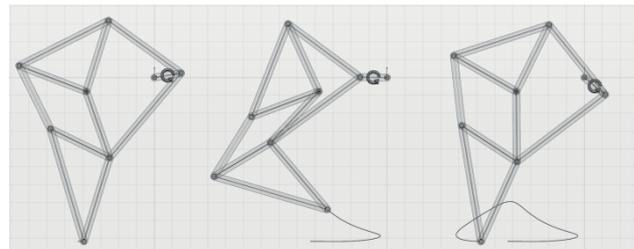


Bild 4: animierter Schritt des fertigen Mechanismus mit Bahnkurve des Fußpunktes

Zur Quantifizierung der dargestellten Bahnkurve ist es möglich, mit geringstem „Klickaufwand“ Ergebnisdarstellungen in Form von Diagrammen zu erzeugen. Durch Auswahl des Getriebegliedes und der darzustellenden Information erhält der Bediener Darstellungen wie in Bild 5 und 6.

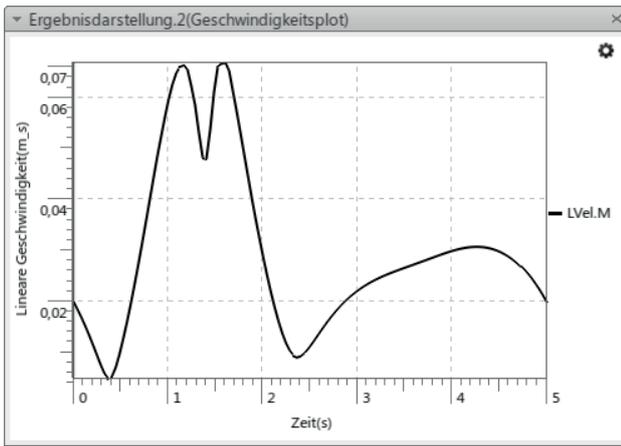


Bild 5: mittlere Geschwindigkeit des Fußpunktes

In Bild 5 resultierende Geschwindigkeit der Fußpunktes dargestellt. Es ist ersichtlich, dass während der Fuß den Schritt ausführt, die Geschwindigkeit doppelt so hoch ist, als beim Kontakt mit dem Boden (im Intervall von 0,4-2,4s). Zudem nimmt der Schritt nach vorn nur ca. 2/5 der Zyklusdauer in Anspruch.

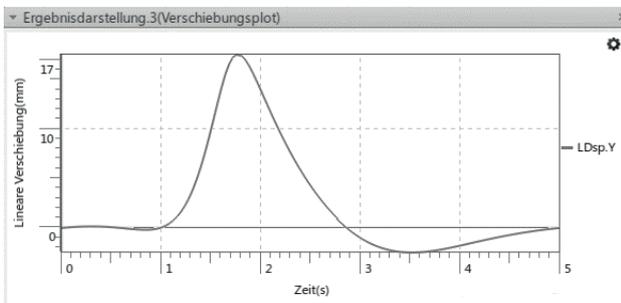


Bild 6: Verschiebung des Fußpunktes in Y-Richtung während eines Schrittes

Während der Fuß den „Boden“ berührt, ist seine Verschiebung in Y-Richtung minimal (siehe Bild 6). In der Realität würde das eine ebenso minimale Bewegung des aufgesetzten Rumpfes relativ zum Boden bedeuten, während eine Y-Verschiebung zwischen Boden und Fuß natürlich nicht stattfindet.

Damit wird mit dem konzipierten Mechanismus dem formulierten Ziel der Schreitbewegung nachgekommen.

Die Daten der Ergebnisdarstellungen können zu Auswertezwecken außerhalb der 3DEXPERIENCE Plattform via .csv direkt exportiert werden. Bewegungsstudien können ebenfalls als Video (.avi Datei) ausgegeben werden.

Im nächsten Schritt kann die 2D Skizze, unter Einbeziehung aller Beteiligten, zur Erzeugung eines ersten 3D Entwurfs dienen, bei dem z.B. der Bau- raum, dynamikrelevante Parameter und Festigkeiten zu untersuchen sind.

6. Fazit

Anhand des Beispiels ist ersichtlich, mit welchem geringem Aufwand ein Mechanismus mit den gewünschten Eigenschaften konzipierbar ist. Durch die einfachen und innovativen Tools kann man intuitiv komplizierte Mechanismen mit wenigen „Klicks“

erzeugen. Die Möglichkeiten in SWCD die Projekte im Team zu erarbeiten und zu bewerten, beschleunigen den Entwicklungsprozess zusätzlich. Die Konstruktion eines marktreifen und konkurrenzfähigen Produktes wird, einhergehend mit einer kürzeren Time To Market, vereinfacht.

Literaturverzeichnis

- [1] DLR Projektträger, „Industrie 4.0“ <http://www.softwaresysteme.pt-dlr.de/de/industrie-4-0.php>. [Zugriff am 23 07 2015].
- [2] T. M. Böhler, „Industrie 4.0 - Smarte Produkte und Fabriken revolutionieren die Industrie“ <http://www.produktion.de/automatisierung/industrie-4-0-smarte-produkte-und-fabriken-revolutionieren-die-industrie/>. [Zugriff am 23 07 2015].
- [3] J. Jasperneite, „computer-automation.de“ <http://www.computer-automation.de/steuerungsebene/steuern-regeln/artikel/93559/>. [Zugriff am 23 07 2015].
- [4] SOLIDWORKS Corp., SOLIDWORKS® Mechanical Conceptual, Waltham, MA 02451 U.S.A.: Dassault Systèmes SOLIDWORKS Corporation, 2014.
- [5] K.-H. Decker und K. Kabus, Maschinenelemente, München: Carl Hanser Verlag, 2011.
- [6] B. Schlecht, Maschinenelemente 1, München: Pearson Studium, 2007.
- [7] Dassault Systèmes SA, „3DEXPERIENCE Plattform,“ 2015. [Online]. Available: <http://www.3ds.com/de/ueber-dassault-systemes/3dexperience-plattform/>. [Zugriff am 9 September 2015].
- [8] SOLIDWORKS Corp., „SOLIDWORKS auf der 3DEXPERIENCE Plattform“ <http://solidworks.de/sw/products/3dexperience/solidworks-3dexperience-overview.htm>. [Zugriff am 09 September 2015].
- [9] SOLIDWORKS Corp., „Konzeptionelles Design - Von der Idee direkt zur digitalen Umsetzung“ <http://solidworks.de/sw/products/3dexperience/mechanical-conceptual-design.htm>. [Zugriff am 9 September 2015].
- [10] SOLIDWORKS Corp., „Platform Contributor“ <http://www.solidworks.com/sw/products/solidworks-platform-contributor.htm>. [Zugriff am 14 September 2015].
- [11] Media Force Ltd., „Theo Jansen CV“ http://www.strandbeest.com/beests_leg.php. [Zugriff am 14 September 2015].
- [12] J. Dankert, „Theo Jansens Strandbeest-Mechanismus“ <http://www.tm-aktuell.de/TM5/Viergelenkketten/Strandbeest.html>. [Zugriff am 14 September 2015].

EIN BEITRAG ZUR INDIVIDUELLEN PRODUKTENTWICKLUNG FÜR DIE INDUSTRIE 4.0

Bernhard Meussen

NORDAKADEMIE gAG, Köllner Chaussee 11, D-25337 Elmshorn

Unter dem Schlagwort „Industrie 4.0“ wird die Digitalisierung des Produktlebens zur Sicherstellung der Wettbewerbsfähigkeit verstanden. Neben vielen weiteren Aspekte der Digitalisierung spielen die Potentiale der Produktindividualisierung durch die Technologien der 4. industriellen Revolution eine große Rolle. Unter Produktindividualisierung wird hier nicht die vorgedachte Konfiguration von Varianten, sondern die kundenindividuelle Ausprägung eines Produkts mit kundenindividuellen Entwicklungs- und Produktionsschritten betrachtet. In diesem Beitrag werden Überlegungen zur Gestaltung produktindividueller Entwicklungsprozesse und deren produktionstechnischer Realisation dargelegt. In der Produktion werden dabei Methoden der additiven Fertigung berücksichtigt. Die Besonderheiten einer solchen Fertigung sollen dabei im Produktentwicklungsprozess berücksichtigt werden. Die Planungen für einen Demonstrator einer solchen flexiblen Fertigung als Forschungsobjekt für die Prozessentwicklung schließt den Beitrag ab.

1. Einleitung

Der Begriff „Industrie 4.0“ wurde geprägt während der Hannover-Messe 2011 und bezeichnet die „vierte industrielle Revolution“. Er beschreibt die durchgängige Digitalisierung der sogenannten „Cyber-Physical Systems“ (CPS) und ist seither ein intensiv diskutiertes Thema in der Automatisierungstechnik. Geprägt wird diese Diskussion durch stärker technik- als nutzengetriebene Sichtweisen auf die zweifelsohne großen Potentiale der Vision „Industrie 4.0“ [1].

Die technikgetriebene Sichtweise führt dazu, dass geeignete Beispiele für die Anwendung der Vision „Industrie 4.0“ häufig fehlen oder Umsetzungen, z.B. durch Demonstratoren, nur einzelne Aspekte zeigen [2]. Folgerichtig hat die „Plattform Industrie 4.0“ in ihrem Ergebnisbericht als Empfehlung für die Kernbausteine der Umsetzung der Vision Industrie 4.0 die „Methoden für Geschäftsmodelle“ an den Anfang gesetzt [3].

Geschäftsmodelle dienen der Umsetzung der Unternehmensstrategie und im Sinne produzierender Unternehmen ist dies das zu verkaufende Produkt. Das Produkt kann selbst ein CPS sein. Bauernhansl beschreibt in [1] den Nutzen und die Herausforderungen für die Produktentwicklung und identifiziert als einen wichtigen Nutzen der Vision „Industrie 4.0“ die Fähigkeit zur Produktindividualisierung und den damit möglichen neuen Geschäftsmodellen.

Hier soll dieser Beitrag ansetzen. Im Folgenden wird der Begriff des individuellen Produkts insbesondere aus der Sicht der Produktentwicklung definiert. Die Anforderungen der Vision „Industrie 4.0“ und der werkzeuglosen Fertigung als produktionstechnische Umsetzung eines individuellen Produkts werden erörtert. Geeignete Produktentstehungsprozesse werden betrachtet und ein Vorschlag für einen solchen Produktentwicklungsprozess gemacht. Am Ende wird eine Planung für einen zur Erforschung der Produktentwicklungsprozesse für individuelle Produkte geeigneten Demonstrator gemacht.

2. Individuelle Produkte

Lindemann sieht als Konsequenz der zunehmenden Fokussierung der Unternehmen auf den Kundennutzen einen Trend zur individualisierten Massenproduktion als strategisches Konzept an [4]. Bauernhansl sieht durch die zunehmende Globalisierung der Märkte bei steigender Regionalisierung der Produkte ebenfalls einen Trend zur Produktindividualisierung [1]. Dabei werden zwei Ansätze unterschieden:

- variantenreiche Produkte und
- individuelle Produkte.

Nach Lindenmann entstehen individualisierte Produkte durch „individuelle Gestaltung in vorgeplanten Strukturen“ [4]. Bauernhansl sieht die Vision Industrie 4.0 als eine Voraussetzung für die Nutzung der Potentiale individualisierter Produkte [1]. Dabei kann die Individualisierung auch durch Komplexitätserhöhung durch Varianten erreicht werden. Variantenreiche Produkte sind aus vielen Bereichen bekannt, weit verbreitet sind die Konfiguratoren im Automobilbau, bei dem sich Kunden aus einer Vielzahl von Kombinationsvarianten ein individuelles Fahrzeug zusammenstellen können. Die variantenreichen Produkte führen zu großer Produktkomplexität, da die möglichen Varianten alle vorentwickelt werden. Komplexitätsmanagement durch Variantenmanagement ist eine Methode zur Beherrschung solcher variantenreicher, komplexer Produkte [5].

Alternativ soll nun untersucht werden, wie kundenindividuelle Produkte entstehen können, die ohne die in allen Einzelheiten vorgedachte Struktur der variantenreichen Produkte auskommen.



Bild 1: Trend zu kundenindividuellen Produkten in Anlehnung an [4]

3. Anforderungen an die individuelle Produktentwicklung

Ziel der Produktentwicklung als Teil des Produktentstehungsprozesses ist die Bereitstellung der zur Erfüllung des Geschäftsmodells erforderlichen Produkte. Dabei wird durch den Produktentwicklungsprozess sichergestellt, dass

- Funktion,
- Qualität,
- Gestalt und
- Kosten

des Produkts anforderungsgerecht umgesetzt werden [6]. Diese Anforderungen müssen natürlich auch dann umgesetzt werden, wenn Teile des Produkts kundenindividuell, d.h. vom Kunden bestimmt, ausgeführt werden.

Dabei muss z.B. für den Geltungsbereich der Maschinenrichtlinie [7] die Produktsicherheit gewährleistet werden. Die Maschinenrichtlinie schreibt für die Produkte eine entsprechende Produktdokumentation vor, die die Nachweise der konformen Produkteigenschaften enthält. Wie können diese für zunächst unbekannte, da kundenindividuelle Teile des Produkts erbracht werden?

Weiterhin müssen marktfähige Kosten, Qualitäten und Erstellungszeiten realisiert werden. Dazu sind die Unternehmensprozesse entsprechend zu gestalten. Insbesondere in der Fertigung müssen Verfahren verwendet werden, die den kundenindividuellen Anteil eines Produkts realisieren können.

Die Vision Industrie 4.0 enthält Elemente, die zur Umsetzung der Anforderungen kundenindividueller Produkte genutzt werden können. Einige dieser Elemente werden im Folgenden diskutiert.

4. Anforderungen der Smart Factory

In der Vision Industrie 4.0 spielt die sog. „Smart Factory“ eine zentrale Rolle [8]. Die Smart Factory besteht aus „Cyber-Physical Production Systems“ (CPPS), die eine flexible Produktion der sich selbst steuernden CPS als Produkte (Smart Products) ermöglichen. Um als Smart Product in der Smart Factory agieren zu können, müssen die CPS-Produkte Funktionalitäten aufweisen, die einer standardisierten Wechselwirkung mit der Umgebung der Smart Factory genügen, z.B. dem Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0) [9].

Da die Produktionstechnik der Smart Factory auf eine möglichst flexible Fertigung ausgelegt ist, in der z.B. fahrerlose Transportsysteme Logistikaufgaben übernehmen und kollaborierende Roboter in der Produktion mit Menschen eingesetzt werden [1], spielen in der Fertigung dann Verfahren zur Herstellung von produktspezifischen Zeichnungsteilen ohne spezielle Werkzeuge eine große Rolle. Großes Potential haben hier die Verfahren der additiven Fertigung.

Additive Fertigung wird in den Bereichen

- des Rapid Prototyping,
- des Rapid Tooling und
- der Rapid Production

eingesetzt [10]. Die additive Fertigung erzeugt Bauteile mit geringen geometrischen Einschränkungen, allerdings variieren die Bauteileigenschaften unabhängig vom Werkstoff bei unterschiedlichen Verfahren und die Eigenschaften der Bauteile weichen von denen des Grundwerkstoffs teilweise deutlich ab. Auch gibt es spezielle Einschränkungen, z.B. auf Grund teilweise nötiger sog. Stützkonstruktionen oder anderer verfahrensspezifischer Besonderheiten, die eine besondere Berücksichtigung der additiven Fertigung in der Produktentwicklung erfordern [11].

5. Anforderungen des Smart Product

Das Smart Product als CPS ist ein Produkt aus den Domänen

- Maschinenbau,
- Elektrotechnik und
- Informationstechnologie (Hard- und Software).

Daher muss die Produktentwicklung den besonderen Anforderungen dieser Domänen genügen. Dies wird häufig durch Anwendung des sog. V-Modells realisiert (siehe z.B. in [12]) oder einer Variante des Kreismodells zur Berücksichtigung des Systembetriebs und damit dem Übergang zu einer kontinuierlichen Betrachtung über Produktlebenszyklen hinweg [13].

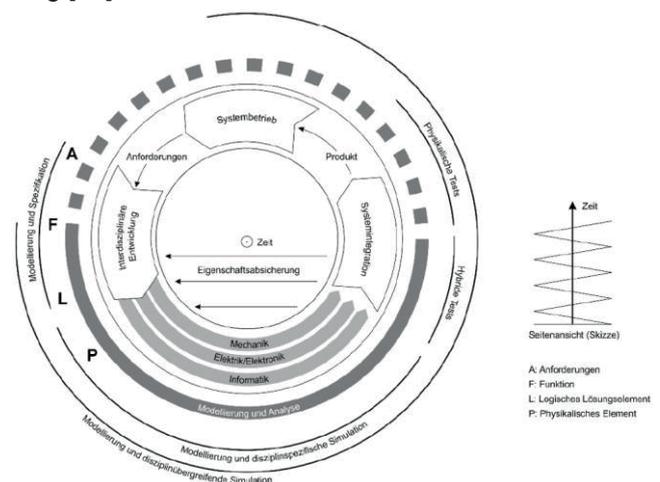


Bild 2: Kreismodell als Grundlage der Entwicklungsmethodik für CPS nach Ahrens und Hieronymus [13]

Neben den Anforderungen aus dem RAMI4.0 als Industrie 4.0-Komponente [9] und der IT-Security spielen die Anforderungen der Produktsicherheit (Safety) eine große Rolle. Hierzu sind die geforderten Risikobetrachtungen durchzuführen und zu dokumentieren [7]. Da CPS als Smart Products kundenindividuelle Ausprägungen und aufgrund ihrer Vernetzungsfähigkeit in unterschiedlichen Kontexten verwendet werden, sind entsprechende Überlegungen bei der Risikobeurteilung zu berücksichtigen [1].

6. Produktentwicklungsprozesse für individualisierte Produkte

Wie in Punkt 2 beschrieben, können individuelle Produkte als Sonderanfertigungen oder Auftragsbezogen z.B. im Anlagenbau hergestellt werden. Entsprechende Prozessbeschreibungen liegen vor, allerdings lassen sich diese Lösungen nicht auf die Serienproduktion oder gar auf die kundenindividuelle Produktion im Sinne der Vision Industrie 4.0 übertragen, da diese Prozesse keine marktkonformen Ergebnisse für z.B. Konsumprodukte liefern können [1] [4] [12].

Weiterhin können individualisierte Produkte durch Erhöhung der äußeren Varianz bei optimaler innerer Varianz erzeugt werden (Komplexitätserhöhung, s.o.). Die hier verwendeten Prozesse sehen ungeplante, kundenindividuelle Konstellationen nicht vor und sind für kundenindividuelle Produktentwicklung ungeeignet [4].

Lindemann schlägt in [4] eine Kombination aus strukturellen Maßnahmen zur Einschränkung kundenindividueller Anteile mit komplexitätsbeherrschenden Maßnahmen vor. Dabei wird in den Entwicklungsprozess die direkte Kundeninteraktion mit aufgenommen.

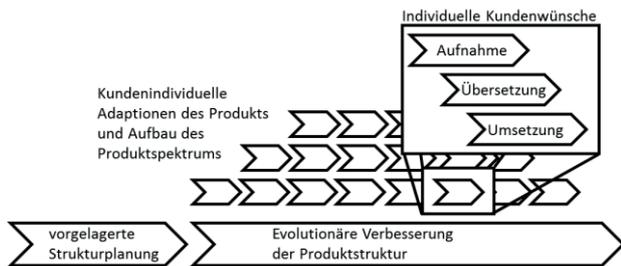


Bild 3: Entwicklungsprozess bei individualisierten Produkten nach Lindemann [4]

In der vorgelagerten Strukturplanung werden die grundlegenden Produkteigenschaften beschrieben und die kundenindividuellen Anteile definiert. Im Laufe des Produktlebens wird durch Aufnahme der individuellen Kundenwünsche in die Produktstruktur die Kundenindividualität dargestellt. Parallel wird die entstehende Produktstruktur evolutionär verbessert [4]. Vorteile dieses Vorgehens liegen in der sparsamen Verwendung von Entwicklungskapazitäten im vorgelagerten Entwicklungsprojekt, Nachteile liegen in der Notwendigkeit der kontinuierlichen aufwändigeren Serienbetreuung und dem Risiko der Nichterfüllung der Kundenanforderungen [4].

7. Vorschlag für einen Entwicklungsprozess für die kundenindividuelle Produktentwicklung

Die Vision Industrie 4.0 geht von der durchgängigen Digitalisierung des Produktlebenszyklus aus. Diese Digitalisierung betrifft nicht nur die Vorgänge im Produkt als CPS, sondern auch seine Interaktion mit der Umwelt, und damit auch mit den CPPS der Smart Factory. Hierdurch lassen sich die Nutzung durch den Kunden und auch die Produktionsprozesse beschreiben. Im Rahmen dieser Semantik können weitgehend freie Kundenanwendungen erlaubt

werden. Diese Anwendungen umfassen nicht nur die Funktionen des Produkts, sondern in weiten Bereichen durch Nutzung additiver Fertigung auch deren Gestalt. Ein Produktentwicklungsprozess für kundenindividuelle Produkte beinhaltet also

- eine vorgelagerte Strukturplanung [4],
- eine modellbasierte Systembeschreibung [3],
- eine gezielte Kundeninteraktion [1] [4],
- eine Berücksichtigung der Anforderungen der Smart Factory [1] [3],
- die Einhaltung der gesetzlichen Rahmenbedingungen [7] und
- eine Begleitung über den gesamten Produktlebenszyklus [4] [12] [13].

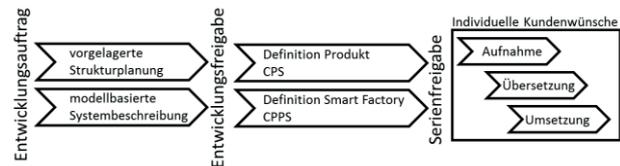


Bild 4: Entwicklungsprozess bei kundenindividuellen Produkten

Der wesentliche Aspekt der kundenindividuellen Produktentwicklung liegt in der Beschreibung der kundenindividuellen Aspekte eines Produkts. Nach der Industrie 4.0-Vision können diese individuellen Produkte als CPS in der Smart Factory von den CPPS erzeugt werden. Damit schwindet der Zwang zur Produktstandardisierung und es eröffnen sich neue Felder für Produktideen. Die Auswahl der vom Kunden individuell zu beeinflussenden Aspekte eines Produkts hat direkten Einfluss auf die Komplexität des Entwicklungsprozesses, da die modellbasierte Systembeschreibung entsprechend komplex ausfällt. Daher ist es für eine praktische Ausprägung des hier nur in Grundzügen dargestellten Entwicklungsprozesses erforderlich, konkrete Geschäftsmodelle umzusetzen.

An dieser Stelle unterliegt man dem Dilemma der gesamten Diskussion zu Industrie 4.0: Die Potentiale erscheinen verlockend, die Aufwände hoch und die konkrete Umsetzung noch ungewiss [2]. Um nicht in diesem Dilemma gefangen zu bleiben, wird im Folgenden ein Demonstrator vorgeschlagen, der den Aspekt des kundenindividuellen Produkts berücksichtigt und daher die Möglichkeit geben soll, die beschriebenen Prozesse beispielhaft auszuprägen.

8. Demonstrator für die kundenindividuelle Produktentwicklung

Vorgeschlagen wird im Prinzip ein CPPS als flexible Fertigungszelle. Ausgehend von einem CAD-System werden automatisch Stücklisten aufgelöst, um aus einem automatischen Lager Norm- und Kleinteile zu erhalten. In einem weiteren Schritt werden Zeichnungsteile durch Verfahren der additiven Fertigung erstellt und durch kollaborative Roboter bereitgestellt bzw. vormontiert. Diese Konstellation stellt den Aspekt der Smart Factory dar, der in einem vorgege-

benen Rahmen vollständig individuelle Produkte erlaubt [14].

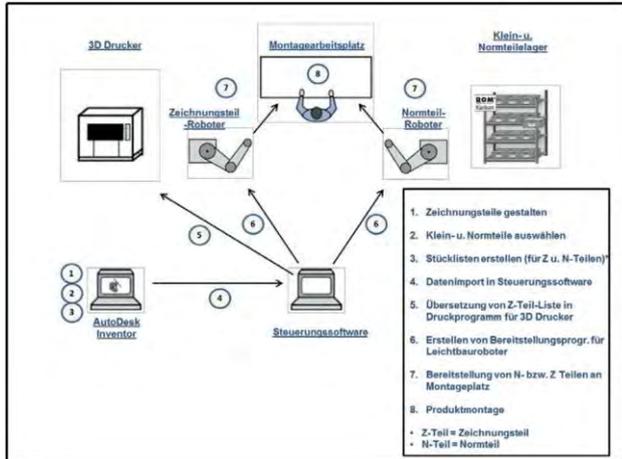


Bild 5: Demonstrator für kundenindividuelle Produkte

Über das CAD-Programm, hier „Autodesk Inventor“, kann diese Fertigungszelle angesteuert werden. Im Rahmen von Marktstudien werden nun potentielle kundenindividuelle Produkte definiert. Hierzu laufen an der Nordakademie entsprechende Projekte.

Für die gefundenen Produkte werden die oben genannten Strukturuntersuchungen durchgeführt und die modellbasierte Systembeschreibung mit allen Regeln erstellt. Über eine entsprechende Kundenintegration, z.B. eine Webseite, können dann vom Kunden individuelle Vorgaben gemacht werden, die dann automatisch in ein Produkt umgesetzt werden. Dieser modellhafte Aufbau kann im Rahmen der Forschung erweitert werden, z.B. um geeignete elektronische oder informationstechnologische Komponenten. So soll sich sukzessive an die Nutzung von CPS und CPPS zur Erstellung kundenindividueller Produkte angenähert werden. Die dabei gewonnenen Erfahrungen dienen dann der konkreten Definition von anwendungsbezogenen Produktentwicklungsprozessen für kundenindividuelle Produkte.

9. Zusammenfassung und Ausblick

Die Vision Industrie 4.0 hat ein großes Potential insbesondere dann, wenn sie zur Nutzung neuer Geschäftsmodelle führt. Ein Aspekt der Vision ist die Umsetzung kundenindividueller Produkte. Die in der Industrie 4.0 verwendeten Produktionstechnologien sollen diese kundenindividuellen Produkte zu heutigen Serienbedingungen erzeugen können, allerdings fehlen noch die entsprechenden Prozesse auf der Seite der Produktentwicklung. Da die Anforderungen an die Produktentwicklung im Allgemeinen zu sehr komplexen und aufwändigen Projekten führen, ist es sinnvoll, die Prozesse an konkreten Beispielen zu entwickeln. Da bisher geeignete Geschäftsmodelle und Produkte noch fehlen, soll über einen Demonstrator das Potential kundenindividueller Produkte konkret erforscht werden.

Damit wird es möglich, in der praktischen Anwendung die Fragestellungen der Entwicklung kundenindividueller Produkte zu bearbeiten.

Literaturverzeichnis

- [1] Th. Bauernhansl, M. ten-Hompel, B. Vogel-Heuser (Hrsg.): „Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik“, Springer Vieweg, 2014.
- [2] B. Meussen; „Anwendung von Industrie 4.0 in Forschung und Praxis“, Arbeitspapiere der Nordakademie, 2015.
- [3] BITKOM e.V., VDMA e.V., ZVEI e.V. (Hrsg.): „Umsetzungsstrategie Industrie 4.0 – Ergebnisbericht der Plattform Industrie 4.0“, BITKOM e.V., 2015.
- [4] U. Lindemann, R. Reichwald, M. Zäh (Hrsg.): „Individualisierte Produkte: Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion“, Springer, 2006.
- [5] J. Lechnitz, S. Eilmus: „Methoden für die Entwicklung modularer Produkte bei der Jungheinrich AG“, Design for X, Beiträge zum 24. DfX-Symposium, Hamburg (2013), 153-161.
- [6] K. Ehrlenspiel, H. Meerkamm: „Integrierte Produktentwicklung“, Hanser, 2013.
- [7] EU-Parlament: „Richtlinie 2006/42/EG des europäischen Parlaments und des Rats vom 17. Mai 2006“. Amtsblatt der Europäischen Union, S. L157/24ff, 2006.
- [8] Promotorengruppe Kommunikation der Forschungsunion Wirtschaft – Wissenschaft (Hrsg.): „Umsetzungsempfehlung für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0“, Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V., 2013.
- [9] Bitkom e.V., VDMA e.V., ZVEI e.V. (Hrsg.): „Umsetzungsstrategie Industrie 4.0“, Bitkom e.V., 2015.
- [10] J. Feldhusen, K.-H. Grote (Hrsg.): „Konstruktionslehre“, Springer Vieweg, 2013.
- [11] Bundesministerium für Bildung und Forschung: „Bekanntmachung von Richtlinien zur Förderung im Themenfeld ‚Additive Fertigung – Individualisierte Produkte, komplexe Massenprodukte, innovative Materialien (ProMat_3D)‘“, www.bundesanzeiger.de, 27.03.2015.
- [12] U. Seidler (Hrsg.): „Industrie 4.0: Beherrschung der industriellen Komplexität mit SysLM“, Springer Vieweg, 2013.
- [13] V. Ahrens, M. Hieronymus: „Das Kreismodell als Grundlage der Entwicklungsmethodik für cyber-physikalische Systeme“, in Plate, G. (Hrsg.): „Forschung für die Wirtschaft“, Cuvillier, 181ff (2014).

MODELLIERUNG VON BEDIENHANDLUNGEN IN VIRTUAL REALITY-UMGEBUNGEN

Leif Goldhahn, Dorit Bock

Hochschule Mittweida, Fakultät Ingenieurwissenschaften, Institut InnArbeit - Zentrum für innovative Arbeitsplanung und Arbeitswissenschaft

Mit der Etablierung von Techniken der Industrie 4.0 sind unter anderem Mensch-Maschine-Interaktionen zu implementieren, welche durch klare Regeln definiert sind, aber auch intuitiv und nachvollziehbar sein sollen und möglichst in der Projektierungsphase der Anlagen bereits realitätsnah getestet und abgestimmt werden. Dazu helfen die im ZIM-Forschungsprojekt „Entwicklung lebenszyklusorientierter Bedienkonzepte für komplexe, mechatronische Sonderanlagen - ELMES“ entstandenen Ergebnisse. Im Beitrag werden verschiedene Interaktionsmöglichkeiten zwischen Mensch und Maschine anhand einer virtuellen, automatisierten mechatronischen Sonderanlage am Virtual-Reality-System der Hochschule Mittweida vorgestellt. Voraussetzung für diese Interaktion ist die gezielte Erfassung, Speicherung, Auswertung und Verfügbarmachung von Maschinen- und Prozessdaten. Mittels der im Projekt erstellten Bedienhandlungen können nun Interaktionen und Reaktionen zwischen dem Bediener, dem Bedienpanel des Maschinenbedieners und der automatisierten mechatronischen Sonderanlage ausgetauscht werden.

1 Motivation

Die produzierende Industrie im europäischen Raum sieht sich gegenwärtig mit der Vierten Industriellen Revolution konfrontiert. In der Produktion steigt die Komplexität der Prozesse und somit auch die zur Bedienung notwendigen Daten an. Dabei sollen gleichzeitig die Intelligenz, Effizienz und Umweltschutz in einer robusten Produktion vereint werden [1]. Im Mittelpunkt steht zukünftig somit eine zweckmäßige Umstrukturierung und Rationalisierung, die durch neuartige Lösungskonzepte zur Gestaltung flexibler, technologisch moderner und global wettbewerbsfähiger Fertigungssysteme führt. Damit verbunden ist der Anspruch einer bzgl. der menschlichen Anforderungen konfigurierbaren Technik, welche die Notwendigkeit der menschlichen Anpassung weitgehend vermeidet.

Trotz der nahezu vollständigen Automatisierung von Montageanlagen ist eine Reihe von Tätigkeiten an vollautomatisierten Montageanlagen nach wie vor vom Menschen auszuführen. Dazu gehören Aktivitäten beim Anlauf der Fertigung, während des Betriebes, bei Änderungen, aber auch bei Instandhaltungsarbeiten. Gleichzeitig steigt die Anzahl gewonnener und zur Verfügung gestellter Daten und Informationen ständig weiter an, ohne dass

- in jedem Fall alle diese Informationen für die jeweils auszuführende Aufgabe tatsächlich benötigt oder
- die wichtigen Informationen in entscheidungsrelevanter Form zur Verfügung stehen und auch problemlos gefunden werden.

2 Bedienkonzept und resultierende Interaktionsanforderungen

Ziel des Projektes ELMES war es ein optimales Bedienkonzept zu entwickeln, welches sich an die Arbeitsaufgaben der einzelnen Nutzergruppen anpasst und durch seine Modularität und Flexibilität für eine Mehrzahl unterschiedlicher Sonderanlagen geeignet ist. Die spezifischen Anforderungen, die sich aus den charakteristischen Anforderungen einer jeden Sonderanlage ergeben, sollen durch eine

individuelle Konfigurierbarkeit gewährleistet werden. Der Nutzer findet sich dadurch deutlich schneller im Bedienkonzept zurecht und erhält eine für seine Arbeitsaufgabe angepasste Bedienoberfläche mit den notwendigen Informationen. Dadurch können die für die Bedienung notwendigen Zeiten und Fehlbedienungen reduziert werden.

Damit der Nutzer mit der Maschine kommunizieren kann, ist eine Interaktion notwendig. Die Interaktion ist ein „wechselseitiger Austausch von Daten zwischen einem Operator und einem System“ [2]. Diese Sicht ist im Fall von Sondermaschinen um physische (Teil-) Handlungen und Operationen zu ergänzen.

Die typische Schnittstelle zwischen Mensch und automatisierter Maschine des Sonderanlagenbaus wird durch unterschiedliche Ausprägungen von z. T. technisch anspruchsvollen Geräten geprägt, welche in der Lage sind, Funktionen auf Anweisung des Benutzers zu beeinflussen bzw. über Zustände zu informieren. Gemäß [3] wird ein System „als interaktiv [...] bezeichnet, bei dem der Benutzer durch Bedienhandlungen den Arbeitsablauf des Systems [direkt] beeinflussen kann“ (vgl. [4]). Bild 1 zeigt das Prinzip der typischen Interaktion von automatisierter Fertigungsmaschine und Bediener.

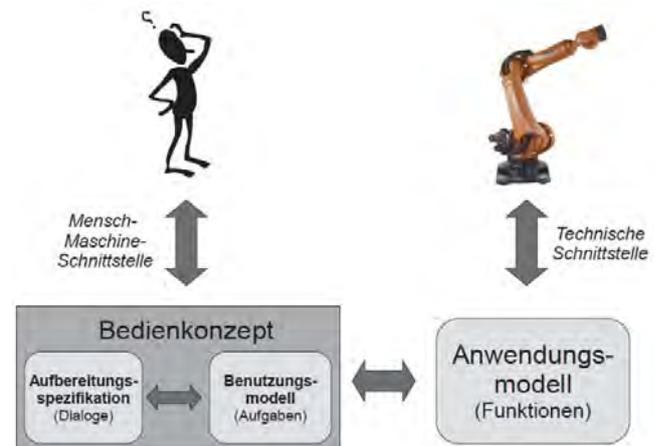


Bild 1: Erweitertes Modell der Mensch-Maschine-Interaktion

Das in dieser Veröffentlichung zu Grunde liegende Bedienkonzept besteht aus den in Bild 2 dargestellten vier Elementen:

- Aufgabenstruktur
- Abläufe
- Bedienfunktion und
- Nutzergruppe.

Mittels dieser vier Elemente lässt sich das gesamte Bedienkonzept aufgabenorientiert und zunächst plattform- und auch weitgehend hardwareunabhängig beschreiben.

Zunächst ist die statische Aufgabenstruktur zu bestimmen. Dabei werden die im Rahmen der Gesamtaufgabe erforderlichen Bedienhandlungen festgelegt. Auf deren Grundlage sind im Zusammenspiel mit den technischen Erfordernissen der Anlage (notwendige Ablauffolgen, Regeln und Bedingun-

gen) und unter Beachtung sonstiger Randbedingungen, die die Ausführung des Bedienprozesses beeinflussen, die Abläufe zur Erfüllung der jeweiligen Bedienhandlung zu definieren. Daraus ergeben sich u. a. die zu verwendenden Bedien- und Hilfsmittel. Anschließend ist zu ermitteln, durch welche Bedienfunktionen sich die einzelnen Ablaufelemente zweckmäßig erfüllen lassen. Darauf basiert das eigentliche Softwarekonzept, ohne dabei auf eine bestimmte Anwendung festgelegt zu sein. Um der Forderung nach einem auf die Art des Bedieners eingehenden Konzept nachkommen zu können, ist im letzten Schritt festzulegen, welche Nutzergruppe die Berechtigung für die jeweilige Handlung besitzt. Für die Darstellung der Grundelemente des Bedienkonzeptes können jeweils morphologische Kästen zur Anwendung kommen.

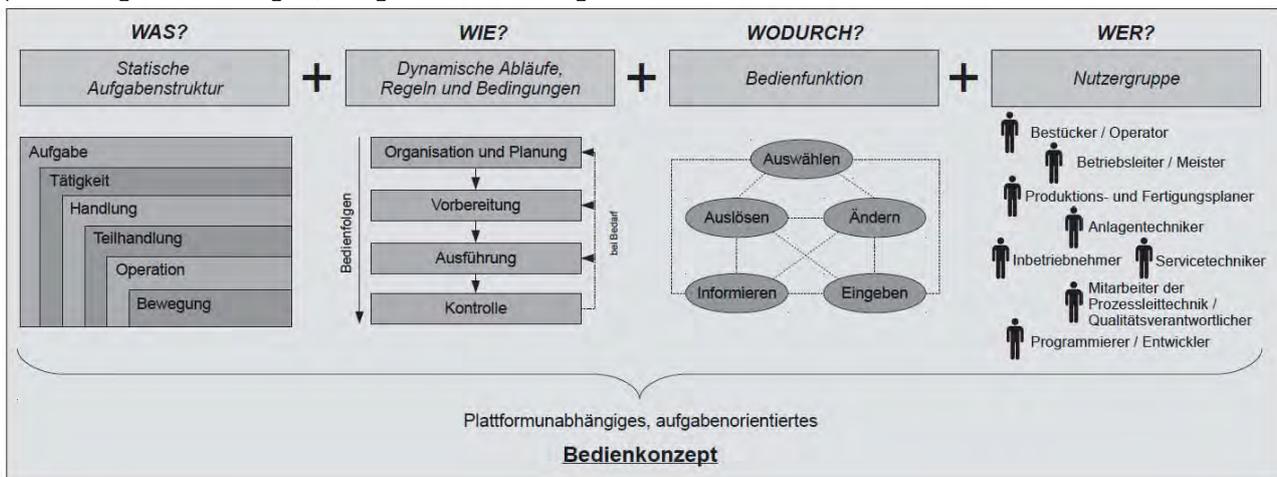


Bild 2: Technische Varianten zur Bedienung einer virtuellen Sonderanlage

3 Grundlegende Modellerstellung und Gerätewahl

3.1 CAD-Modellierung

Die Grundlage für eine realistisch funktionsfähige Gestaltung einer virtuellen Sonderanlage ist die Modellierung in einer CAD-Software. Nach der Erstellung der einzelnen Modelle im CAD-Programm erfolgt der Export der Daten in ein universelles Austauschformat für 3D-Objekte (z. B. VRML (standardisiertes Format – Norm ISO/IEC 14772-1 [5])).

Eine detaillierte Nacharbeit in der an der Hochschule genutzten VDP (Visual Decision Platform) der ESI Group ist in der Regel nicht zu vermeiden. So muss bspw. jedes einzeln zu bewegende Teil (z. B. jeder Schalter oder Taster am virtuellen Bediengerät) einen separaten Knoten im Strukturbaum der Virtual-Reality (VR)-Software bilden. Außerdem sind die Knoten derart ineinander zu setzen, dass die realistisch erscheinende Bewegung gesamter Objekte möglich wird.

3.2 Virtual Reality-Anlage der Hochschule Mittweida

Zum praktischen Testen der im Projekt erstellten Anwendung wurde das Virtual-Reality-System der Hochschule Mittweida, Fakultät Ingenieurwissen-

schaften genutzt. Bei dem verfügbaren Virtual-Reality-System handelt es sich um eine Powerwall mit optischem Infrarot-Tracking. Für die Darstellung von Bedienhandlungen im virtuellen Raum sind hauptsächlich der Flystick sowie die aktiven Targets für das Tracken der Hände und Finger von Bedeutung. Der Flystick und/oder das Fingertracking dienen für die Interaktion am VR-System und mittels der Masterbrille wird die Blickrichtung des Nutzers im Raum ermittelt und damit die Basis für eine korrekte stereoskopische Projektion gebildet. Als Softwarelösung zur Anwendung des VR-System wird die Visual Decision Platform (VDP) verwendet.

3.3 Auswahl von Bediengeräten

Als ein konkreter Lösungsansatz zur Umsetzung eines effektiven Bedienkonzeptes bietet sich die Nutzung von Wireless-Technologien sowie damit verbunden die Einführung mobiler Endgeräte (Tablet-PCs, PDA) an. Dadurch wird der jeweilige Nutzer in die Lage versetzt z. B. über Störungen informiert zu werden, ohne direkt an der Anlagenkomponente stehen zu müssen. Dies führt in Verbindung mit einem nutzerbezogenen Bedienkonzept zur deutlichen Reduzierung von Ausfallzeiten.

Es wurde die Eignung der nachfolgend genannten Bediengeräte für die vorliegenden Anwendungsfälle

untersucht:

- Tastatur,
- Maus, Spacemaus,
- Scanner,
- Trackball, Joystick,
- Grafiktablett,
- Touchscreen,
- Flachbildschirm, Plasma-Display,
- Lautsprecher, Mikrofon,
- Videokamera.

In der Praxis ist die Touchscreen-Technologie die verbreitetste, weil sowohl Darstellung, als auch Interaktion direkt am Interaktionsgerät stattfinden können, was eine intuitive Bedienung am ehesten ermöglicht. Allerdings bedarf die Touchscreen-basierte Bedienung eines angepassten Bedienkonzeptes im Vergleich zu anderen Bediengeräten.

Hinsichtlich der technischen Ausführung wird zwischen optischen, akustischen, resistiven, kapazitiven und piezoelektrischen Touchscreens unterschieden.

4 Realisierung

4.1 Variantenübersicht

Die Bedienung einer virtuellen Sonderanlage ist im vorliegenden Konzept grundsätzlich nach den folgenden drei Varianten möglich (siehe Bild 3)

- Variante 1: Reales Bediengerät (Tablet-PC) + realer Bediener
- Variante 2: Virtuelles Bediengerät (CAD-Modell) + realer, getrackter Bediener (z. B. mittels Handtarget)
- Variante 3: Virtuelles Bediengerät (CAD-Modell) + virtueller Bediener (digitales Mensch-Modell; vgl. [6]).

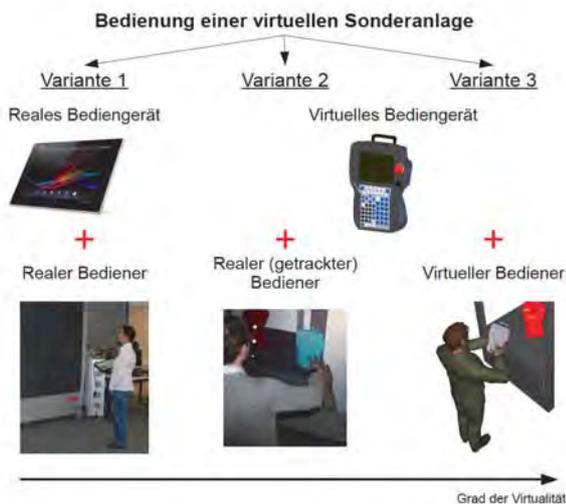


Bild 3: Technische Varianten zur Bedienung einer virtuellen Sonderanlage

Das Ziel der entworfenen und implementierten Systemvarianten besteht darin, die für die Bedienung notwendigen Handlungen und Folgen virtuell abbilden und somit ressourcenschonend überprüfen zu können. Dies wurde für ausgewählte Vorgänge erfolgreich demonstriert.

4.2 Variante 1: Virtuelle Anlage + reales Bediengerät + realer Bediener

Zur Realisierung der Variante eins wurde eine Testumgebung mit einem geeigneten Bedieninterface auf einem Tablet-PC erstellt und die Programmierung der Schnittstelle zwischen virtueller Beispielanlage und Bediengerät realisiert. Bei der Entwicklung der Bedienoberfläche sind dabei die im Entwurf erarbeiteten Punkte zum Aufbau und zur Gestaltung des Bedieninterfaces (z. B. Eigenschaften der Zeichendarstellung [7], Meldung von Betriebszuständen [8]) mit einer Java-Programmierung weitgehend umgesetzt worden (Bild 4).

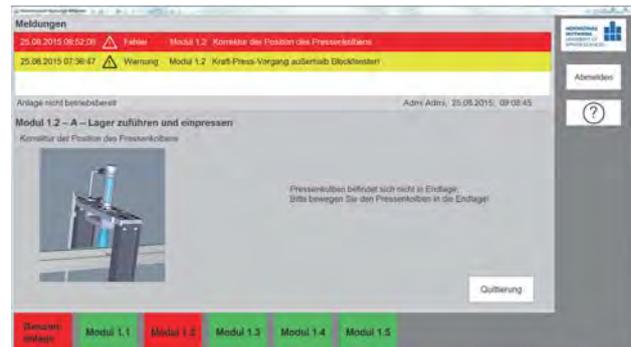


Bild 4: Bedienoberfläche des Bediengeräts

Bei der zu realisierenden Schnittstelle zwischen realem Bediengerät und virtueller Anlage ist ein laufender, simultaner Abgleich der Anlagenzustände sicherzustellen, um z. B. die im virtuellen Modell der Sonderanlage erzeugten Meldungen zeitnah an das Bediengerät weiterzugeben. Die dazu benötigte Kommunikation zwischen den physischen und virtuellen Systemen (Bediengerät und VR-Anlage) wurde mittels User Datagram Protocol (UDP) umgesetzt (vgl. [9]), da dieses echtzeitnah Daten innerhalb des Netzwerkes übermittelt.

Durch die Kopplung mit einem realen Bediengerät ist es möglich, den Arbeitsplatz des Maschinenbedieners realitätsnah an der virtuellen Anlage nachzuempfinden. Dadurch ist es bspw. möglich, schon vor der eigentlichen Inbetriebnahme einer Anlage, die Bediener mittels einer virtuellen Anlage zu schulen (Bild 5).



Bild 5: Kommunikation zwischen Bediengerät und virtueller Anlage

4.3 Variante 2: Virtuelle Anlage + virtuelles Bediengerät + realer, getrackter Bediener

Bei dieser Variante ist es möglich, den virtuellen Roboter mit Hilfe geeigneter realer Eingabegeräte (Handtargets) und virtueller Eingabegeräte (Markierung im Bild 6) durch den Bediener zu steuern. Bild 6 zeigt im Vordergrund das virtuelle Bediengerät, mit welchem verschiedene Bewegungen der Roboterachsen und Ereignisse (z. B. Start bzw. Unterbrechen des automatischen Programmablaufs) am Roboter durch den Bediener ausgeführt werden können. Dies geschieht durch eine virtuelle Bedienhandlung auf dem Bediengerät, wobei die dafür notwendige (Bedien-)Handlung durch den Bediener real auszuführen ist. Als Reaktion auf diese reale Bedienhandlung startet der Roboter den vorgegebenen Bewegungsablauf und unterrichtet ihn bei erneuter Bedienhandlung.

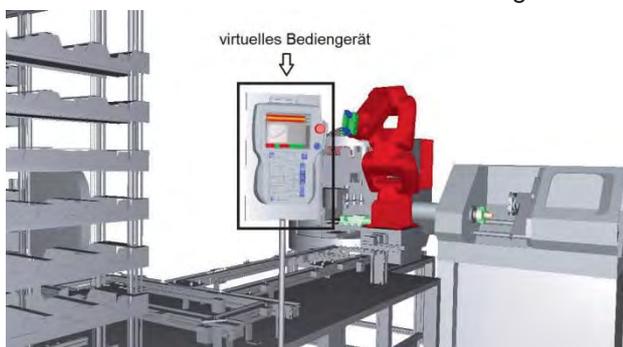


Bild 6: Trainingsfabrik mit virtuellem Bediengerät für Roboter

Die Schnittstelle zwischen realer und virtueller Welt wird mittels Handtarget (Flystick) und virtueller Hand ermöglicht. Die Schnittstelle zwischen (realem) Mensch und virtueller Maschine entsteht somit über die VR-Hardware-Eingabegeräte am virtuellen Bediengerät.

5 Fazit und Ausblick

Innovatives Ziel des Projektes war die Entwicklung eines neuartigen Bedienkonzeptes für mechatronische Sonderanlagen, welches durch seine Anpassbarkeit den individuellen Anforderungen verschiedener Nutzerkreise (Bediener, Einrichter, Servicetechniker etc.) gerecht wird und sich somit als gebrauchstauglich erweist, bspw. durch eine Einheitlichkeit und Einfachheit der Bedienung.

Durch dieses entwickelte standardisierte Bedienkonzept und dessen virtuelle Abbildung ist die zielgerichtete Projektierung neuer Anlagen unterstützbar. Anlagenspezifische Bedienhandlungen und Bedienstellen können sehr gut entworfen, visualisiert und realitätsnah getestet werden. Eine Reduzierung möglicher Bedienfehler lässt sich erwarten, die Modifizierung und Implementierung bzgl. der jeweils vorliegenden Anlage können schneller und kostengünstiger erfolgen und Fehler im Produktionsablauf kurzfristiger und zielführender lokalisiert sowie behoben werden.

Durch den zunehmenden Fachkräftemangel wird

einerseits die Fokussierung auf ältere Arbeitnehmer und andererseits eine schnelle und problemarme Einarbeitung neuer Mitarbeiter erforderlich. Diesem Problem kann u. a. mit intuitiv bedienbaren Mensch-Maschine-Schnittstellen begegnet werden.

Danksagung

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages



Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie für die finanzielle Unterstützung sowie dem Projektträger AiF Projekt GmbH, für die Betreuung des Forschungsprojektes „Entwicklung lebenszyklusorientierter Bedienkonzepte für komplexe, mechatronische Sonderanlagen (ELMES)“. Das Forschungsprojekt wurde vom Zentrum für innovative Arbeitsplanung und Arbeitswissenschaft (InnArbeit) der Hochschule Mittweida, der SITEC Industrietechnologie GmbH Chemnitz, sowie der Hiersemann Prozessautomation GmbH, Chemnitz bearbeitet.

Literaturverzeichnis

- [1] H. Seidel, Industrie 4.0 Check-up. In: M. Schenk (Hrsg.): Digital Engineering zum Planen, Testen und Betreiben technischer Systeme. Tagungsband, 18. IFF-Wissenschaftstage, Magdeburg. Stuttgart: Fraunhofer, ISSN 2196 – 7601, 2015, S. 15 - 18
- [2] VDI/VDE 3699 Blatt 1, Prozessführung mit Bildschirmen – Begriffe, Berlin, Beuth, 2015
- [3] A. M. Heinecke, Mensch-Computer-Interaktion: Basiswissen für Entwickler und Gestalter, 2. Auflage, Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2012
- [4] D. Zühlke, Nutzergerechte Entwicklung von Mensch-Maschine-Systemen: Useware-Engineering für technische Systeme, 2. Auflage Berlin, Springer-Verlag, 2012
- [5] ISO/IEC 14772-1:1997-12, Informationstechnik - Computergraphik und Bildverarbeitung - Virtuelle Realitätsmodellsprache - Teil 1: Funktionelle Spezifikation und UTF-8-Codierung, Berlin, Beuth, 1997
- [6] L. Goldhahn, C. Thümer, Unterstützung Virtual-Reality-basierter Lernumgebungen durch digitale Mensch-Modelle. In: GfA – Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. (Hrsg.): Gestaltung der Arbeitswelt der Zukunft, Dortmund, GfA Press, (2014), S. 366 – 368
- [7] VDI/VDE 3699 Blatt 2, Prozessführung mit Bildschirmen – Grundlagen, Berlin, Beuth, 2014
- [8] DIN 19235, Messen, Steuern, Regeln; Meldung von Betriebszuständen, Berlin, Beuth, 1985
- [9] D. Abts, Masterkurs Client/Server-Programmierung mit Java, Vieweg+Teubner Verlag, Springer Fachmedien, 3. Auflage, 2010

ASSET TRACKING MITTELS KOOPERATIVER LOKALISIERUNG IN DRAHTLOSEN SENSORNETZEN

André Hanak

Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS, Nordostpark 93, D-90411 Nürnberg

In vielen Industrie 4.0-Anwendungen ist die Lokalisierung von Gegenständen eine zentrale Herausforderung. Benötigt wird diese beispielsweise zur Güterverfolgung (Asset-Tracking) oder als Grundlage für komplexe Entscheidungen in der Prozesslogik. Das Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS bietet SmartTracking als Lösung dieser Herausforderungen basierend auf der s-net[®]-Technologie für drahtlose Sensornetze an. Die Wahl der Lokalisierungsalgorithmen hat dabei einen großen Einfluss auf die Einsetzbarkeit und die Kosten des Systems. Dieser Beitrag diskutiert Stärken und Schwächen einiger Algorithmen und gibt einen Einblick in ein kooperatives Verfahren basierend auf dem Fingerprinting-Algorithmus.

The localization of objects is a central challenge in many Industry 4.0 applications. It's required in asset tracking scenarios or as a basis for complex decisions in process logic. The Fraunhofer Institute for Integrated Circuits IIS offers SmartTracking as a solution for that kind of challenges based on the s-net[®] technology for wireless sensor networks. The choice of the localization algorithm has great impact on the applicability and costs of such a system. This article discusses pros and contras of some algorithms and gives a short insight into a cooperative technique based on the fingerprinting algorithm.

1. Einleitung

Das Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS bietet SmartTracking unter anderem als Lösung zur Lokalisierung in Industrie 4.0-Szenarien an. In vielen Industrieanwendungen ist die Lokalisierung von Gegenständen eine zentrale Herausforderung. Benötigt wird diese beispielsweise zur Güterverfolgung (Asset-Tracking) oder als Grundlage für komplexe Entscheidungen in der Prozesslogik. SmartTracking basiert auf der s-net[®]-Technologie für drahtlose Sensornetze. Die Lokalisierungsalgorithmen werden direkt auf den Sensorknoten ausgeführt. Dadurch entstehen intelligente Objekte, die sich ihrer direkten Umgebung inklusive der eigenen Position bewusst sind. Anwendungen wie Geofencing können direkt auf dem Knoten umgesetzt werden. Durch Kenntnis der eigenen Position und anderer durch Sensoren erfassten Informationen können so komplexe Entscheidungen in Produktionsprozessen getroffen werden. Die s-net[®]-Technologie wurde für besonders energiesparende Sensornetze entwickelt. Ein weiterer Vorteil liegt in der Multi-Hop-Fähigkeit. Dank dieser können großflächige Ad-Hoc-Netze weit über die Funkreichweite einzelner Knoten hinaus mit geringem Installationsaufwand in Betrieb genommen werden. Die Wahl der Lokalisierungsalgorithmen hat dabei erhebliche Auswirkungen auf wichtige Systemparameter. Geht es darum die Systeme produktiv zu betreiben, dann spielen Batterielebensdauer, Latenz, Skalierbarkeit, Robustheit und die Genauigkeit der Verfahren eine große Rolle. In diesem Beitrag werden verschiedene Ansätze für die Lokalisierung in Sensornetzen diskutiert. Im Folgenden werden RSSI-basierte Verfahren betrachtet, da für die Produktion überwiegend der Einsatz in Gebäuden von Bedeutung ist. Signalstärkebasierte Verfahren wie Fingerprinting eignen sich für solche Umgebungen, in denen keine Sichtverbindung vorausgesetzt werden kann.

2. Infrastruktur

Bei SmartTracking kommen baugleiche Sensorknoten zum Einsatz, deren Rollen im Sensornetz jedoch unterschiedlich sind:

- Ortsfeste Ankerknoten senden regelmäßig Broadcastnachrichten, auch „Beacons“ genannt, an alle Sensorknoten in direkter Nachbarschaft. Empfangen werden diese von allen Geräten innerhalb der Funkreichweite.
- Mobile Sensorknoten nutzen die ausgesandten Nachrichten der Ankerknoten, um die eigene Position zu schätzen.

Je nach Lokalisierungsverfahren erhalten die verschiedenen Rollen weitere Aufgaben.

3. Gewichteter Schwerpunkt (WCL)

Eine wenig komplexe und sehr praxistaugliche Lösung liegt in der Berechnung eines gewichteten Schwerpunktes zwischen den gehörten Ankerknoten in der Umgebung [1]. Dieser Schwerpunkt wird nach Filterung als geschätzte Position verwendet. Im Gegensatz zum normalen Schwerpunkt, bei dem alle Ankerpositionen gleichermaßen in die Berechnung eingehen, werden beim gewichteten Schwerpunkt die Signalstärken (RSSI-Werte) der Anker zusätzlich als Gewichte verwendet. So liegt die geschätzte Position näher an Ankern, die mit höherer Signalstärke empfangen werden.

Die Positionen der Anker müssen bei diesem Verfahren bekannt sein. Bei SmartTracking senden die Anker deshalb die eigene Position in den Nutzdaten der Broadcast-Pakete aus.

Diese Vorgehensweise unterliegt jedoch systematischen Fehlern. So ist die Ausbreitung von Funksignalen innerhalb von Gebäuden häufig sehr inhomogen und die hier getroffene Annahme, dass höhere Signalstärken auf eine geringere Distanz zum Anker zurückzuführen sind, ist oftmals wenig zutreffend.

Zudem unterliegen die gemessenen RSSI-Werte auch aufgrund des Mehrwegeschwunds großen Schwankungen. Dennoch liefert das Verfahren in der Praxis bei geringem Aufwand oftmals zufriedenstellende Ergebnisse.

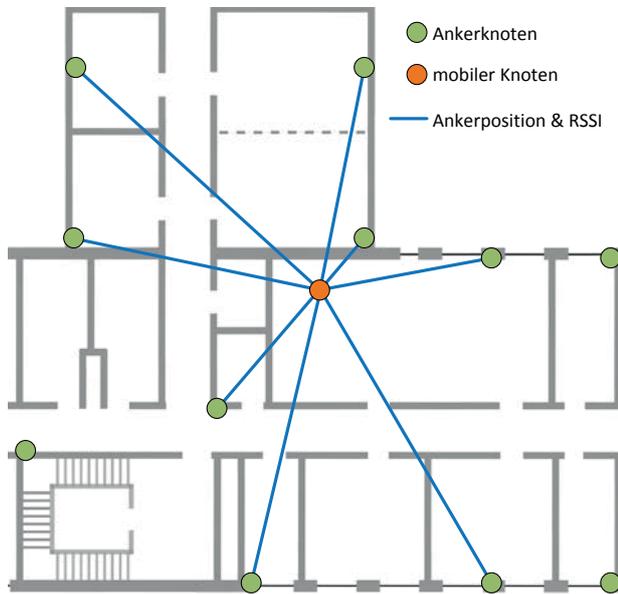


Bild 1: Der mobile Knoten (orange) berechnet seine Position anhand der RSSI-Werte und übertragenen Positionen der Ankerknoten (grün)

5. Fingerprinting

Zur Lokalisierung mit dem Fingerprinting-Verfahren [2] ist es nötig, zunächst den Bereich einzumessen, in dem lokalisiert werden soll. In der so genannten Offline-Phase wird an bekannten Positionen gemessen, welche Anker wie stark gehört werden. Diese Liste von Ankernamen oder -adressen und der zugehörigen RSSI-Werte wird anschließend zusammen mit der Position als Referenzpunkt gespeichert. Aus vielen eingemessenen Referenzpunkten entsteht schließlich der Referenzpunktteppich.

Während der Lokalisierung selbst (Online-Phase) misst der mobile Sensorknoten welche Anker mit welcher Signalstärke gehört werden. Die daraus entstandene Liste (der Fingerprint) wird mit dem Referenzpunktteppich verglichen und darauf basierend eine Auswahl von gut passenden Referenzpunkten zusammengestellt. Anschließend wird entweder der Referenzpunkt mit der besten Übereinstimmung als eigene Position übernommen oder die Liste mit den besten Treffern wird verwendet, um mit Hilfe des gewichteten Schwerpunkts die Position zu errechnen.

Das Fingerprinting-Verfahren führt zu besseren Positionsschätzungen, wenn die Funkausbreitung sehr inhomogen ist. Dies sind Bedingungen unter denen WCL schlechter funktioniert.

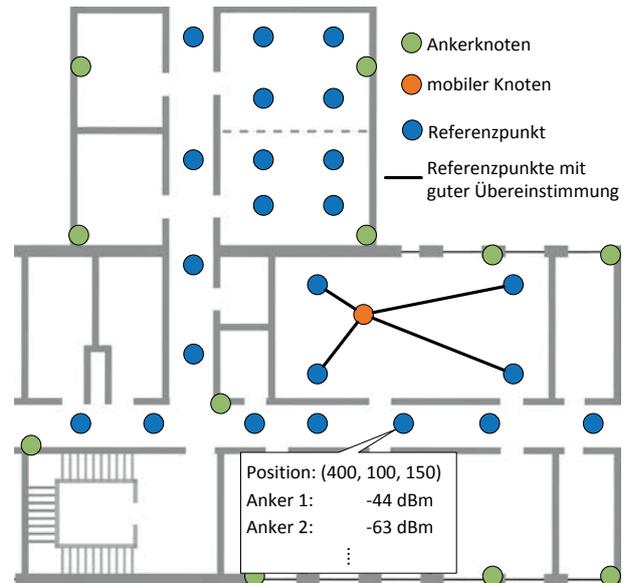


Bild 2: Referenzpunkte (blau) enthalten Messungen der Signalstärken der hörbaren Ankerknoten (grün)

Die Ankerpositionen müssen nicht bekannt sein und können so freier festgelegt werden. Der Bezug zu einem Koordinatensystem wird durch die Referenzpunkte hergestellt. Dennoch ist der Aufwand zur Inbetriebnahme eines solchen Systems aufgrund der Offline-Phase hoch. Zudem muss der Einmessvorgang bei größeren Änderungen am Gebäude oder der Infrastruktur wiederholt werden.

6. Kooperative Verfahren

In vielen Anwendungen ist auch der Installationsaufwand ein wichtiger Kostenfaktor. Während das Sensornetz selbst mit sehr geringem Aufwand ausgebracht werden kann, ist die Offline-Phase bei Fingerprinting-Verfahren besonders in großen Gebäuden ein zeitintensiver Arbeitsschritt. Aus diesem Grund ist in SmartTracking-Projekten in der Vergangenheit vor allem der WCL-Algorithmus zum Einsatz gekommen. Dennoch bleibt die Genauigkeit, die selbst nach Optimierungen erreicht werden kann, beschränkt. Wünschenswert wäre ein Fingerprinting-Verfahren ohne Offline-Phase.

Ein entsprechendes Verfahren wurde am Fraunhofer IIS entwickelt. Dabei übernehmen die ortsfesten Ankerknoten das Einmessen. Kontinuierlich hören diese nach Broadcastnachrichten der anderen Anker. Gespeichert wird eine Liste der gehörten Anker und der zugehörigen RSSI-Werte. Die Anker haben wie bei WCL die eigene Position fest konfiguriert. So entsteht an der Position des Ankers ein Referenzpunkt für das Fingerprinting-Verfahren. Die Ankerinfrastruktur misst ständig die Umgebung ein und es entsteht ein verteilter Referenzpunktteppich. Diese Referenzpunkte werden von den Anker direkt in der Nachbarschaft als Broadcastnachrichten ausgesendet.

Die mobilen Sensorknoten empfangen dann über die Luft die Referenzpunkte in ihrer direkten Umgebung. Zusätzlich wird genauso wie bei WCL oder gewöhnlichem Fingerprinting erfasst, welcher Anker

wie laut gehört wird. Ein leicht angepasster Fingerprinting-Algorithmus wird anschließend zur Berechnung der Position genutzt. Dabei werden die Messungen des Sensorknotens mit den empfangenen Referenzpunkten verglichen.

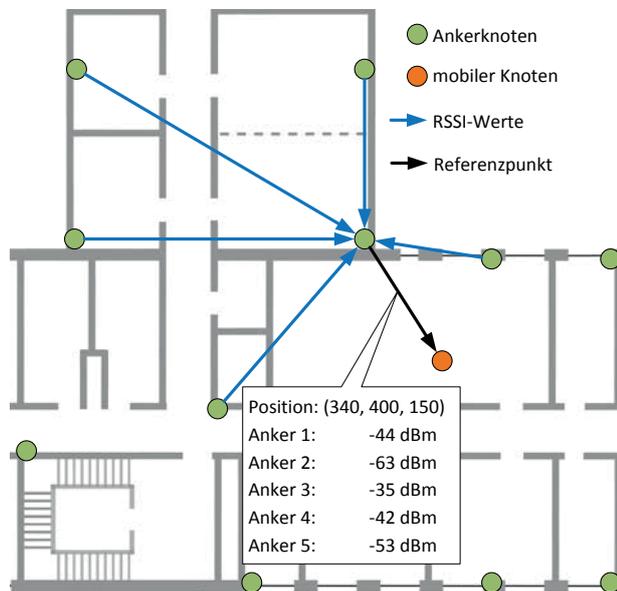


Bild 3: Ankerknoten erstellen Referenzpunkte an der eigenen Position und senden diese aus

Im Gegensatz zum normalen Fingerprinting sind die Referenzpunkte hier identisch mit den Ankerpositionen. Der Referenzpunktteppich ist weniger dicht. Deshalb muss bei vergleichbarer Infrastruktur mit einer geringeren Genauigkeit als bei Fingerprinting mit Offline-Phase gerechnet werden. Allerdings hat die Lösung den Vorteil, dass der Referenzpunktteppich immer aktuell ist. Bei baulichen Veränderungen muss bei gewöhnlichem Fingerprinting erneut eingemessen werden. Im Gegensatz zu WCL basiert die Lokalisierung nicht alleine auf dem RSSI-Wert zum jeweiligen Anker, sondern auf dem Ergebnis des Vergleichs von Referenzpunkten.

5. Auswertung der Positionsfehler

In Abschnitt 6 wurde ein kooperatives Verfahren vorgestellt. Um die Positionsgenauigkeit in einem Sensornetz zu überprüfen, wurde ein Stockwerk in einem Abschnitt eines Bürogebäudes mit 19 Anker ausgestattet. An drei Stellen wurden Endknoten verteilt, die die von den Anker ausgesendeten Broadcast-Nachrichten und die zugehörigen RSSI-Werte ausleiten, um die Daten mit einem Computer aufzuzeichnen. Diese Daten wurden letztendlich als Eingabe für eine PC-Simulation der Sensorknoten einmal mit WCL-Algorithmus und einmal mit dem kooperativen Fingerprinting-Verfahren genutzt. Für jeden der drei Knoten lagen etwa 470 Positionsschätzungen vor.

In Bild 4 ist zu erkennen, dass der Mittelwert des Positionsfehlers bei WCL mit 2,6 m in diesem Szenario etwas höher ist als bei dem kooperativen Verfahren (2,3 m). Für die Messungen wurde die Para-

metrisierung der Algorithmen nicht weiter optimiert.

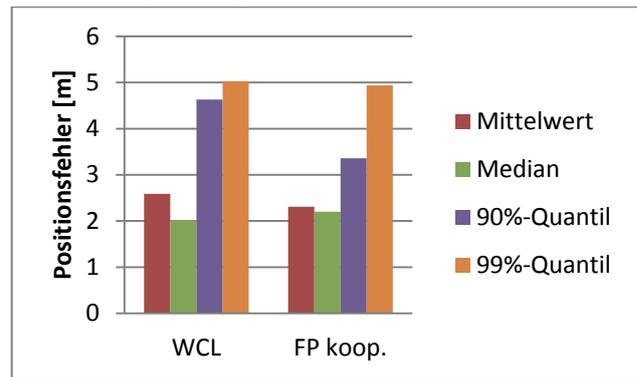


Bild 4: Vergleich der Positionsfehler

5. Zusammenfassung und Ausblick

Je nach Einsatzzweck eignen sich verschiedene RSSI-basierte Lokalisierungsverfahren für Szenarien des Asset-Tracking im Industrieumfeld. Das Fingerprinting-Verfahren erlaubt präzise Lokalisierung in sehr heterogenen, aber sich nicht verändernden Umgebungen. Dahingegen bietet WCL die Möglichkeit, Lokalisierung bei geringem Installationsaufwand für die Infrastruktur anzubieten. Das unter 6. vorgestellte Verfahren zur kooperativen Lokalisierung erlaubt es, den Fingerprinting-Algorithmus ohne die zeit- und kostenintensive Offline-Phase einzusetzen. Zudem soll das Verfahren durch die kontinuierliche Überwachung der Umgebung durch die Anker auch robust gegen bauliche Veränderungen sein. Da der Installationsaufwand identisch dem bei WCL ist, eignet sich das Verfahren besonders dann, wenn die Installation günstig sein muss. In der Auswertung lässt sich erkennen, dass das kooperative Verfahren prinzipiell funktioniert. So kann es als Alternative zu WCL in Betracht gezogen werden.

Danksagung

Einige Ergebnisse stammen aus dem Projekt Daealus, gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (Förderkennzeichen 50NA1311) unter der Projekträgerschaft vom Raumfahrtmanagement des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR).

Literaturverzeichnis

- [1] Blumenthal, J.; Reichenbach, F.; Timmermann, D.: Position estimation in ad hoc wireless sensor networks with low complexity. In: Joint 2nd Workshop on Positioning, Navigation and Communication, 2005, S. 41–49
- [2] Bahl, P.; Padmanabhan, V.: RADAR: an in-building RF-based user location and tracking system. In: INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE Bd. 2 IEEE, 2000, S. 775–784

HYDRAULISCHE ERMITTLUNG VON BOHRUNGSKONIZITÄTEN ZUR REGELUNG EINER MECHANISCHEN FERTIGUNG

Jan Neumann
Continental Automotive GmbH

In Zeiten immer kürzer werdender Produktentwicklungszyklen, steigender Kostendrücke und Wettbewerbsverschärfung sind praktische Versuche zum Ergründen bisher unbekannter Zusammenhänge in Forschung und Entwicklung sowie in bereits bestehenden Produktionssystemen unabdingbar geworden.

Die nachfolgende Abhandlung zeigt, wie durch Korrelationsbildung eine bisher taktile und zeitaufwändige Messung von Bohrungskonzizitäten in eine voll hydraulische Messung überführt und somit ein paralleler Regelkreis zur existierenden Zielgröße aufgebaut werden konnte.

Damit ist es möglich den Produktionsprozess in verkürzter Form mittels Postprozessmessung direkter zu überwachen, was gleichzeitig mit einer Risikomengenreduzierung bezüglich Fehlproduktion einhergeht.

EVALUATION OF UNCERTAINTY OF COORDINATE MEASUREMENTS TREATED AS INDIRECT MEASUREMENTS

Wojciech Płowucha, Władysław Jakubiec
University of Bielsko-Biała, Willowa 2, PL43-309 Bielsko-Biała

Summary

The paper presents methodology for deriving formulae serving as measuring task models used for evaluation of uncertainty of coordinate measurements. The models are based on the minimal number of probing points required for calculating particular characteristic. Moreover, the formulae for particular characteristics are presented as function of differences of coordinates of pairs of points. Simple examples are presented: measurement of diameter of a circle and measurement of flatness. In order to verify the described methodology the experimental evaluation of the measurement uncertainty according to the procedure of ISO 15530-3 was carried out.

1. Introduction

Measurement uncertainty is an important component of the measurement result. The knowledge on the uncertainty is of especial importance for proper proving conformity/non-conformity with specifications.

According to [1, 2] the conformity with a specification (specified tolerance) is proved when the complete measurement result (consisting of the result y and its expanded uncertainty U), falls within the tolerance zone of a workpiece characteristic:

$$LSL < y - U \text{ and } y + U < USL \quad (1)$$

where: LSL – specified value giving the lower boundaries of the permissible value of the tolerance limits of a workpiece characteristic, USL – upper specification limit specified value giving the upper boundaries of the permissible value of the tolerance limits of a workpiece characteristic.

Similarly, the non-conformity with a specification is proved when the complete measurement result falls outside the tolerance zone of a workpiece characteristic

$$y + U < LSL \text{ or } USL < y - U \quad (2)$$

Therefore, neither conformity nor nonconformity with a specification can be proved when the complete measurement result includes one of the tolerance limits.

This fact is significant decision making problem. The industrial practice tends to situation where the measurement uncertainty U is small part of the tolerance. Ideally, if there is a relationship

$$U < 0,1T \quad (3)$$

where:

$$T = USL - LSL \quad (4)$$

In that case it is permissible to use the simplified form of the condition (1), namely

$$LSL < y < USL \quad (5)$$

as well as the simplified form of the condition (2)

$$y < LSL \text{ or } USL < y \quad (6)$$

2. Measurement uncertainty

The problem of evaluation of measurement uncertainty is covered by the general document called the GUM (Guide to the expression of Uncertainty in Measurement) [3–5]. In particular, in the documents concerning measurement uncertainty, it is assumed that corrections have been applied to account for all recognized significant systematic effects. In this sentence one must underline the word „significant”, because there is no possibility nor need to include in the analysis „all” systematic effects. Of course, the judgement on which systematic effects are significant requires wide knowledge and good understanding of the measurement task.

The document [3] recommends composing so called uncertainty budget as a proper way to evaluate measurement uncertainty. The starting point is defining measurement model and evaluation of component uncertainties with one of the two methods described in the document. In the method of type A the component uncertainties are evaluated by the statistical analysis of series of observations, and in the method B by other means, however also in this method it is necessary to assume the type of probability distribution. The document [4] points out for third possibility of the uncertainty evaluation, namely Monte Carlo simulation. In the simulation the measurement model is also used. Moreover, the knowledge on the probability distributions describing the nature of particular factors influencing measurement result is required.

In case of direct measurements the measurement model has form of a linear function and particular uncertainty components usually (though there are exceptions) are added geometrically, according to the central theorem of probability. In case of indirect measurements, particular component uncertainties have assigned weights (sensitivity coefficients), which are calculated as partial derivatives of the measurement task model.

The important document concerning measurement uncertainty in the range of GPS (Geometrical Product Specification) is the standard ISO 14253-2 [6]. Of especial value are the examples included there, which concern simple measurement cases.

3. Evaluation of measurement uncertainty

The common measurement method in the wide understood machine industry are measurements with use of coordinate measuring machines. It is the reason for research of many scientific teams. The results of the research can be found in e.g. [7-16].

There are intensive ongoing standardization works in the range of evaluation of coordinate measurements' uncertainty. Up-to-date, this subject is considered by two documents [17, 18].

In the first [17] the experimental approach is described with many details. The proper experiment includes repeated measurement of a calibrated workpiece. The uncertainty is evaluated here by statistical analysis of the gathered results. The procedure is easy to implement for element of simple geometrical form, for which (calibrated) artefacts manufactured and measured with high accuracy are available. Much harder and especially more expensive is application of this method to the workpieces of complex geometrical form, for which geometrical specification included not only dimensions but also different geometrical deviations.

The second document [18] was meant to deal with simulation technique. The title of the standard ("Evaluating task-specific measurement uncertainty using simulation") proves this. However, the standard does not include many information on the simulation technique but it focuses of the scope of information which is to be given to the user of uncertainty evaluation software (UES) by the software provider (it does not necessarily mean the simulation software).

The coordinate measurements are often treated as direct measurements, because the results given of the measuring report do not require any additional calculation. However, the measuring tasks models which are used for uncertainty evaluation should consider the fact that coordinate measurement are of their nature indirect measurements – directly are measured coordinates of points, from which next geometrical characteristics are calculated i.e. dimensions and geometrical deviations. This is done in the simulation software. In the simulation process, the probed points are disturbed by the random errors. The measured characteristics are often calculated by use of the same software, which controls the CMM.

4. Measurement task models

The fundamental characteristics used for geometrical specification of machine parts are dimensions and (most of all) geometrical deviations [19-21]. Each characteristic requires individually defined measurement model i.e. formula of algorithm describing the way to calculate its value basing on the "measured" coordinates of the points. This fact is connected with the often used in literature term „task-specific uncertainty”.

The paper presents methodology for deriving formulae serving as measuring task models. The models

are based on the minimal (from mathematical point of view) number of probing points required for calculating particular characteristic. Moreover, the formulae for particular characteristics are presented as function of differences of coordinates of pairs of points. Simple examples are presented like e.g. measurement of diameter of a circle. The simplicity of the example originates mainly from the small number of points required.

5. Circle diameter measurement model

To derive the formula for circle diameter one can use the formula for the radius of the circle circumscribed on a triangle

$$R = \frac{abc}{4S} \quad (7)$$

where a , b and c are lengths of the triangle sides, and S is the area of a triangle.

The points belonging to the circle are designated as $A(x_A, y_A, z_A)$, $B(x_B, y_B, z_B)$ and $C(x_C, y_C, z_C)$ (Fig. 1).

To investigate the influence of the probing strategy on the measurement uncertainty all evaluation and experiments were repeated for 4 sets of points (point C is common for all sets).

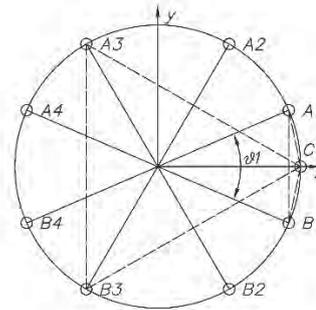


Fig. 1. The model of the circle diameter measurement as the radius of circle circumscribed on a triangle (4 sets of points A, B, C)

The lengths of particular sides can be calculated as

$$\begin{aligned} a &= \sqrt{(x_C - x_B)^2 + (y_C - y_B)^2 + (z_C - z_B)^2} \\ b &= \sqrt{(x_C - x_A)^2 + (y_C - y_A)^2 + (z_C - z_A)^2} \\ c &= \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + (z_B - z_A)^2} \end{aligned} \quad (8)$$

To simplify the notation in the following parts of the paper the following notation is used: $x_{CB} = x_C - x_B$, $y_{CB} = y_C - y_B$ etc.

Therefore

$$\begin{aligned} a &= \sqrt{x_{CB}^2 + y_{CB}^2 + z_{CB}^2} \\ b &= \sqrt{x_{CA}^2 + y_{CA}^2 + z_{CA}^2} \\ c &= \sqrt{x_{BA}^2 + y_{BA}^2 + z_{BA}^2} \end{aligned} \quad (9)$$

The area of the triangle can be calculated according to one of 3 formulae arising from definition of vector product of two vectors:

$$S = \frac{1}{2}|AB \times AC| = \frac{1}{2}|AB \times BC| = \frac{1}{2}|AC \times BC| \quad (10)$$

In the first case one gets

$$S = \frac{1}{2} \sqrt{(y_{BA}z_{CA} - y_{CA}z_{BA})^2 + (x_{CA}z_{BA} - x_{BA}z_{CA})^2 + (x_{BA}y_{CA} - x_{CA}y_{BA})^2} \quad (11)$$

Finally for the three possibilities one gets following formulae for radius:

Version 1

$$R = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{(x_{CB}^2 + y_{CB}^2 + z_{CB}^2)(x_{CA}^2 + y_{CA}^2 + z_{CA}^2)}{(y_{BA}z_{CA} - y_{CA}z_{BA})^2 + (x_{CA}z_{BA} - x_{BA}z_{CA})^2 + (x_{BA}y_{CA} - x_{CA}y_{BA})^2} + \frac{(x_{BA}^2 + y_{BA}^2 + z_{BA}^2)}{(y_{BA}z_{CB} - y_{CB}z_{BA})^2 + (x_{CB}z_{BA} - x_{BA}z_{CB})^2 + (x_{BA}y_{CB} - x_{CB}y_{BA})^2}} \quad (12)$$

Version 2

$$R = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{(x_{CA}^2 + y_{CA}^2 + z_{CA}^2)(x_{BA}^2 + y_{BA}^2 + z_{BA}^2)}{(y_{BA}z_{CB} - y_{CB}z_{BA})^2 + (x_{CB}z_{BA} - x_{BA}z_{CB})^2 + (x_{BA}y_{CB} - x_{CB}y_{BA})^2} + \frac{(x_{CB}^2 + y_{CB}^2 + z_{CB}^2)}{(y_{CA}z_{CB} - y_{CB}z_{CA})^2 + (x_{CB}z_{CA} - x_{CA}z_{CB})^2 + (x_{CA}y_{CB} - x_{CB}y_{CA})^2}} \quad (13)$$

Version 3

$$R = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{(x_{BA}^2 + y_{BA}^2 + z_{BA}^2)(x_{CB}^2 + y_{CB}^2 + z_{CB}^2)}{(y_{CA}z_{CB} - y_{CB}z_{CA})^2 + (x_{CB}z_{CA} - x_{CA}z_{CB})^2 + (x_{CA}y_{CB} - x_{CB}y_{CA})^2} + \frac{(x_{CA}^2 + y_{CA}^2 + z_{CA}^2)}{(y_{BA}z_{CB} - y_{CB}z_{BA})^2 + (x_{CB}z_{BA} - x_{BA}z_{CB})^2 + (x_{BA}y_{CB} - x_{CB}y_{BA})^2}} \quad (14)$$

It can be noticed that in each version the radius is a function of 9 differences of coordinates of pairs of points: $x_{BA}, y_{BA}, z_{BA}, x_{CA}, y_{CA}, z_{CA}, x_{CB}, y_{CB}, z_{CB}$. It turns out that using particular formulae leads to different evaluation of the measurement uncertainty.

For the case of no correlation between the input measurands (and it is achieved by expressing the radius as function of coordinates differences) the formula for standard uncertainty of the radius measurement is

$$u_R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial x_{BA}} \cdot u_{x_{BA}}\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial y_{BA}} \cdot u_{y_{BA}}\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial z_{BA}} \cdot u_{z_{BA}}\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_{CA}} \cdot u_{x_{CA}}\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial y_{CA}} \cdot u_{y_{CA}}\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial z_{CA}} \cdot u_{z_{CA}}\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_{CB}} \cdot u_{x_{CB}}\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial y_{CB}} \cdot u_{y_{CB}}\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial z_{CB}} \cdot u_{z_{CB}}\right)^2} \quad (15)$$

where $u_{x_{BA}}, u_{y_{BA}}, \dots, u_{z_{CB}}$, are standard uncertainties of measurement of particular differences of coordinates of pair of points.

The partial derivatives in the formula can be evaluated numerically

$$\frac{\partial R}{\partial x_{BA}} = \frac{R(x_{BA} + dx) - R(x_{BA})}{dx} \quad (16)$$

The uncertainties u_{R1}, u_{R2} and u_{R3} are calculated from each of the three formulae and the smallest value is assumed as the standard uncertainty

$$u_R = \min\{u_{R1}, u_{R2}, u_{R3}\} \quad (17)$$

Of course, the uncertainty of diameter measurement is twice time larger than uncertainty of radius measurement.

The evaluation of the uncertainty according to the presented methodology was performed for the CMM MicroXcel PFx 765 with MPE(E) = 3 + L/250 μm . Moreover, experimental evaluation of the uncertainty according to procedure of ISO 15530-3 [17] was carried out. The results are presented on Fig. 2.

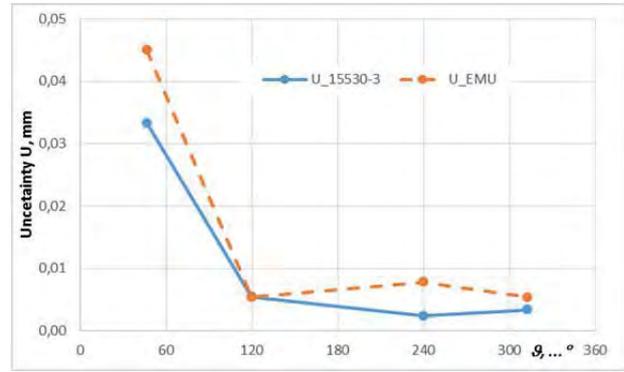


Fig. 2. Comparison of the results of measurement uncertainty evaluation

6. Flatness measurement model

The flatness value can be calculated as distance of point $S(x_S, y_S, z_S)$ laying in the middle of measured surface from the plane defined with 3 points $A(x_A, y_A, z_A)$, $B(x_B, y_B, z_B)$ and $C(x_C, y_C, z_C)$ laying on the periphery of that surface (Fig. 3).

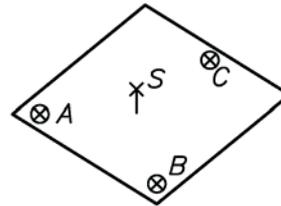


Fig. 3. Measurement model of flatness expressed as distance l of point S from plane ABC

The distance l of the point S from the plane ABC will be calculated as

$$l = |v \cdot r| \quad (18)$$

where v – unit normal vector of the plane ABC , r – vector connecting any point of the plane and the point S .

The unit normal vector v of the plane ABC is

$$v = \frac{(x_{BA}, y_{BA}, z_{BA}) \times (x_{CA}, y_{CA}, z_{CA})}{|(x_{BA}, y_{BA}, z_{BA}) \times (x_{CA}, y_{CA}, z_{CA})|} \quad (19)$$

The numerator d of the above formula can be calcu-

lated as

$$d = \begin{vmatrix} i & j & k \\ x_{BA} & y_{BA} & z_{BA} \\ x_{CA} & y_{CA} & z_{CA} \end{vmatrix} = ai + bj + ck \quad (20)$$

and the denominator m as:

$$m = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2} \quad (21)$$

where

$$\begin{aligned} a &= y_{BA}z_{CA} - z_{BA}y_{CA} \\ b &= x_{CA}z_{BA} - x_{BA}z_{CA} \\ c &= x_{BA}y_{CA} - x_{CA}y_{BA} \end{aligned} \quad (22)$$

The investigated distance l is calculated with the following formula (variants depend on the choice of the points of the plane used to define the vector r)

$$l = \begin{cases} |v \cdot (x_{SA}, y_{SA}, z_{SA})| \\ |v \cdot (x_{SB}, y_{SB}, z_{SB})| \\ |v \cdot (x_{SC}, y_{SC}, z_{SC})| \end{cases} \quad (23)$$

therefore

$$l_1 = \left| \frac{ax_{SA} + by_{SA} + cz_{SA}}{m} \right| \quad (24)$$

$$l_2 = \left| \frac{ax_{SB} + by_{SB} + cz_{SB}}{m} \right| \quad (25)$$

$$l_3 = \left| \frac{ax_{SC} + by_{SC} + cz_{SC}}{m} \right| \quad (26)$$

For the measurement uncertainty analysis one has to assume that the distance l is a function of nine differences of coordinates (three variants)

$$l = \begin{cases} l(x_{SA}, y_{BA}, z_{CA}, z_{BA}, y_{CA}, y_{SA}, x_{CA}, x_{BA}, z_{SA}) \\ l(x_{SB}, y_{BA}, z_{CA}, z_{BA}, y_{CA}, y_{SB}, x_{CA}, x_{BA}, z_{SB}) \\ l(x_{SC}, y_{BA}, z_{CA}, z_{BA}, y_{CA}, y_{SC}, x_{CA}, x_{BA}, z_{SC}) \end{cases} \quad (27)$$

The standard uncertainty will be calculated as minimum of three estimations

$$u_l = \min\{u_{l1}, u_{l2}, u_{l3}\} \quad (28)$$

For the case of no correlation between the input measurands the formula for standard uncertainty of the flatness measurement is

$$\begin{aligned} u_l = & \sqrt{\left(\frac{\partial l}{\partial x_{SA}} \cdot u_{xSA}\right)^2 + \left(\frac{\partial l}{\partial y_{BA}} \cdot u_{yBA}\right)^2 + \left(\frac{\partial l}{\partial z_{CA}} \cdot u_{zCA}\right)^2 +} \\ & \sqrt{\left(\frac{\partial l}{\partial z_{BA}} \cdot u_{zBA}\right)^2 + \left(\frac{\partial l}{\partial y_{CA}} \cdot u_{yCA}\right)^2 + \left(\frac{\partial l}{\partial y_{SA}} \cdot u_{ySA}\right)^2 +} \\ & \sqrt{\left(\frac{\partial l}{\partial x_{CA}} \cdot u_{xCA}\right)^2 + \left(\frac{\partial l}{\partial x_{BA}} \cdot u_{xBA}\right)^2 + \left(\frac{\partial l}{\partial z_{SA}} \cdot u_{zSA}\right)^2} \end{aligned} \quad (29)$$

Due to the complexity of the function the sensitivity coefficients (partial derivatives) will be evaluated numerically.

Conclusion

Threating the coordinate measurement as indirect measurement enables analytical approach of uncertainty evaluation. The uncertainty evaluation of particular characteristics (dimension, geometrical deviation) is possible after defining individual measurement task model. The presented methodology was the basis for the software developed by the authors EMU-CMMUncertaintyTM which enables uncertainty evaluation of a few dozens of characteristics [22-26].

Literature

- [1] JCGM 106: 2012 Evaluation of measurement data. The role of measurement uncertainty in conformity assessment.
- [2] ISO 14253-1:2013 Geometrical product specifications (GPS). Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment. Part 1: Decision rules for proving conformity or nonconformity with specifications.
- [3] JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections) Evaluation of measurement data. Guide to the expression of uncertainty in measurement.
- [4] JCGM 101:2008 Evaluation of measurement data. Supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement". Propagation of distributions using a Monte Carlo method.
- [5] JCGM 104:2009 Evaluation of measurement data. An introduction to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" and related documents.
- [6] ISO 14253-2:2011 Geometrical product specifications (GPS). Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment. Part 2: Guidance for the estimation of uncertainty in GPS measurement, in calibration of measuring equipment and in product verification.
- [7] F. Aggogeri, G. Barbato, E.M. Barini, G. Genta, R. Levi, Measurement uncertainty assessment of coordinate measuring machines by simulation and planned experimentation. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 4 (2011), 51-56.
- [8] R.V. Arencibia, C.C. Souza, H.L. Costa, A. Piratelli-Filho, Simplified model to estimate uncertainty in CMM. J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng. 37 (2015), 411-421.
- [9] F.A. Arenhart, G.D. Donatelli, M.C. Porath: An experimental method for assessing the contribution of the production process variations to the task-specific uncertainty of coordinate measurements. Measurement 45 (2012), 507-516
- [10] J. Beaman, E. Morse, Experimental evaluation of software estimates of task specific measurement uncertainty for CMMs. Precision Engineering, 34 (2010) 1, 28-33.

- [11] J. Bernstein, A. Weckenmann, Measurement uncertainty evaluation of optical multi-sensor-measurements. *Measurement* 45 (2012) 10, 2309-2320.
- [12] M. Hernla, Unsicherheiten einfach abschätzen. *QZ Qualität und Zuverlässigkeit*, München, 45 (2000) 4, 458-464
- [13] M. Abbe, M. Nara, K. Takamasu, Uncertainty evaluation of CMM by modeling with spatial constraint. 9th ISMQC, Madras (2007) 121-125.
- [14] A. Piratelli-Filho, B. Di Giacomo, CMM uncertainty analysis with factorial design. *Precision Engineering* 27 (2003), 283-288
- [15] P. Ramu, J.A. Yagüe, R.J. Hocken, J. Miller, Development of a parametric model and virtual machine to estimate task specific measurement uncertainty for a five-axis multi-sensor coordinate measuring machine. *Precision Engineering* 35 (2011), 431-439.
- [16] J. Ślodek, A. Gaška, Evaluation of coordinate measurement uncertainty with use of virtual machine model based on Monte Carlo method. *Measurement* 45 (2012), 1564-1575
- [17] ISO 15530-3:2011 Geometrical product specifications (GPS). Coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement. Part 3: Use of calibrated workpieces or measurement standards.
- [18] ISO/TS 15530-4:2008 Geometrical product specifications (GPS). Coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement Part 4: Evaluating task-specific measurement uncertainty using simulation.
- [19] G. Henzold, *Geometrical Dimensioning and Tolerancing for Design, Manufacturing and Inspection: A Handbook for Geometrical Product Specification Using ISO and ASME Standards*. Butterworth-Heinemann (2006).
- [20] Z. Humienny, P. Turek, Animated visualization of the maximum material requirement. *Measurement*, 45 (2012) 10, 2283-2287.
- [21] ISO 1101:2012 Geometrical product specifications (GPS). Geometrical tolerancing. Tolerances of form, orientation, location and run-out
- [22] W. Jakubiec, Analytical estimation of uncertainty of coordinate measurements of geometric deviations. Models based on distance between point and straight line *Advances in manufacturing science and technology*, 33 (2009) 2, 31-38.
- [23] W. Jakubiec, Estimation of uncertainty of coordinate measurements according to the Type B method. *Key Engineering Materials*, 437 (2010), 253-257.
- [24] W. Jakubiec, W. Płowucha, Analytical estimation of uncertainty of coordinate measurements of geometric deviations. Models based on distance between point and plane. *Advances in Manufacturing Science and Technology*, 37 (2013) 3, 5-16.
- [25] W. Jakubiec, W. Płowucha, First coordinate measurements uncertainty evaluation software fully consistent with the GPS philosophy. *Procedia CIRP*, 10 (2013), 317-322.
- [26] W. Jakubiec, W. Płowucha, M. Starczak, Analytical estimation of coordinate measurement uncertainty. *Measurement*, 45 (2012), 2299-2308.

BEWERTUNG DER GEWINDEQUALITÄT BEIM AUTOMATISIERTEN LEHREN

Stefanie Stöckel, Carsten Keller

Fraunhofer IWU, Reichenhainer Str. 88, D-09126 Chemnitz

Gewinde sind ein klassisches Mittel im Maschinenbau, um Bauteile lösbar miteinander zu verbinden. Die Montage von Schraubverbindungen erfolgt zunehmend automatisiert. Damit die Schraubverbindung prozesssicher hergestellt werden kann, müssen die Gewinde beider Fügepartner die vorgegebenen Toleranzen einhalten. Deshalb ist ein Prüfen der Gewinde in einem vor der Montage sinnvoll und oft unerlässlich. Eine Prüfung mit einem Gewindengrenzlehndorn von Hand ist sehr aufwändig und stellt für den Prüfer eine unergonomische Aufgabe dar. Die zunehmende Automatisierung der Gewindeprüfung ist die Konsequenz. In einem ersten Teil eines Forschungsprojektes des Fraunhofer Institutes für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik in Chemnitz wurde das Positionieren und Anfädeln des Lehndorns mittels kraftsensitiven Roboters am Gewinde entwickelt. [1] Im zweiten Teil dieses Projektes wurden Untersuchungen des Prüfvorganges durchgeführt. Dabei ist das vorrangige Ziel, einen Zusammenhang zwischen dem Gewindezustand (Gewindefehler und Störgrößen) und dem beim Lehren gemessenen Drehmomentverlauf herzustellen. [2]

1. Ausgangslage

Das weltweit erste vollautomatische mechanische Gewindeprüfsystem ‚Transicord‘ wurde 1966 von der Firma Kordt auf den Markt gebracht [3]. Damit können Gewindegrößen von M3 bis M30 geprüft werden und die Auswertung des gemessenen Drehmomentes erfolgt anhand von Grenzwerten. Das Modul mit festem Prüfkopf kann in Fertigungsstraßen eingebaut werden. 2012 wurde in einer Kooperation von Kordt mit isel das Gewindeprüfsystem mit einer CNC-Maschine kombiniert, welche die Prüfeinheit zur Bohrung hin bewegt [4]. Auch robotergeführte Systeme sind bekannt [5] Die Prüfung erfolgt mittels Gutlehndorn und anhand vorgegebener Grenzdrehmomente werden die Gewinde als Gut (mit Angabe der Gewindetiefe), Ausschuss oder Nacharbeit bewertet. Über eine kontinuierliche Drehmomentüberwachung kann auf den Werkzeugverschleiß geschlossen werden.

Ähnliche Systeme wie von Kordt mit feststehendem Prüfkopf werden auch von HTG und H+K angeboten. Ein weiteres System auf dem Markt wird von ARTIS verkauft. Das Überwachungssystem kann mit einer Werkzeugmaschine oder einem Roboter, wie 2009 mit Dreher realisiert, kombiniert werden. Die Auswertung des Drehmomentes erfolgt mittels Sollkurven und daraus abgeleiteter Größen, insbesondere Hüllkurven [6].

Beim automatisierten Lehren wird für die Bewertung der Gewindequalität das Drehmoment während dem Einschrauben gemessen. [7] Auf dem Markt angebotene Systeme nutzen die Bewertung über ein Grenzdrehmoment oder Hüllkurven, bei denen keine Aussage über die Ursache für ein Ausschussgewinde möglich ist. Hier setzt das Forschungsprojekt an und untersucht experimentell den Zusammenhang zwischen verschiedenen Gewindefehlern, Störgrößen und dem Drehmoment.

Bild 1 gibt eine Übersicht über Fehlerquellen am Gewinde bei der spanenden Herstellung. Die geometrischen Größen, die ein Gewinde beschreiben sind in Bild 2 dargestellt. Zu ihnen gehören der Kerndurchmesser D_1 , Flankendurchmesser D_2 , Außendurchmesser D , Steigung P und Flankenwin-

kel α . Die drei Größen Flankendurchmesser, Steigung und Flankenwinkel beeinflussen sich gegenseitig.

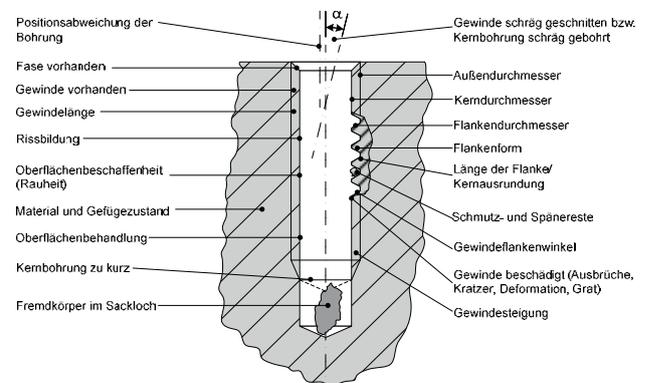


Bild 1 Mögliche Fehler am Gewinde (nach [8])

Beim Lehren werden die geometrischen Größen des Gewindes gleichzeitig in ihrer Wirkung erfasst. Das heißt, einzelne Größen können nicht bestimmt werden. „Ein Gewinde-Gutlehndorn prüft das Paarungsmaß des Innengewindes (Lehrung des Paarungsmaßes des Innengewindes).“ [9]

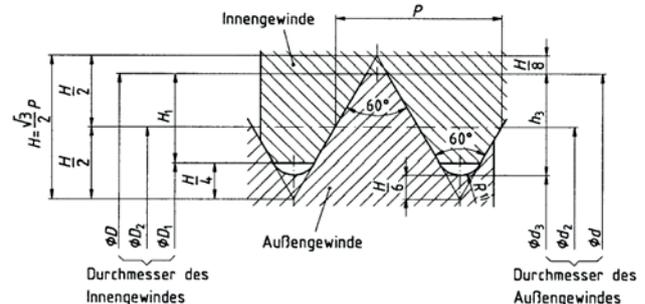


Bild 2 Größen am Gewinde [10]

2. Auswahl der Faktoren und Faktorstufen

Aus der Vielzahl der Gewindefehler wird sich auf die wesentlichen Faktoren konzentriert. Die Kriterien für die Auswahl der Faktoren orientieren sich an dem Vorgehen bei der statistischen Versuchsplanung. Wichtig sind dabei die Messbarkeit, die Möglichkeit der Einstellbarkeit auf Niveaus, Unabhängigkeit von anderen Einflussgrößen und der vermutete Einfluss

auf das Moment. Jede Stufe wird dreimal wiederholt gefertigt.

Die erste zu untersuchende Größe ist der Flankendurchmesser. Dieser ist das wichtigste Prüfmaß beim Lehren. Als im Maschinenbau häufig eingesetzte Gewindegrößen werden M3, M6 und M10 betrachtet. Der Flankendurchmesser wird innerhalb der Gewindegröße M10 untersucht, da hier die Toleranzen am größten sind und das erwartete Moment ebenfalls. Die Toleranz des Flankendurchmessers beträgt bei M10 180 µm. Das heißt, das Maß kann zwischen 9,026 und 9,206 mm liegen. Der Ausgangspunkt, die Stufe Null, befindet sich an der Grenze zwischen Gut und Ausschuss mit einem Flankendurchmesser von 9,206 mm. Die Stufengröße ergibt sich aus der halben Toleranz des Flankendurchmessers (90 µm), die auf zwei Stufen aufgeteilt wird (45 µm). Von der Nullstufe ausgehend ergeben sich zwei kleinere Durchmesserstufen (-0,04 mm/-0,08 mm) und zwei größere (+0,04 mm/+0,08 mm). Da eine Vergrößerung der Durchmesser unbegrenzt erfolgen kann, ist eine Stufe mit Übermaß (+0,12 mm) vorgesehen.

Bei der Wahl der Steigung als Faktor ist zu beachten, dass sich Steigung und Flankendurchmesser gegenseitig bezüglich des resultierenden Lehrmomentes beeinflussen. Fehler dieser beiden Größen können dadurch verschleiert werden. Ein Steigungsfehler am Gewindebolzen kann zum Beispiel durch einen verkleinerten Flankendurchmesser in der Gewindebohrung ausgeglichen werden, sodass die Zusammenschraubbarkeit immer noch gewährleistet ist. In ersten Versuchen wird die Steigung ausgehend von der Stufe Null, mit einer Sollsteigung von 1,5 mm, in beide Richtungen um 0,01 mm und 0,02 mm verändert. In einem zweiten Versuchsdurchlauf wird der Flankendurchmesser der Gewinde in zwei Stufen (+0,05 mm und +0,1 mm) vergrößert und mit den fünf Stufen der Steigung kombiniert um die Wechselwirkung zu untersuchen.

Eine weitere Einflussgröße ist die Materialpaarung, die sich direkt auf den Reibkoeffizient auswirkt und einen Einfluss auf das Drehmoment erwarten lässt. Die zu untersuchenden Materialien sind Stahl und Aluminium.

Die unterschiedlichen Zustände von Gewinden, zum Beispiel mit Spänen, mit Deformationen oder der Einfluss von Betriebsstoffen, sind von praktischer Bedeutung. Die Späne werden gehäuft und einzeln in die Gewinde eingebracht. Ebenso werden gezielte Deformationen der Gewindegänge vorgesehen. Als übliche Betriebsstoffe kommen Öl, Reiniger und Kühlschmierstoff zur Anwendung.

Eine weitere experimentelle Untersuchung gilt der Prüfgeschwindigkeit. Theoretisch ist die Reibung nahezu unabhängig von der Geschwindigkeit. Das lässt die Vermutung zu, dass der Einfluss gering ist. Die Geschwindigkeiten 10 min⁻¹, 20 min⁻¹, 30 min⁻¹, 40 min⁻¹ und 50 min⁻¹ werden hier untersucht.

Zusammengefasst werden folgende Faktoren experimentell analysiert: Flankendurchmesser im Gewin-

de, Gewindegröße, Steigung, Material, Oberflächen- bzw. Gewindezustand (Späne, Deformation und Betriebsstoffe) und Prüfgeschwindigkeit.

3. Versuchsaufbau und -durchführung

Grundlage der Versuche bildet die Herstellung der Gewinde mit den geforderten Fehlern. Da die Gewindegrößen, insbesondere die Form, vom Werkzeug abhängig sind, ergeben sich daraus die Herstellungsmöglichkeiten.

Der Einzahngewindefräser (siehe Bild 3) bringt in die auf Maß gefertigte Kernbohrung die Gewindegänge ein, wie links in Bild 5 dargestellt. Über die radiale Zustellung kann der Flankendurchmesser beeinflusst werden und über die Zustellung in z-Richtung die Steigung.



Bild 3 Einzahngewindefräser [11]

Im Gegensatz dazu stellt der Mehrzahngewindefräser (siehe Bild 4) das vollständige Gewindeprofil her und bearbeitet auch die Kernbohrung, wie rechts in Bild 5 zu sehen. Die Steigung ist fest vorgegeben. Dieser Fräser bietet den Vorteil, dass anhand des Kerndurchmessers, der sich mit einer Dreipunktinnenmesserschraube in der Fertigung messen lässt, auf die anderen Durchmesser geschlossen werden kann. Deshalb wird vorzugsweise der Mehrzahngewindefräser verwendet und nur für die Manipulation der Steigung auf den Einzahngewindefräser zurückgegriffen.



Bild 4 Mehrzahngewindefräser [11]

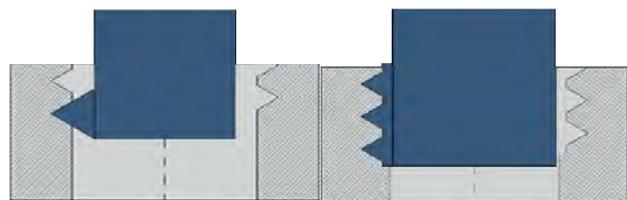


Bild 5 Vergleich der Fräser

Bei allen Prüfungsgewinden wird der Kerndurchmesser mit einem Dreipunktinnenmessgerät sowie der Flankendurchmesser mit dem Messgerät Corditest von Kordt gemessen.

Kernstück des Versuchsaufbaus (siehe Bild 6) ist der Prüfkopf. In diesem befindet sich der Drehmomentsensor, der Motor für den Drehantrieb und die Mechanik für die Zustellung des Lehrdorns. Das Prüfen erfolgt automatisch nach einem mit LabVIEW programmierten Ablauf. Die Eindringtiefe ist bei einer konstanten Geschwindigkeit durch die Zeit begrenzt. Jedes Gewinde wird dreimal wiederholt geprüft.

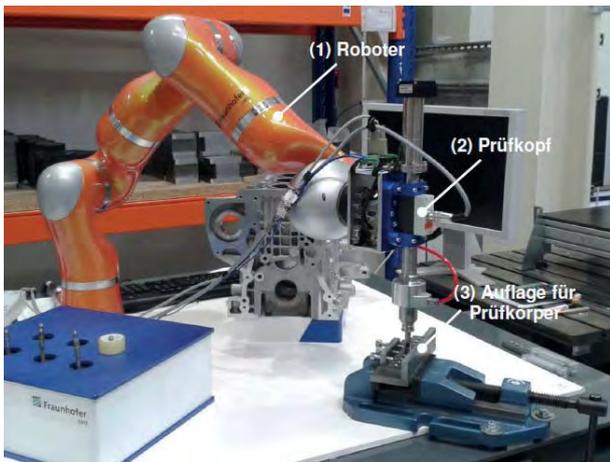


Bild 6 Versuchsaufbau

Ein Beispiel für einen Drehmomentverlauf ist in Bild 7 dargestellt. Die einzelnen Umdrehungen sind erkennbar und stimmen mit der Anzahl der Gewindegänge überein.

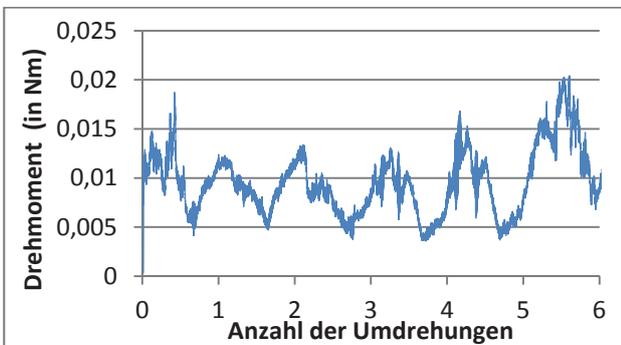


Bild 7 Beispiel für einen Drehmomentverlauf

4. Auswertung

Um die gemessenen Drehmomentkurven einem Vergleich unterziehen zu können, ist es notwendig die Kurven zu vereinfachen und geeignete Größen abzuleiten. Die Auswertung dazu erfolgt in LabVIEW.

Dazu werden die Drehmomentkurven in einem ersten Schritt gefiltert (siehe Bild 8). Es kommt ein Tiefpassfilter zum Einsatz, welcher die hohen Frequenzen entfernt.

Für die Auswertung und Bewertung der Kurven werden die einzelnen Perioden, das heißt jeweils eine Umdrehung betrachtet. Für jede aufgezeichnete Kurve werden die Periodenmittelwerte (PMW) berechnet (siehe Bild 9).

Drehmoment - Zeit - Diagramm gefiltert

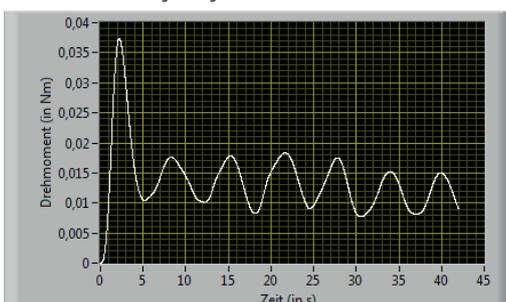


Bild 8 Drehmomentkurve nach dem Filtern

Drehmoment - Zeit - Diagramm gefiltert

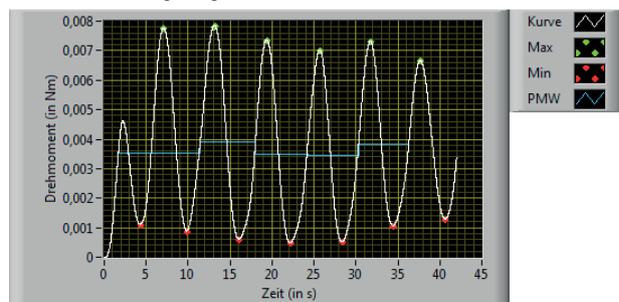


Bild 9 Periodenmittelwerte einer Drehmomentkurve

Aus den PMW der neun Wiederholungen je Stufe werden der Mittelwert und die dazugehörige Standardabweichung für jede Periode bestimmt (siehe Bild 10). Um Unterschiede zwischen den Stufen von zufälligen Abweichungen zu unterscheiden, erfolgt ein statistischer Test (t-Test) auf Gleichheit der Mittelwerte. Der Test lässt nur einen paarweisen Vergleich zu. Deshalb werden immer benachbarte Stufen getrennt nach den einzelnen Perioden betrachtet.

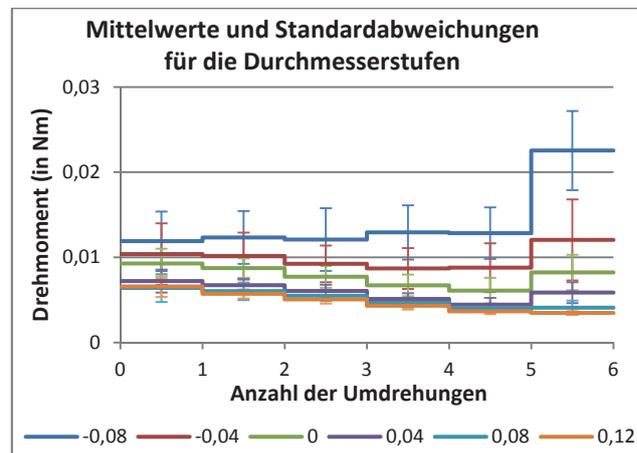


Bild 10 Flankendurchmesserstufen in Stahl

5. Ergebnisse

Bei der Auswertung der Versuche zeigt sich, dass nicht zwischen Aluminium und Stahl unterschieden werden muss. Außerdem kann die Prüfgeschwindigkeit ohne signifikante Auswirkung verändert werden. Einzelne lose Späne beeinflussen das Drehmoment vernachlässigbar wenig, lediglich Deformationen und fester sitzende Späne führen zu einzelnen Drehmomentspitzen.

Der Flankendurchmesser wurde besonders ausführlich untersucht. Je größer dieser innerhalb einer Gewindegröße ist, umso kleiner werden das Moment und die Standardabweichung. Der Zusammenhang von Flankendurchmesser und Drehmoment ist dabei nichtlinear. Mit einem Versuchsumfang von achtzehn Messungen wurden Durchmesser im Abstand von 0,04 mm bei M10 unterschieden. Die genaue Zuordnung einer einzelnen Kurve ist jedoch schwierig. Dabei bedeutet ein Bereich von 0,04 mm bereits ein Viertel der Toleranz des Flankendurchmessers.

Der Vergleich zwischen den Gewindegrößen M10,

M6 und M3 zeigt, dass bei kleiner werdendem Gewinde das Lehrmoment sinkt. Es verhält sich somit ähnlich wie bei der Durchmesseränderung innerhalb eines Gewindes. Ob der Zusammenhang dabei linear ist oder nicht kann aufgrund der wenigen Stufen nicht erkannt werden.

Bei einem Steigungsfehler steigt das Drehmoment über der zunehmenden Eindringtiefe an. In welcher Art und Weise ist dabei neben der Größe des Steigungsfehlers auch vom Durchmesser abhängig. Je größer der Flankendurchmesser umso mehr wird ein Steigungsfehler ausgeglichen beziehungsweise verschleiert. Durch die Wechselwirkung zwischen Steigung und Flankendurchmesser ist unklar, ob eine Trennung der Fehler möglich ist. Um eine Aussage zu treffen sind mehr Versuche nötig.

Einen Einfluss auf das Drehmoment hat auch der Einsatz von unterschiedlichen Betriebsstoffen wie Öl und Reiniger. Ein einheitlicher Zustand der Gewinde ist von Vorteil.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel die Zusammenhänge der ausgewählten Faktoren mit dem Drehmoment zu ermitteln, wurde erreicht. Die Unterscheidung zwischen Gut- und Ausschussgewinde ist. Aus den ermittelten Charakteristiken verschiedener Fehler im Drehmoment kann auch die Art der Fehler bestimmt werden, wenn diese einzeln auftreten. Es ist schwierig, die genaue Größe des Fehlers festzustellen, beziehungsweise ist nur in großen Bereichen eine Zuordnung möglich.

Ein weiterer Faktor, der noch einer Untersuchung bedarf, ist vor allem die Lage der Gewinde, sodass die Prüfung von Gewinden an fünf Werkstückseiten möglich ist. Auch der Einfluss des Fertigungsverfahrens, wie Bohren und Formen, der Rauheit oder ein schräges Gewinde können praxisrelevant sein. Für ein gezieltes, praxisorientiertes Untersuchen der Faktoren ist die Kenntnis über das tatsächliche Vorkommen, das heißt die Art und Häufigkeit von Gewindefehlern, sinnvoll. Mit einem solchen Wissen könnten die wirklich vorkommenden Fehler gezielt und vertieft betrachtet werden.

Bei der Bewertung der Gewinde stellt vor allem ein zu geringes Drehmoment ein Problem dar. Bei einem zu niedrigen Drehmoment ist durch die Messunsicherheit und überlagernde Störgrößen keine Aussage mehr möglich, ob überhaupt ein Gewinde vorhanden ist. Lösungen können noch weitere Messgrößen sein, die das Drehmoment ergänzen. Ein weiterer Ansatz ist es, die Oberfläche der Gewinde mit einem speziellem Reiniger oder ähnlichem für ein höheres Drehmoment zu präparieren.

Im Einsatz kann es von Vorteil sein, das Drehmoment beim Ein- und Ausdrehen aufzuzeichnen, da ohne Erhöhen der Prüfzeit zwei Prüfungen eines Gewindes vorliegen. Somit kann die Auswertung und Bewertung der Gewinde, je nach Aussagekraft der Kurve beim Ausdrehen, durch die Wiederholung zuverlässiger werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Keller, Carsten; Scheiffert, Nico „Vollautomatisierte Lehre von Innengewinden“ QZ, 2014, Ausgabe 59 S.38-40
- [2] Keller, Carsten „Automatisierte Gewindelehre“ Poster auf dem 7. Chemnitzer Karosseriebaukolloquium CBC 2014
- [3] Kordt GmbH & Co. KG: „Kordt - Messtechnik für die Fertigung“, Broschüre.
- [4] Kordt GmbH & Co. KG: „Automatische 100-Prozent-Prüfung von Gewinden“, QZ-online 25.April 2012.
- [5] Keferstein, Claus P: „Automatisch geprüft und für Gut befunden. Tiefen- und Drehmomentsensoren zur Kontrolle von Innengewinden“, Messen, Prüfen, Automatisieren; 1993, Bd. 29, Heft 10 S.5-9.
- [6] Lange, Dirk; Mohr, Ulrich: „Vorrichtung und Verfahren zur wegmessenden Gewindeprüfung“, Patent DE102010038830A1, 2012
- [7] Kampa, Hartmut; Kring, Josef; Edel; Stefan: „Flexibles rechnergestütztes Meßgerät zum Prüfen von Innengewinden“ Technisches Messen, 1985, Heft 12 S. 465-470.
- [8] Fischer, Gernot E.; Wößner, Johannes F: „Bohren und Prüfen von Innengewinden. Industrieroboter mit Sonderwerkzeug.“ Technische Rundschau, 1993, Bd. 85, Heft 25/26
- [9] Norm DIN ISO 1502: „Lehren und Lehre“, 1996
- [10] Norm DIN 13 Teil 1: „Nennmaße für Regelgewinde“, 1999
- [11] Hoffmann Group: „Hauptkatalog“, 2015/2016



Europäische Union

Europa fördert Sachsen.



BEWERTUNG DER COMPUTERTOMOGRAPHIE ALS INTEGRALER BESTANDTEIL DER PRÜFMITTELPLANUNG

Sebastian Wagner

Continental Automotive GmbH, Ostring 7, D-09212 Limbach Oberfrohna

Die Computertomographie ist ein bildgebendes Verfahren, welches immer häufiger im Bereich der dimensionellen Messtechnik Einzug findet. Durch die computerbasierte Auswertung einer Vielzahl von Röntgenaufnahmen, werden Volumenmodelle erzeugt, welche einer anschließenden messtechnischen Analyse dienen. Neben der Beschreibung dieser noch jungen Messmethode und Bewertung dieses Messverfahrens hinsichtlich Messfähigkeit und aufkommender Prüfkosten, soll eine Marktrecherche vorgestellt werden.

1. Vorstellung des Continental Diesel-Injektor

Der Continental Standort Limbach-Oberfrohna trägt mit der Herstellung von modernen Dieselinjektoren der Piezo-Common-Rail (PCR) Technologie einen großen Teil zum technologischen Fortschritt im Bereich der Einspritztechnik bei. Vorgaben kommen vom Europäischen Parlament bezüglich der für 2014 festgelegten Euro6-Abgasnorm. Die immer schärferen Abgasgesetzgebungen beinhalten ebenfalls neue Anforderungen hinsichtlich Einspritzstrategien, Mengenstabilität über die Lebenszeit, verringertem Kraftstoffrückfluss (Leckage) und immer höheren Einspritzdrücken. Diese gilt es konstruktiv und auch fertigungstechnisch zu realisieren. Um die konstruktiven Änderungen umsetzen zu können, bedarf es neben der hochpräzisen Fertigung auch einer funktionierenden Qualitätsüberwachung und einer strukturierten Prüfmittelplanung.



Abbildung 1: Schnittbild PCR Injektor

2. Prüfmittelplanung

Die Prüfmittelplanung ist ein Teilgebiet der Qualitätsplanung. Basierend auf der technischen Zeichnung werden unter Berücksichtigung von Normen, internen Verfahrensweisungen und dem vorhandenen Messequipment die zu verwendenden Messmittel festgelegt. Um die Eignung von Prüfmitteln nachzuweisen, müssen Messsystemanalysen (MSA) nach ISO/TS 16949 bzw. EN ISO 9001 durchgeführt werden. Kriterien sind u.a. die Auflösung des Prüfmittels, die Wiederholgenauigkeit und -präzision, die Vergleichspräzision, Linearität und Stabilität. Ein weiterer wichtiger Punkt ist es, die entstehenden Prüfkosten abschätzen zu können. Aus diesem Grund ist eine Wirtschaftlichkeitsanalyse zwingend erforderlich, wobei verschiedene Bestandteile wie Messzeiten, Lohn-, Anschaffungs-, Instandhaltungs-

kosten und Kosten für eine notwendige zerstörende Prüfung in Betracht gezogen werden. Schlussendlich wird das Messmittel ausgewählt, welches unter minimalen Prüfkosten messfähig ist.

3. Problematik der bisherigen Messtechnik

Bei der Qualifizierung der festgelegten Messtechnik können diverse Probleme dazu führen, dass die Wahl des Prüfmittels neu durchdacht werden muss. Die Hauptprobleme sind folgende:

- Neue Merkmale, bei welchen es noch keine Messmethode gibt (z.B. innenliegende Merkmale)
- MSA zeigt Nichtfähigkeit des Prüfmittels
- Prüfkosten sind z.B. durch Notwendigkeit einer zerstörenden Prüfung zu hoch

Tabelle 1: Problematik der bestehenden Messtechnik

	Messmethode vorhanden	Messfähigkeit gegeben	Ausschluss der Teile	Bemerkungen
Düsenkörper	Handmessvorrichtungen	Messfähigkeit nach MSA-Richtlinie ist z.T. nachgewiesen	ja (anfallende Kosten je Teil vorhanden) Bestandteil der Prüfkosten	
Injektorkörper	3D-Koordinatenmessgerät	Messfähigkeit des Messprogrammes ist nach MSA-Richtlinie nachgewiesen	ja (anfallende Kosten je Teil vorhanden) Bestandteil der Prüfkosten	
Piezoantrieb BG	Nein (nur Teilmessung möglich)	-	-	
Injektor BG	Nein	-	-	

Anknüpfend daran ist in Tabelle 1 anhand von vier Beispielen erläutert, welche Probleme zum Zeitpunkt der Analyse bestanden. Beim Düsenkörper z.B. werden die Teile bei der taktilen Messung beschädigt, wodurch die Prüfkosten steigen. Um eine fähige taktile Messung am tieflochgebohrten Injektorkörper zu realisieren, muss das zu messende Teil geschnitten und demzufolge zerstört werden. Bei den beiden Baugruppen Piezoantrieb BG und Injektor BG gab es zum Zeitpunkt der Analyse gar keine

Messmethode, da sich die Merkmale jeweils im inneren der Teile verbergen.

Im Folgenden besteht das Ziel, die Computertomographie als noch junge Messtechnik zu Beschreiben und hinsichtlich der aufgezeigten Probleme eine Lösungsmöglichkeit vorzustellen.

4. Allg. Funktionsweise Computertomographie

Genutzt wird bei der CT die Fähigkeit der Röntgenstrahlung, Bauteile zu durchdringen, wobei von der Röntgenröhre eine nahezu punktförmige Strahlungsquelle ausgeht. Es ist ein radiografisches Untersuchungsverfahren, bei dem dreidimensionale Volumenbilder aus einer Vielzahl von radiografischen 2D-Projektionen entstehen. Dabei durchdringt die Röntgenstrahlung das zu messende Objekt und erreicht den dahinter liegenden Sensor, auch Detektor genannt. Ein Teil der Röntgenstrahlung wird auf dem Weg durch das Objekt absorbiert, d.h. je länger der Durchstrahlungsbereich x im Objekt, desto weniger Strahlung erreicht den Detektor. Ein weiterer wichtiger Parameter ist der Schwächungskoeffizient des Materials μ . Das Lambert-Beersche Gesetz beschreibt dieses Absorptionsverhalten von Strahlung, auch Schwächung genannt, anhand der Formel $I = I_0 * e^{-\mu x}$. Die Funktion des CT ist vergleichbar mit der Erzeugung eines Schattenbildes eines teilweise transparenten Objektes, welches von einer Lichtquelle beleuchtet wird. Die Helligkeitswerte des Bildes entsprechen der Transparenz des beleuchteten Objektes und sind somit abhängig von dessen optischer Dichte. Auf dem Detektor entsteht ein zweidimensionales Durchstrahlungsbild des Objektes, welches analog eines Bildsensors einer Digitalkamera erfasst, und für eine weitere Auswertung in digitaler Form bereitgestellt wird.

Damit ein dreidimensionales Tomographiebild entstehen kann, werden Durchstrahlungsbilder in vielen Drehlagen bzw. Winkelpositionen des Messobjekts aufgenommen, siehe Abbildung 2.

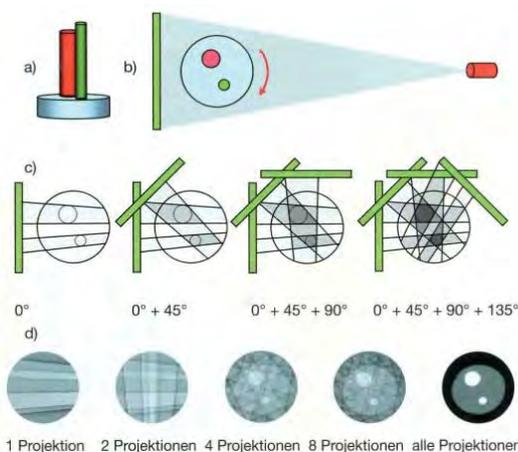


Abbildung 2: Rückprojektion der Durchstrahlungsbilder

Mithilfe mathematischer Verfahren wird anschließend aus den Einzelprojektionen ein Volumenmodell, das sogenannte Voxelbild, berechnet, welches die Materialverteilung und Geometrie des Werkstücks vollständig beschreibt. Der Begriff Voxel setzt sich aus den englischen Wörtern volume und pixel zusammen, und bezeichnet einen dreidimensionalen Bildpunkt. Jedem Voxel ist ein bestimmter Grauwert zugeordnet. Dem Grauwert ist ein numerischer Wert und stellt den mittleren linearen Schwächungskoeffizienten an dieser Stelle im Bauteil dar (Voxelamplitude).

Ist die Bildrekonstruktion abgeschlossen, muss aus den Voxeldaten die Oberfläche des Bauteiles berechnet werden. Dies ist ein entscheidender Punkt für die Messgenauigkeit. Da das Voxelbild, lediglich aus Graustufen besteht, muss ein Schwellwert festgelegt werden, ab wann ein Grauwert Material ist und wann Umgebung (z.B. Luft).

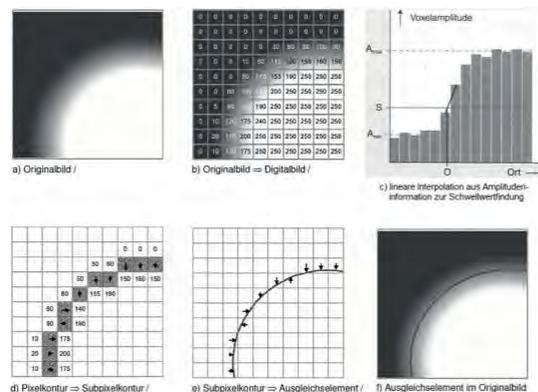


Abbildung 3: Oberflächenfindung aus Voxeldaten

Dazu werden die Grauwerte in digitale Amplituden umgewandelt (8-16 Bit normierte Graustufen) und mit Hilfe mathematischer Algorithmen ein Schwellwert (S) berechnet, welcher die Oberfläche (O) des Bauteils darstellt. Für eine genaue Oberflächengenerierung wird dazu für jeden Punkt der Pixelkontur ein Subpixelpunkt durch Interpolation der benachbarten Pixel errechnet, auch „Subvoxelling“ genannt. Veranschaulicht ist dies in Abbildung 3. Anschließend können alle Punkte zu einer triangulierten Oberfläche vernetzt werden (STL-Format).

Die digitalen Daten können hinterher von einer Software messtechnisch ausgewertet werden. Gegenüber herkömmlichen Verfahren in der Messtechnik treten bei der CT verschiedene Vorteile zum Vorschein, so z.B. eine kontaktlose und zerstörungsfreie Erfassung der Oberfläche sowie die Möglichkeit der Messung innenliegender Merkmale. Jedoch muss gewährleistet sein, dass die Röntgenstrahlung so groß ist, dass die Probe bei allen Projektionen durchstrahlt wird, d.h. die Intensität von Röntgenquelle bis zum Detektor darf nicht Null werden. Um bspw. Stahl zu durchdringen, werden je nach Materialstärke mindestens 160kV benötigt. Ein Nachteil liegt in den sogenannten Artefakten, welche bei der CT-Bildgebung auftreten können und das wahre Bild verzerren. Artefakte sind künstliche Details, welche

auf dem Projektionsbild sichtbar werden, jedoch physikalisch nicht existieren und somit das Messergebnis verfälschen können. Diese müssen bei der Bildrekonstruktion mittels diverser Korrekturverfahren beseitigt werden.

5. Einsatz der Computertomographie

Nach einer ersten Recherche ist festzustellen, dass sich die meisten Hersteller von CT-Geräten (Technische Industrie) hauptsächlich mit der Defektanalyse beschäftigen bzw. keine Geräte besitzen, welche größere Wandstärken von dichteren Materialien wie Stahl durchstrahlen können. Im Bereich der dimensionellen Messtechnik für Stahlbauteile sind nachfolgend genannte Hersteller in die Betrachtung aufgenommen worden: Nikon Metrology GmbH, Werth Messtechnik GmbH, GE Sensing & Inspection Technologies GmbH, Carl Zeiss IMT GmbH und die RayScan Technologies GmbH. Die Analyse der angebotenen Konfigurationen verschiedener Röntgen-CT Geräte, zeigt deutlich, dass beim Großteil der Hersteller weiterhin Forschungsbedarf besteht, um die vorgegebenen Messaufgaben zu realisieren. An dieser Stelle liegt das Ziel darin, die Entwicklung der CT hinsichtlich des Dimensionellen Messens gemeinsam zwischen Hersteller und Kunde zu betreiben. Durch eine enge Zusammenarbeit ist es möglich, ein auf die Messaufgabe speziell konfiguriertes Röntgen-CT Gerät zu entwickeln. Eine wichtige Forderung wird sicherlich auch die Notwendigkeit der Kapazitätsauslastung sein, um die Kosten besser aufzuteilen. Des Weiteren müssen eine einfache Bedienung und eine automatisierte Vorkalibrierung angestrebt werden, um qualitative Fehler zu verringern. Ein wichtiger Punkt besteht zudem in der Schnittstelle zwischen CT-Gerät und QM-System, welche zwingend erforderlich sein wird. Zukünftig sollte auch über den Platzfaktor nachgedacht werden. Bisher stehen sogenannte „Tischgeräte“ nur für einen sehr kleinen Leistungsbereich zur Verfügung, wobei diese keine Stahlteile durchstrahlen können. Der größte Faktor ist aber die notwendige Messzeit für ein detailliertes Ergebnis. Dieser muss vor allen anderen Faktoren optimiert werden.

Das Ziel einer qualitativ hochwertigen Auswertung in akzeptabler Messzeit beschreiten die Hersteller zum Teil auf unterschiedliche Weise. So werden u.a. spezielle Röntgenquellen mit rotierenden Targets verwendet, oder noch leistungsstärkere Transmissions-targets entwickelt, welche den herkömmlichen Reflektionstargets in Sachen Qualität der Messung überlegen sind. Andere Hersteller arbeiten an genaueren Rekonstruktionsalgorithmen z.B. für eine bessere Helix-Tomographie (große Bauteile). Zudem werden zukünftig auch immer größere und empfindlichere Detektoren verbaut. Auch die Entwicklung sogenannter Zeilendetektoren könnte in Zukunft die industrielle CT beeinflussen. Weitere wichtige Ansatzpunkte sind u.a. die Monochromatisierung des Röntgenstrahls, die Vergrößerung der internen Rechentechnik und das genaue anpassen aller Einstellparameter und Korrekturverfahren an die jeweilige Messaufgabe.

In Hinblick auf die Messfähigkeit, hat die CT deutlich gemacht, was technisch möglich ist. Bei nahezu allen Merkmalen war die Streubreite sehr gering im Vergleich zur angegebenen Toleranz. An dieser Stelle zeigt sich die große Stärke der CT und das noch nicht ausgereizte Potential hinsichtlich Verkürzung der Messzeiten unter Berücksichtigung akzeptabler Einbußen bei der Qualität. Schwächen weist die CT dann auf, wenn bei einem sehr großen Messbereich ein relativ kleiner Bereich für die Auswertung von Merkmalen herangezogen wird, wie z.B. die Koaxialität beim Düsenkörper. Für die beiden Messaufgaben an der Piezoantrieb BG, siehe Abbildung 4, und der Injektor BG kommen derzeit nur CT-Messungen in Frage. Die Messfähigkeit der Merkmale konnte auch nachgewiesen werden.

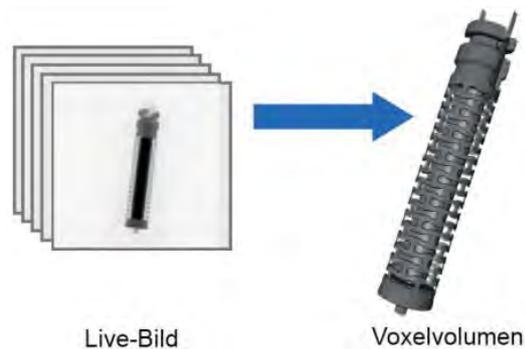


Abbildung 4: CT-Volumenmodell Piezoantrieb BG

Die kalkulierten Prüfkosten zeigen deutlich, dass diese neue und hochmoderne Technik der Messwertgenerierung auch einen hohen Preis hat. Die Prüfkosten lagen immer über der bisherigen Standard Messmethode. Jedoch besteht noch sehr großes Verbesserungspotential, wodurch die Prüfkosten erheblich verringert werden könnten. Vorteile bezüglich der möglichen Anpassung von Messprogrammen und der variablen Einsetzbarkeit sind an dieser Stelle nicht inbegriffen. Anhand der betriebswirtschaftlichen Faktoren kommt eine CT-Messung im Hinblick auf die eingangs gezeigten Messaufgaben nur dann in Frage, wenn diese nicht anders gemessen werden können. Bei der Messaufgabe am Düsenkörper, siehe Abbildung 5, ist es zum jetzigen Zeitpunkt günstiger, die Teile taktil zu messen und danach zu entsorgen, als diese zu tomographieren.

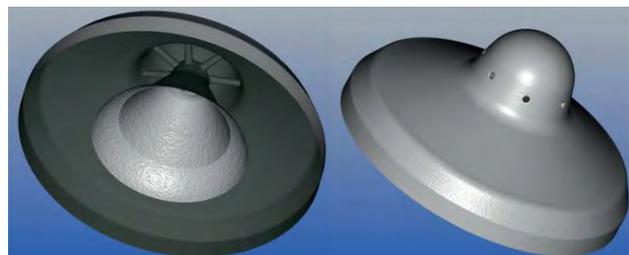


Abbildung 5: CT-Oberflächenmodell Düsenkörper

Beim Injektorkörper, siehe Abbildung 6, entscheidet eine andere Messmethode (optisch/taktile) den Prüfkostenvergleich für sich, aufgrund geringerer Anschaffungskosten und Prüfzeiten.

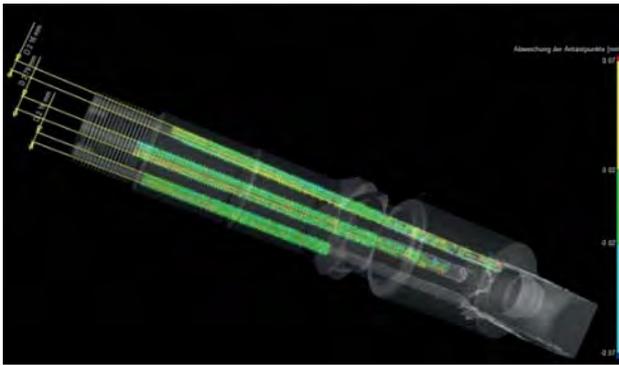


Abbildung 6: CT-Volumenmodell Injektorkörper

6. Fazit und Ausblick

Die CT kann also, anhand aller gesammelten Informationen, noch nicht ersetzend für eine einfache Handmessvorrichtung verwendet werden. Auch im Vergleich zu Formprüf- und Koordinatenmessgeräten, kann die CT nur dann zum Einsatz kommen, wenn die Geometrien nicht mehr genau durch Taster oder optische Systeme erfasst werden können. Als Forschungs- und Universalgerät ist die CT jedoch unschlagbar. Das Einsatzspektrum ist sehr groß, wie bei den Tests zu erkennen war. Dennoch bieten die führenden Unternehmen der CT-Technik auch heute schon leistungsfähige Systeme an, welche sich nach weiteren Verbesserungen hinsichtlich der Anforderungen der Qualitätssicherung in naher Zukunft etablieren werden.

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle für die mir zugekommene Unterstützung Herzlich Bedanken. In erster Linie gilt der Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerhard Gebhardt, Herrn Dipl.-Ing. (FH) Sören Lahr und Herrn Dipl.-Ing (FH) Dierk Raubold, für ihre ausdauernde Unterstützung. Zudem gilt mein Dank meinen Eltern und Freunden, welche mich immer motivieren konnten und hinter mir standen.

Literaturverzeichnis

- [1] S. Wagner, Masterarbeit Bewertung der Computertomographie als integraler Bestandteil der Prüfmittelplanung, (2014)
- [2] Continental AG, Produktschulung PCR5, PowerPoint (2012)
- [3] Continental Automotive GmbH, Interne technische Zeichnungen, (2014)
- [4] VDI 2630-1.1 Computertomographie in der dimensionellen Messtechnik – Grundlagen und Def., (2009)
- [5] Werth Messtechnik GmbH, Röntgentomographie in der industriellen Messtechnik (Band 331) München, (2011)
- [6] DIN EN 16016-1 Zerstörungsfreie Prüfung – Durchstrahlungsverfahren – Computertomographie – Teil 1: Terminologie, (2011)
- [7] DIN EN 16016-2 Zerstörungsfreie Prüfung – Durchstrahlungsverfahren – Computertomographie – Teil 2: Grundlagen, Geräte und Proben, (2012)
- [8] DIN EN 16016-3 Zerstörungsfreie Prüfung – Durchstrahlungsverfahren – Computertomographie – Teil 3: Durchführung und Auswertung, (2012)
- [9] E. Dietrich, A. Schulze, Eignungsnachweis von Prüfprozessen, (2014)

THE APPLICATION OF MATLAB/SIMULINK FOR CONTROL OF MECHANISMS WITH PARALLEL KINEMATIC STRUCTURE

Vladimír Bulej*, Juraj Uriček*, Manfred Eberth**

*University of Žilina, Univerzitná 1, SK-01026 Žilina, Slovakia, vladimir.bulej@fstroj.uniza.sk

**AUDI AG, 85045 Ingolstadt, Germany, manfred.eberth@audi.de

The article deals with the design and simulation of created model of mechanism with parallel kinematic structure as an electro-mechanical system. Concretely it describes the basic steps of Stewart platform modeling, which should be used as a machine tool or robot with six linear actuators. The simulation model is composed from functional blocks represented each component with certain properties. The results should be used for simulation of mechanism's behavior as well as for generating of control algorithms for real functional prototype.

Keywords: Simulation model, Stewart platform, Simulink, PKS

1. Introduction

Few years ago a research group at the University of Žilina was started to deal with the field of mechanisms with parallel kinematic structure (PKS). During this period there were designed some construction concepts of parallel mechanisms and different kind of simulation software for these types of mechanism. One of designed prototypes is also mechine tool based on mechanism Hexapod. Hexapod, also known as Stewart platform, is multi-axis manipulator capable of full six degrees of freedom (DOFs) motion. This article discusses about the simulation of hexapod mechanism and the control system designed special for it.



Figure 1. Hexapod prototype

Our main aim is to create the simulation model and propose the control algorithm for calculation and simulation of hexapod prototype in the software MATLAB/Simulink. At the beginning it was necessary to prepare an appropriate 3D model of selected mechanism for what we used software ProEngineer and SolidWorks. Subsequently, the

model was converted to a format that can be processed by the program MATLAB/Simulink. Finally, the control model of Stewart platform was developed with the help of Simulink libraries.

2. Preprocessing of Hexapod Simulation Model

As the first step of whole process can be considered the transformation of mechanism's 3D model into the functional schema readable by MATLAB/Simulink. The distribution of assembly components into the individual subassemblies is needed with respect to the organization of the whole assembly and especially with respect to minimizing the functional blocks at its transfer into the MATLAB/Simulink. The size of generated functional block diagram depends on the total number of free components. It means that if we want to reduce the complexity of the block diagram, it is necessary to cover the components which move together into the subassembly. The result of described components' arrangement is minimized structure composed from several subassemblies without reducing the functionality and any impact on the simulation result.

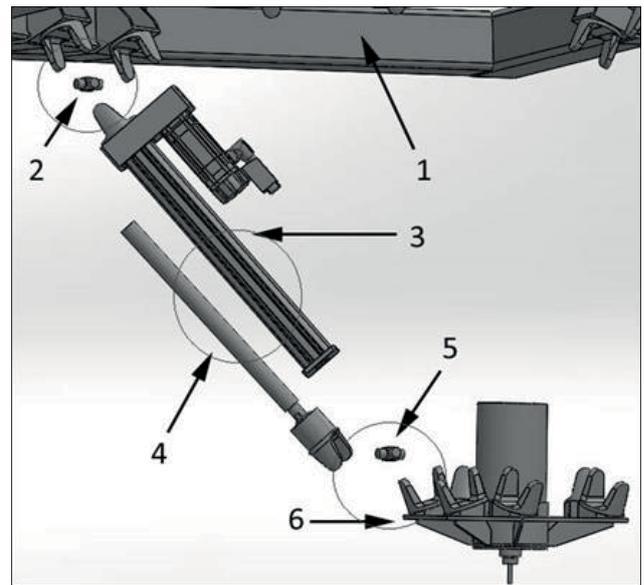


Figure 2. Individual parts arranged into the subassemblies

Individual parts are arranged into the several subassemblies according to the figure 2:

1. main frame with fixed part of upper universal joints,
2. upper universal joint,
3. body of linear actuator with moving part of upper universal joint and drive unit,
4. piston of linear actuator with one half of lower universal joint,
5. lower universal joint,
6. moving platform with the spindle and second half of lower universal joints.

3. Export of XML File

The second step of the process is the data export to an XML file and its subsequent import into the environment of software MATLAB/Simulink. For this operation we need to instal the free modul SimMechanics Link for software Solidworks, Autodesk Inventor and PTC Creo Parametric.

Registration is done through the instruction `smlink_linkinv` written in MATLAB command line.

After the registration in software Solidworks you can find in upper toolbar the *SimMechanics Link* icone.

For the exporting of block diagram you can choose the option *Export>>SimMechanics First Generation*.

After the exporting operation is automatically generated the block file *hexapod.xml* as well as the file of 3D model with suffix **.STL*.

Then we can import these files into the environment of software MATLAB. For this operation can be used command `mech_import('hexapod.xml')` in Simulink window. Later will appear the 3D model of hexapod in graphic window.

4. Simulation Model of Hexapod

The figure 3 shows the final model of hexapod which we created on the base of the Stewart platform demo. Model creating, gradual adjustment and parameter settings require extensive study of partial problems on free internet forums, free help available, or study materials. The block model of Hexapod is divided into three main subsystems (shown in figure 3):

- subsystem of trajectory calculation,
- PID control subsystem
- and subsystem of mechanism hexapod.

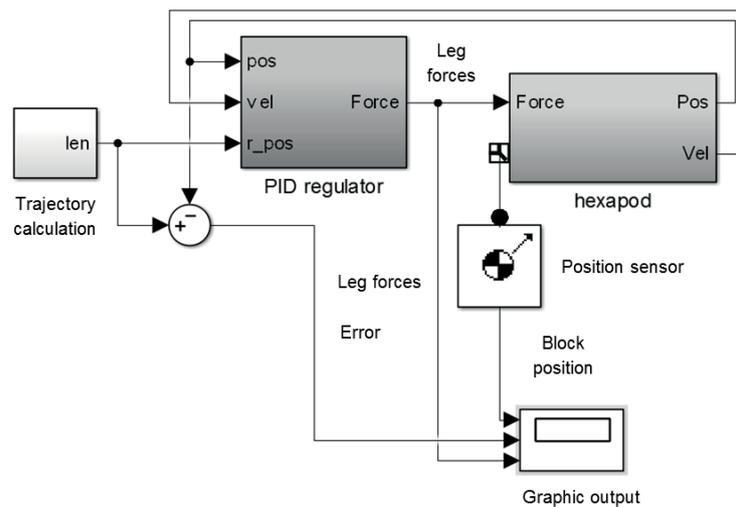


Figure 3. Model of Hexapod

Trajectory Calculation Subsystem

In the following text is a simple description of the individual blocks of the first subsystem – Trajectory calculation (figure 4).

The block **Constant** generates a constant input parameter. In this case we will generate constant linear motion. The recording time is set up to 0.02s. This value was chosen with respect to the speed of simulation and quality of output data as well. The blocks **X Pos**, **Pos Y**, **Z Pos** define us the linear coordinates of the TCP point (placed on moving platform with the end-effector). Their composition give us the result motion of the platform in all three coordinates. Blocks **X Pos** and **Y Pos** can be replaced by other sources of input parameters (individual coordinates). It means that instead of block Constant should be placed the block with equation of circular motion.

The blocks **X Angle**, **Y Angle** and **Z Angle** allow us to enter the angular settings of the moving platform in all three coordinates. Block **EulerXYZ** calculates the final rotation matrix (vector of size 9x1) corresponding to the orientation of the moving platform. These vector will be transformed to the matrix with dimensions 3x3. Block **body_pts** represents the moving platform with 6 three-dimensional values – the joints. The block **Product** will produce the final transformation matrix which is composed from two input matrices **EulerXYZ** and **body_pts**. Block **Create desired position matrix** creates the multidimensional arrays of size 6x3. Then the matrices are procecd by two Sum blocks. Block **pos_base** stores coordinates of upper universal joints connected to the frame.

The block **Nominal Leg Length** give us the length of each leg.

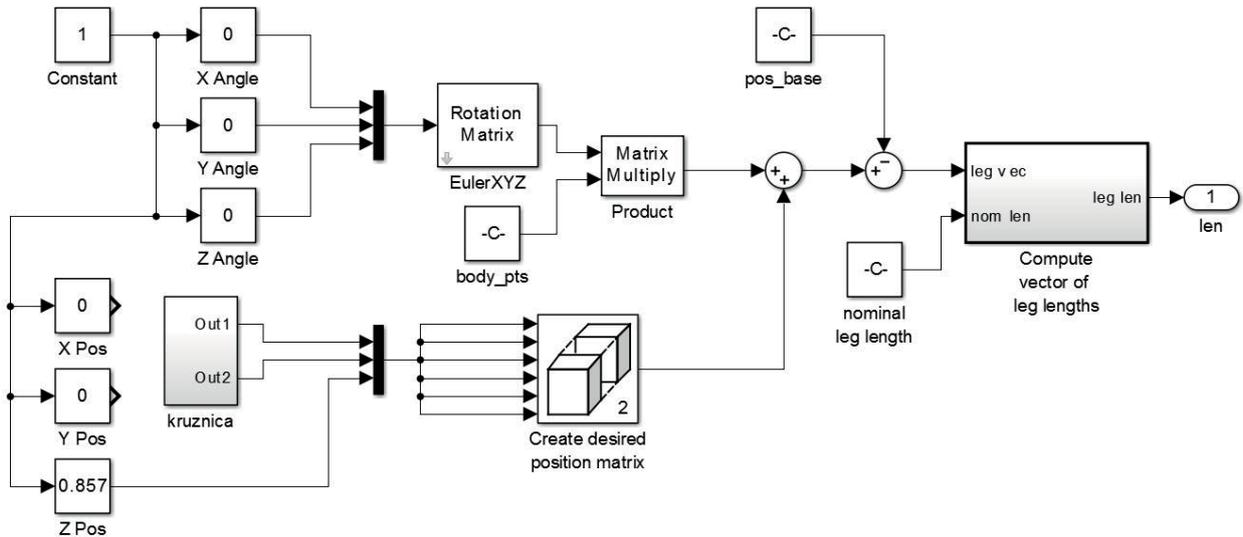


Figure 4. Subsystem Trajectory calculation

PID regulator subsystem

In figure 5 the block **pos** refers to the sensor of actuator's current position, block **r_pos** stores the calculated value from the previous subsystem (trajectory calculation). Matrix **r_pos** will be subtracted from the matrix **pos**. The resulting matrix is sent to the amplifier **Kp** (proportional feature). Into the **Ki** (integration feature) will be loaded the

integrated value of a matrix. The block **vel** refers to the same sensor of the actuator, but in this case we measure the velocity. The block **Gain** inverts the sign of the result (from positive to negative or negative to positive). The block **Kd** makes the differentiate of this value. At the end are counted all blocks **Kp**, **Ki**, **Kd** and the result is a force intended for the actuator.

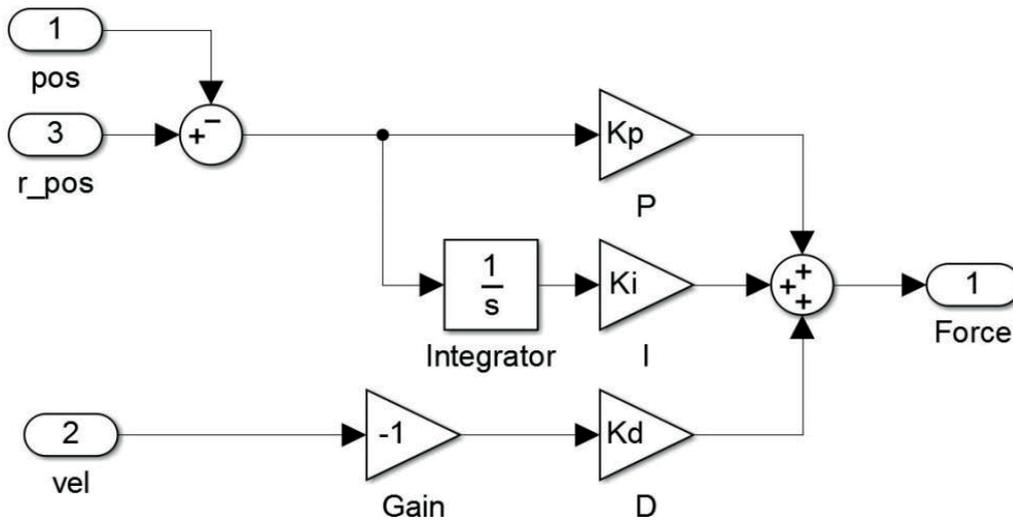


Figure 5. Subsystem PID regulator

Hexapod Subsystem

In figure 6 is shown the hexapod block diagram (the orientation of blocks is upside-down regarding to to real inverted configuration of the hexapod prototype). Lower red rectangle highlights the chain of blocks, which represented the fixed frame of hexapod (static upper platform). Then the upper red rectangle describes the moving platform include the end-effector (in reality it is placed under the fixed frame). Between the fixed frame and the moving platform are located the guiding chains (struts

composed from linear actuators). They must be linked properly. **Env** block must be connected to the block **Root Ground** due to machine settings to the environment. It's actually a machine environment that lets you view and change the mechanical environment. Block **Env** has the possibility of entering the gravitational signal into a three-dimensional environment, as we set. When you click on a block **top_plate-1** a window of basic settings of moving platform appears.

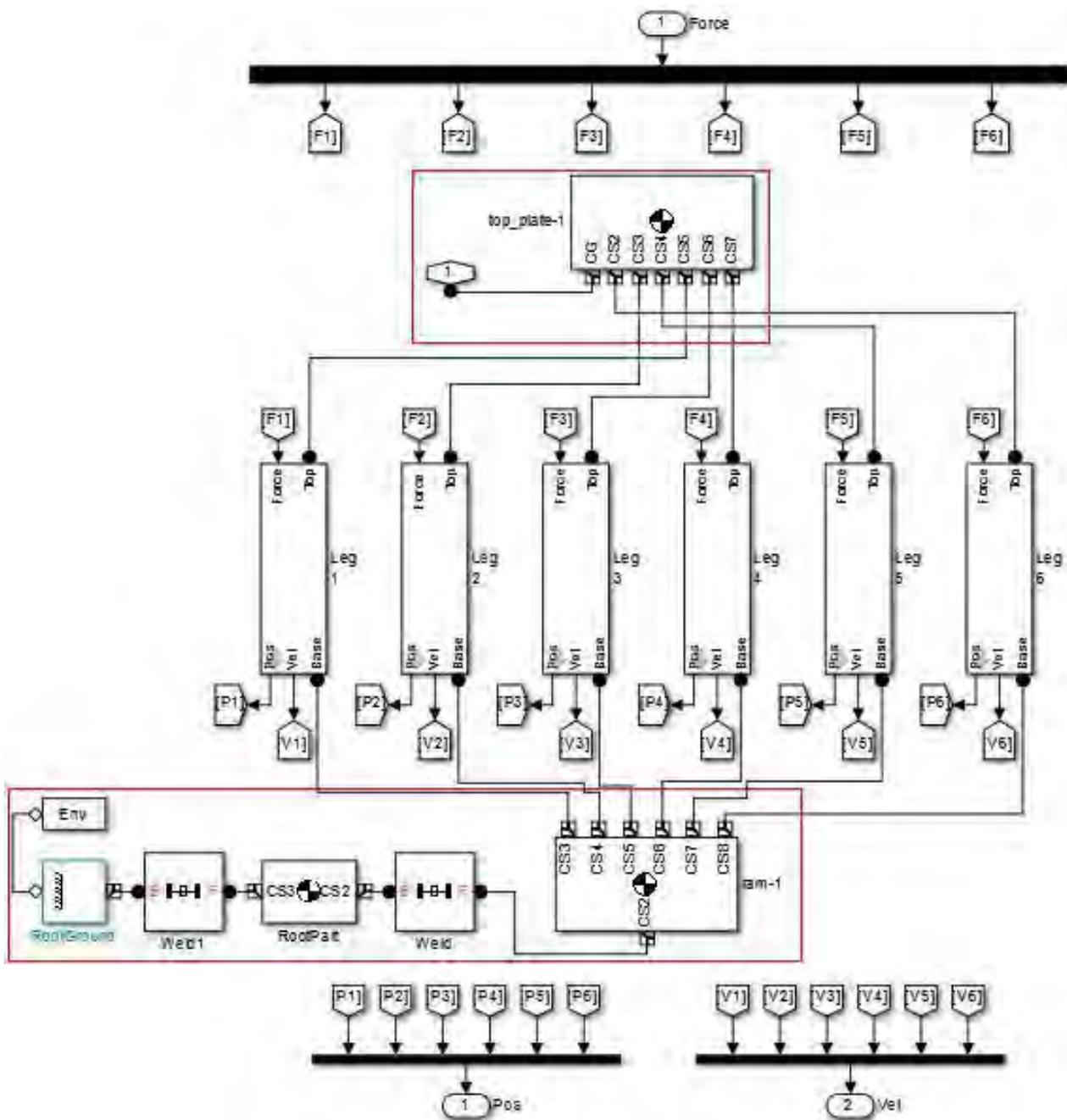


Figure 6. Subsystem hexapod

5. Conclusions

Machine tools based on parallel or hybrid mechanisms can be successfully and with higher efficiency applied for high speed cutting and this way replace the standard machines based on serial kinematic structure. At the authors' workplace was designed the prototype of machine tool with hexapod kinematic structure. The main aim of this article was the design of control system in software MATLAB/Simulink. There have been described the first steps of making a simulation model of Hexapod mechanism. The next phase will be implemented simulations, which should confirm the accuracy of the proposed model as we expected.

References

- [1] MAREK, J.: Obráběcí centra s nekonvenční kinematickou strukturou. In *MM Průmyslové spektrum, special edition – Konstrukce CNC obráběcích strojů*, 2006. Praha : MM publishing, 2006. ISSN 1212-2572, p. 234-243.
- [2] URÍČEK, J. et al.: Design of Machine Tool with Parallel Kinematic Structure. In *Scientific Reports, Journal of the University of Applied Sciences Mittweida - Moderne Automatisierungstechnik / Robotik - IWKM 2011*, Mittweida, 2011, Vol. 21, No. 5, p. 36-39, ISSN 1437-7624
- [3] DRESTO, D.: Use of Simulink for drive control of machine with parallel kinematic structure. Diploma thesis. Žilina, 2015

AUTOMATISIERTES LADEN EINES E-FAHRZEUGES MIT HILFE EINES ROBOTERS

Michael Jokesch*, André Froß°, Ulrike Thomas*

*Technische Universität Chemnitz, Reichenhainer Straße 70, D-09126 Chemnitz

°Core Mountains GmbH, Frühlichtweg 11, D-09127 Chemnitz

Die vorgestellte Arbeit beschäftigt sich mit dem automatisierten Koppeln einer Ladestation an ein Elektrofahrzeug mit Hilfe eines Roboters, also allgemein mit einer Stift-In-Loch-Problemstellung. Hierbei handelt es sich nicht um herkömmliche zylindrische Verbindungsteile sondern um einen Stecker mit 7 Pins und einer unsymmetrischen Form nach DIN EN 62196 – Typ 2. Aufgrund dessen sind die Anforderungen deutlich komplexer als in vielen anderen Arbeiten. Mittels Bildverarbeitung muss die Position der Buchse möglichst genau erkannt werden, um anschließend deren Pose zu ermitteln. Trotz aufwendiger Bildverarbeitungsalgorithmen bleiben Fehler, die das Schließen der Verbindung erschweren. Um die verbliebenen translatorischen sowie rotatorischen Fehlpositionierungen auszugleichen, werden verschiedene Impedanzregelungen für den Roboter eingesetzt. Alle Algorithmen werden an einem realen System (E-Mini, Lbr iiwa) getestet.

1. Einleitung

Es existieren viele Montageaufgaben, die dem Stift-In-Loch-Problem zugeordnet werden können. Das automatisierte Laden eines Elektrofahrzeugs mit Hilfe eines Roboters ist eine spezielle Stift-In-Loch-Aufgabe und ist Teil des GINKO Projektes [1]. Roboterassistierte Ladeverfahren können zu mehr Komfort und Sicherheit führen, da die Kabel aufgrund der hohen Ströme große Querschnitte erfordern und somit schwer und unhandlich sind. Ziel des Projektes ist, dass die Laderoboter in einem Parkhaus abgestellte Fahrzeuge ohne Eingriff des Nutzers aufladen. Vergleichbare Systeme sind heute am Markt nicht verfügbar. Der Ansatz des roboterassistierten Ankoppelns wird allerdings auch von großen Automobilherstellern wie Volkswagen [2] und Tesla [3] verfolgt.

Die besondere Herausforderung beim Ankoppeln besteht darin, dass zwischen dem Stecker und der Buchse eine form- und kraftschlüssige Verbindung hergestellt werden muss. Dies stellt auch den Hauptunterschied zu Tankrobotern für herkömmliche Kraftstoffe dar [4] [5]. In Anbetracht dessen haben wir hohe Anforderungen an die Genauigkeit der Ausrichtung des Steckers zur Buchse. Das sich daraus ergebende Stift-In-Loch-Problem wurde schon oft untersucht [6] [7] [8]. Die genannten Arbeiten sowie auch die meisten anderen beschäftigen sich aber lediglich mit zylindrischen Formen. Allgemein kann man sagen, dass sich der Montageprozess in zwei Phasen teilt: die Such- und die Einschubphase. Während der Suchphase wird das Loch detektiert und der Mittelpunkt des Stiftes bezüglich des Mittelpunkts des detektierten Loches ausgerichtet. Die Genauigkeit muss dabei innerhalb des Spiels zwischen Loch- und Stiftdurchmesser liegen. Publierte Ansätze verwenden Visionssysteme, Kraft-/Momenten Informationen [6] oder neuronale Netze.

Im folgenden Abschnitt wird das optische Annäherungsverfahren behandelt, danach in Abschnitt 3 der umgesetzte Stift-In-Loch Algorithmus vorgestellt. Im 4. Abschnitt wird auf die durchgeführten Experimente und erzielten Ergebnisse eingegangen.

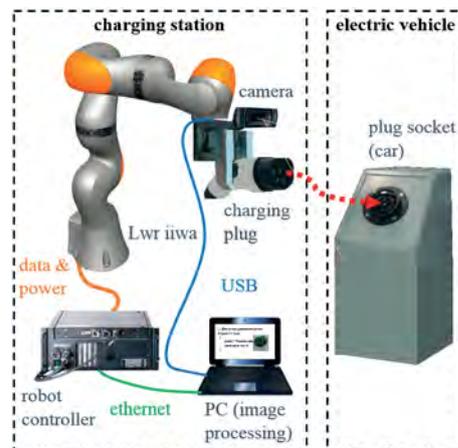


Abbildung 1. Schematischer Versuchsaufbau

2. Optisches Annäherungsverfahren

Bevor der Stift-In-Loch Prozess gestartet werden kann, muss der Ladestecker in eine definierte Position vor den Fahrzeuganschluss gebracht werden. Diese Positionierung erfolgt optisch mittels einer hochauflösenden Farbkamera (Auflösung bis 2592x1944), welche am Roboterarm befestigt ist. Die Positionierung basiert auf einer schrittweisen Annäherung, wobei die Korrektur des Orientierungsfehlers zwischen dem Ladestecker am Roboterarm und der Buchse am Fahrzeug erst im letzten Schritt erfolgt. Der Zeitaufwand für die Entwicklung der BV-Algorithmen konnte durch den Einsatz der freien Bibliothek OpenCV [9] deutlich reduziert werden.

2.1. Steckerdetektion

In der ersten Stufe der Bildverarbeitung wird die Lage des Ladeanschlusses im 2D-Bild bestimmt. Dazu wurden verschiedenste Ansätze wie z.B. Feature Matching, Template Matching, Konturanalyse oder die Bewertung der Hu-Momente untersucht. Ebenso wurden Verfahren aus dem Bereich des maschinellen Lernens erprobt. Für die hier gestellte Aufgabe wird ein Verfahren benötigt, welches invariant gegenüber Rotation und Skalierung ist, sowie den Ladeanschluss auch bei leichter Verzerrung noch zuverlässig erkennen kann. So entstand eine Lösung, bei der eine intelligente Kombination der

genannten Verfahren zum Einsatz kommt. In der derzeitigen Implementierung werden ca. 4 Bilder pro Sekunde mit einer Auflösung von 1280x960 Pixel von der Kamera erfasst und verarbeitet.

Es zeigte sich, dass die Erkennungsrate zwar sehr hoch ist, sich Fehldetektionen aber nicht ausschließen lassen. Um resultierendes Fehlverhalten in anschließenden Stufen zu vermeiden, wurde deshalb ein Zustandsschätzer integriert, der die 2D-Detektionen filtert. Als Zustandsvariablen werden Bildposition, Größe und Orientierung des erfassten Ladeanschlusses im Bild geschätzt, der Zustandsvektor ergibt sich zu:

$$x = [x_i \ y_i \ r_i \ \varphi]^t.$$

Als Implementierung wurde zunächst ein Partikelfilter ausgewählt, nach ersten Tests jedoch durch einen Kalmanfilter ersetzt, da dieser für die gegebene Aufgabe bessere Ergebnisse liefert und weniger Hardware-Ressourcen beansprucht.

2.2. Schätzung der räumlichen Lage

Die Abbildung eines Punktes der 3D-Welt auf die 2D-Bildebene erfolgt gemäß Lochkameramodell wie folgt:

$$s m' = A [R|t] M' \quad (1)$$

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Ein 3D-Weltwinkel mit den Koordinaten (X, Y, Z) wird auf den 2D-Bildpunkt (u, v) abgebildet, indem der Punkt mittels Rotation/Translation in das Koordinatensystem der Kamera überführt und anschließend mittels der Matrix A auf die Bildebene projiziert wird. Diese Abbildung ist abhängig von der Rotation/Translation, d.h. der räumlichen Lage zwischen Kamera und Objekt (extrinsics), und A , den spezifischen Eigenschaften der verwendeten Kamera (intrinsics). Die Elemente von A , die Brennweite und Lage der Bildmitte, sowie zusätzliche (in der Abbildungsvorschrift nicht dargestellte) tangentielle und radiale Verzerrungsparameter der Kamera wurden im Zuge einer Kamerakalibrierung ermittelt. Mit einigen Punkt-zuordnungen zwischen Bild und Welt kann die räumliche Lage rückgeschätzt werden, was für die gefilterte Steckerdetektion zyklisch durchgeführt wird (vgl. Abbildung 2).

2.3. Korrektur der Position

Ist die relative Lage zwischen Kamera und Ladeanschluss bekannt, wird eine translatorische Korrekturbewegung berechnet und ausgeführt. Ziel ist eine definierte Zielposition, z.B. Fahrzeuganschluss zentriert mit 20 cm Distanz zur Kamera. Die Korrekturbewegung kann in einem Schritt erfolgen, wird aus Sicherheitsgründen jedoch mehrstufig ausgeführt (z.B. max. Annäherung je 30 cm).



Abbildung 2: 2D-Steckerdetektion und 3D-Lageschätzung

Der Zustand des Filters zur Steckerdetektion wird nach jeder Roboterbewegung explizit korrigiert.

2.4. Korrektur der Orientierung (Verkipfung)

Hat die Kamera die definierte Zielposition erreicht, erfolgt die Korrektur der Verkipfung zwischen dem Ladestecker und der Buchse am Fahrzeug (z-Achsen). Es wurde ein Ansatz entwickelt, welcher Bilder des Ladeanschlusses bewertet und daraus ein perspektivisches Maß extrahiert. Die Korrektur erfolgt durch sukzessive horizontale und vertikale Optimierung dieses Maßes bis die perspektivische Sicht auf den Anschluss möglichst direkt und die Verkipfung der z-Achsen ausreichend gering ist. Für optimale Ergebnisse wird diese Korrektur erst im Nahbereich der Kamera durchgeführt, wenn der Ladeanschluss ausreichend groß und detailliert im Bild erkennbar ist.

Nach einer abschließenden Offsetbewegung, die den Ladestecker in Position der Kamera bringt, befindet sich der Ladestecker in definierter Lage zum Fahrzeuganschluss, der Stift-In-Loch Prozess wird nun ausgeführt.

3. Impedanzgeregeltes Ankoppeln

Die Detektion der Buchsenposition stimmt nicht zu 100% mit der tatsächlichen Position überein, sodass man den Stecker nicht einfach mit einer Linearbewegung einschieben kann. Die Fehlpositionierung des Steckers tritt in allen sechs Freiheitsgraden (FHG) auf. Ähnlich wie ein Mensch, der nur eine ungefähre Position der Buchse braucht um den Stecker erfolgreich anzufädeln, soll auch der Roboter Fehler durch „Fühlen“ ausgleichen. Dazu sind Informationen über wirkende externe Kräfte (Kollisionen) und entsprechende Reaktionen darauf entscheidend. Wie in [10] wird die Impedanz Z verwendet, die hier die Beziehung zwischen Kräften und Positionen beschreibt. Sie wird definiert durch die Trägheits-, die Dämpfungs- und die Steifigkeitsmatrix (M, D, K) . Die gewünschte Impedanz, die gewünschte Kraft \vec{F}_d und die aktuell wirkende Kraft \vec{F} ergeben dann die relativ korrigierte Position \vec{x}_c . Diese und die angenommene Position \vec{x}_d ergeben schließlich die Zielposition für den Roboter \vec{x}_t . Das resultierende Verhalten entspricht einem 6-

dimensionalen Feder-Dämpfer-System, d.h. der Controller lässt den Roboter eine virtuelle Feder den bis \vec{F}_d erreicht ist und wenn \vec{F}_d überschritten wird, dann gibt er der zu großen Kraft nach und staucht damit die virtuelle Feder zusammen.

$$\vec{x}_t = \vec{x}_d + \vec{x}_c \quad (3)$$

$$\vec{x}_c = Z(s)^{-1} \cdot (\vec{F}_d - \vec{F}) = (Ms^2 + Ds + K)^{-1} \cdot (\vec{F}_d - \vec{F})$$

Unser Algorithmus besteht aus drei Schritten mit unterschiedlichen Impedanzparametern. Im ersten Schritt wird der Kontakt zwischen Stecker und der Oberfläche der Buchse hergestellt. Danach erfolgt die Kompensierung der Fehlpositionierung, d.h. hier wird die blind-search-Strategie und die Impedanzregelung zusammengeführt. Im dritten Schritt wird der Stecker kraftschlüssig in die Buchse gedrückt.

Algorithmus 1 Insert the plug into the socket

Input: Stiffness and damping values for compliance. Frequency and amplitudes for search motion. Values for break conditions.

```

1  K[,D[; //stiffness and damping values
2  sz_f; //distance for successful search
3  sz_in; //distance for complete insertion
Output: was insertion successful or not
4  success=false;
5  move to the socket until force occurs;
6  compensate uncertainties by executing compliant search motion;
7  if sz>=sz_f then
8    generate force for complete insertion;
9    if sz==sz_in then
10     success=true;
11  endif;
12 endif;
13 return success;

```

3.1. Herstellen des ersten Kontaktes

Der Stecker sollte sich nach der optischen Annäherung ca. 30 mm vor der Buchse befinden. Um den ersten Kontakt sicher aufzubauen, wird der Roboter in z-Richtung weich geschaltet ($K_z = 50 \text{ N/m}$), sodass er bereits auf kleine Kräfte reagiert und sehr sanft den Kontakt herstellt. Es gibt in der Literatur viele Arbeiten zum sicheren Herstellen des ersten Kontaktes, stellvertretend sei [9] genannt.

3.2. Kompensation der Fehlpositionierung

Um die blind-search-Strategie zu implementieren wurde hier eine Funktionalität des LBR iiwa genutzt. Es ist möglich auf einen kartesischen Impedanzregler zusätzliche virtuelle Kräfte und Momente \vec{F}_{add} aufzuschalten. Da der Roboter den virtuellen Kräften ebenso wie den tatsächlichen externen Kräften ausweicht, können damit gezielte Abweichungen von der eigentlichen Trajektorie

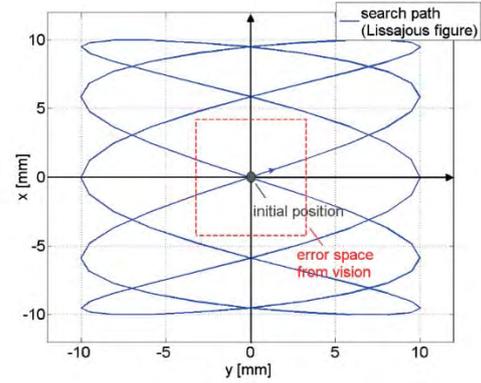


Abbildung 3: Blind-search-Pfad in der xy-Ebene aufgrund der virtuellen Kräfte. Die Initialposition kommt von der visionbasierten Detektion der Buchse. Der rote Bereich stellt den gemessenen maximalen Fehlerraum der Detektion dar.

generiert werden. Die virtuellen Kräfte können in allen FHG wirken, wodurch viele verschiedene Suchpfade des Steckers ermöglicht werden. Zur Generierung der virtuellen Kräfte müssen die Parameter Steifigkeit K_i , Frequenz f_i , Kraftamplitude A_i und relative Geschwindigkeit des Roboters v_{rel} beachtet und definiert werden. In dieser Arbeit werden sinusförmige virtuelle Kräfte in x- und y-Richtung sowie ein sinusförmiges Moment um die z-Achse (ψ) aufgeschaltet:

$$\begin{bmatrix} F_{add_x} \\ F_{add_y} \\ F_{add_\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_x \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot f_x}{v_{rel}} \cdot t\right) \\ A_y \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot f_y}{v_{rel}} \cdot t\right) \\ A_\psi \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot f_\psi}{v_{rel}} \cdot t\right) \end{bmatrix} \quad (4)$$

Damit verändert sich Formel (3) zu:

$$\vec{x}_c = Z(s)^{-1} \cdot [\vec{F}_d - (\vec{F} + \vec{F}_{add})] \quad (5)$$

In Formel (4) ist ersichtlich, dass wir in den drei FHG x, y, ψ aktive Suchbewegungen ausführen. Die Fehlpositionierungen in den anderen FHG werden lediglich aufgrund der Nachgiebigkeit durch die Impedanzregelung ausgeglichen. Aus diesem Grund sprechen wir von aktiver und passiver Kompensation. Die Suchpfade der aktiven Kompensation im freien Raum ergeben sich zu:

$$\begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \\ \psi(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} (F_{add_x} / K_x) \\ \frac{1}{2} (F_{add_y} / K_y) \\ \frac{1}{2} (F_{add_\psi} / K_\psi) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Da wir das Frequenzverhältnis $f_y/f_x = 0,4$ wählen entsteht in der xy-Ebene eine Lissajous-Figur, wie Abbildung 3 sie zeigt. Es ist zu beachten, dass die Suche auf einen deutlich größeren Bereich ausgedehnt wird, als es die maximal zu erwartenden Fehler erfordern. Dadurch erhalten wir einen deutlich robusteren Algorithmus.

3.3. Vollständiges Eindrücken des Steckers

Im letzten Schritt ist der Stecker bereits angefädelt und kann nun eingedrückt werden. Dazu wird der

Roboter in z-Richtung hart geschaltet ($K_z = 4000 \text{ N/m}$). Aufgrund der hohen Steifigkeit können in diesem FHG entsprechend große Kräfte auf die Umgebung aufgebracht werden. Die anderen FHG bleiben nachgiebig, um letzte kleine Verschiebungen zwischen Stecker und Buchse passiv zu kompensieren.

4. Experimente und Ergebnisse

Zur Evaluierung der Algorithmen wurde eine Reihe von Versuchen durchgeführt. Sowohl am Testaufbau im Labor als auch am projekteigenen E-Mini wurde getestet. Insgesamt kamen wir auf etwa 100 Versuche, in denen Bildverarbeitung und anschließende Impedanzregelung zusammen getestet wurden plus unzählige Einzeltests. Ein Ankoppelvorgang dauerte durchschnittlich 110 Sekunden. Bei sehr ungünstigen Lichtverhältnissen kann es vorkommen, dass der Lack des Autos reflektiert und eine Erkennung unmöglich macht. Dies wird automatisch erkannt und die Roboterposition ein wenig verändert. In den meisten Fällen konnte die Buchse erfolgreich gefunden und der Stecker entsprechend ausgerichtet werden.

Die Erfolgsquote der Verbindungsherstellung lag bei ca. 87%, wobei sich die Bestimmung der Verkipfung als Hauptursache für die Zeitdauer sowie die Fehlversuche erwiesen hat. Wenn das Visionsystem erfolgreich arbeitete, wurde der Stecker zu 99,9% erfolgreich eingeschoben. Das wurde zuvor so erwartet, da bei den Einzeltests der Algorithmen der zu erwartende Fehler der optischen Annäherung deutlich überschritten wurde, um die Robustheit des impedanzgeregelten Steckvorgangs zu testen. Es können bis zu 8 mm Verschiebung und 5° Verkipfung zuverlässig korrigiert werden. Abbildung 4 zeigt die dreidimensionale Position des Steckermittelpunktes während eines Verbindungsvorgangs.

5. Zusammenfassung

In diesem Paper stellen wir eine Methode zur Lösung von Stift-In-Loch Problemen vor. Als spezielle Anwendung wurde das Herstellen einer Steckverbindung zum Laden eines Elektroautos bearbeitet.

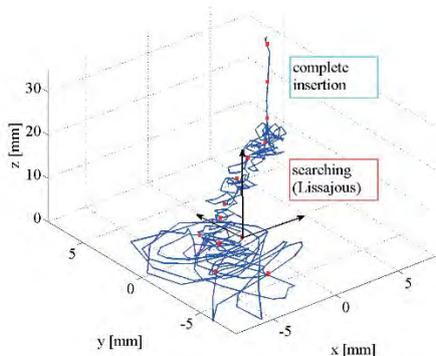


Abbildung 4: 3D-Position des Steckers während des Stift-In-Loch-Prozess

Es zeigte sich, dass für optimale Ergebnisse der kamerabasierten Bildverarbeitung, insbesondere für die Verkipfungskorrektur, eine ausreichende Beleuchtung erforderlich ist. Da der Einsatz des Systems auch in dunklen Umgebungen möglich sein muss, wird eine zusätzliche Beleuchtung notwendig. Idealerweise befindet sich diese nahe der Kamera am Roboterarm. Aufgrund bestimmter mechanischer Einschränkungen wurde als Kompromiss eine Hintergrundbeleuchtung realisiert. Mit Hilfe der zur Verfügung stehenden Funktionen des LBR iiwa wurde ein nachgiebiger blind-search-Algorithmus entwickelt, der die verbliebenen translatorischen Verschiebungen und rotatorischen Verkipfungen ausgleicht. Die erreichte Erfolgsquote von 87% ist zunächst vielversprechend, bedarf aber einer weiteren Steigerung um das System tatsächlich einsetzen zu können.

Zum Abschluss des Gesamtprojektes wird es einen Test unter realen Bedingungen geben. Dafür wurde bereits ein Parkhaus angemietet, wo die Ladestation vollautomatisch ein reales Elektroauto aufladen soll. Bis dahin soll eine Quote von >95% erreicht werden.

Danksagung

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter den Förderkennzeichen 03IPT505A und 03IPT505C gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Literaturverzeichnis

- [1] GINKO Project, <https://www.tu-chemnitz.de/etit/sse/Forschung/Projekte/ginko.html>, (28.6.2015)
- [2] <https://www.volkswagen-media-services.com/detailpage/-/detail/e-smartConnect-Volkswagen-forscht-an-automatisiertem-Schnellladesystem-fr-die-nchste-E-Fahrzeuggeneration/view/2448472> (13.7.2015)
- [3] <http://www.teslamotors.com/> (8.9.2015)
- [4] Fuelmatics Systems AB, <http://fuelmatics.com/>, (5.7.2015)
- [5] RotecEngineering, <http://rotec-engineering.nl/en/automation/refueling-robot/> (5.7.2015)
- [6] Sharma, K., Shirwalkar, V., Pal, P.K.: Intelligent and Environment-Independent Peg-In-Hole Search Strategies, CARE'13, Robotics and Embedded Systems. Jabalpur
- [7] Chhatpar, S.R., Branicky, M.S.: Localization for Robotic Assemblies with Position Uncertainty, IROS'03
- [8] Newman, W.S., Zhao, Y., Pao, Y.-H.: Interpretation of Force and Moment Signals for Compliant Peg-in-Hole Assembly, ICRA'01
- [9] <http://opencv.org/> (8.9.2015)
- [10] Song, H.-C., Kim, Y.-L., Song, J.-B.: Automated guidance of peg-in-hole assembly tasks for complex-shaped parts, IROS'14

JACOBI-MATRIX BASIERTE BAHNPLANUNG FÜR ROBOTER MIT ACHSREDUNDANZEN

Michael Walther, Kevin Hipp, Holger Schlegel, Reimund Neugebauer

Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau, Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse, Reichenhainer Str. 70, D-09126 Chemnitz

Der verbreitete industrielle Einsatz von Robotern ist seit Mitte der 70-iger Jahre Garant für eine hohe Produktivität. Häufig kommen in der Praxis serielle Kinematiken in Form von Gelenkarmrobotern mit sechs Achsen zum Einsatz. Erweitert man diese Struktur um eine oder mehrere Achsen, so wird der Roboter kinematisch redundant. Nachteilig wirkt sich diese Überbestimmtheit in der Berechnung der inversen Kinematik aus. Zur automatisierten Bindung zusätzlicher Achsfreiheitsgrade kann die inverse Kinematik mittels differentiellen Verfahren auf Basis der Jacobi-Matrix berechnet werden. Um den dieser Algorithmen inhärenten numerischen Ungenauigkeiten zu entgegenen, wird im vorliegenden Beitrag eine Methode vorgestellt, die es ermöglicht den gemachten Bahnfehler in die Berechnung der inversen Kinematik einzubeziehen. Zur Parametrierung der Methode kommen u.a. Verfahren der Optimierungsrechnung zum Einsatz. Die gewonnenen Ergebnisse werden anhand einer konkreten Applikation miteinander verglichen und validiert.

1. Einleitung

Besitzt ein Roboter mehr Achsen als für die Bindung von Position und Orientierung des Endeffektors im zumeist dreidimensionalen Arbeitsraum notwendig ist, so ist er kinematisch redundant. Redundante kinematische Strukturen sind prinzipiell bekannt und in verschiedenen Anwendungen industriell im Einsatz. Im Vergleich zu konventionellen Robotern geht mit der Redundanz oftmals ein erweiterter Funktionsumfang einher, der sich allein aus der gezielten Ausnutzung der Zusatzachsen erschließt [1]. Beispielsweise können große Bauteile ohne Bewegung des Werkstücks an sich bearbeitet werden. Neben dieser Erweiterung des Arbeitsraums werden redundante Achsbewegungen auch zur Erhöhung der Dynamik eingesetzt. Weitere Möglichkeiten liegen in der Rekonfiguration der Gelenkstellungen ohne Bewegung des Endeffektors (Nullraumbewegung), mit der u.a. singuläre Stellungen vermieden werden können.



Bild 1: KUKA KR150 auf Linearachse [2]

Eine mögliche technische Realisierung zeigt Bild 1, in dem ein Industrieroboter der Marke KUKA auf einer Linearachse betrieben wird. Solche Anlagen dienen der Verarbeitung sehr großer Bauteile aus Verbundwerkstoffen, wie beispielsweise Glas- oder Kohlefaser. In Abhängigkeit der Länge der Linearachse wird der Aktionsradius und somit der Arbeits-

raum der Gesamtanlage entscheidend vergrößert.

Die Steuerung der Bewegung redundanter Achsen erfolgt derzeit explizit. Das heißt Zusatzachsen werden separat, unabhängig vom Rest der Kinematik, programmiert. Hilfe bieten heutzutage nur Anbieter von sogenannten computer aided manufacturing (CAM)-Systemen, die Diagnosemöglichkeiten zur Verfügung stellen und die manuelle Beeinflussung einer generierten Bahn gestatten. Im Anschluss an eine Bahnplanung ist es allerdings notwendig, dass der Anwender die generierten Bahnpunkte und Orientierungen durch Simulationen auf Kollisions- oder Singularitätsfreiheit überprüft und gegebenenfalls anpasst. Diese iterative Vorgehensweise ist sehr zeitaufwendig.

Ziel muss es deswegen einerseits sein, redundante Achsen automatisch, unter Einhaltung oder Ausnutzung zusätzlicher Kriterien, anzusteuern. Andererseits muss aus praktischen Gesichtspunkten die Bahntreue und die Einhaltung vorgegebener dynamischer Kenngrößen gewährleistet werden [3], [4].

Auf der Grundlage der oben genannten Nachteile wird in dem vorliegenden Beitrag eine Methode vorgestellt, redundante Achsen in die Berechnung der inversen Kinematik eines Roboters einzubeziehen. Zunächst wird auf die Herleitung des inversen kinematischen Problems für redundante Robotersysteme eingegangen und damit verbundene Beschränkungen aufgezeigt. Kapitel 3 widmet sich Lösungsverfahren für redundante Kinematiken. Im Anschluss werden, als alternatives Vorgehen bzw. effektives Hilfsmittel zur Parametrierung der unter Kapitel 3 behandelten Methoden, metaheuristische Optimierungsverfahren beschrieben. Anhand der in Kapitel 5 eingeführten Beispiel-Kinematik sollen die vorgestellten Verfahren implementiert und verifiziert werden. Der Beitrag schließt in Kapitel 6 mit der Zusammenfassung der Ergebnisse und gibt einen Ausblick auf das weitere Potential redundanter Achsbewegungen.

2. Differentielle Kinematik

Ausgangspunkt der Berechnung jeglicher Bewe-

gungsgrößen eines Roboters bildet die kinematische Transformation. Hierbei wird zwischen direkter und inverser kinematischer Transformation unterschieden. Die direkte Kinematik des Roboters beinhaltet die Berechnung der Position und Orientierung des Endeffektors für eine gegebene Gelenkkonfiguration der kinematischen Kette. Im Gegensatz zur inversen Kinematik, die die Berechnung der Gelenkstellung aus den Bahnparametern verkörpert, hat die direkte Kinematik eine eindeutige Lösung.

Eine Möglichkeit die Transformation eines Roboters zu berechnen stellt die Jacobi-Matrix $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ dar. Anders zu den auf industriellen Steuerungen verwendeten geometrischen Gleichungen, stellt sie eine Beziehung zwischen den Winkelgeschwindigkeiten $\dot{\mathbf{q}}$ und Positionen \mathbf{q} der Gelenke sowie den Geschwindigkeiten $\dot{\mathbf{x}}$ und der Pose \mathbf{x} des Endeffektors dar. Die Jacobi-Matrix $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ ist die Matrix sämtlicher partieller Ableitungen der differenzierbaren Funktion $f(\mathbf{q})$ nach den Elementen des Gelenkwinkelvektors \mathbf{q} (vgl. Gleichung (1)).

$$\dot{\mathbf{x}} = \frac{\partial f(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}} \frac{d\mathbf{q}}{dt} = \mathbf{J}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} \quad (1)$$

Die Vektoren der Bahnkoordinaten \mathbf{x} und -geschwindigkeiten $\dot{\mathbf{x}}$ enthält für den allgemeinen, dreidimensionalen Fall die Komponenten in allen drei Raum- sowie Orientierungsrichtungen:

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= [p_x \ p_y \ p_z \ p_\phi \ p_\theta \ p_\psi]^T \\ \dot{\mathbf{x}} &= [\dot{p}_x \ \dot{p}_y \ \dot{p}_z \ \dot{p}_\phi \ \dot{p}_\theta \ \dot{p}_\psi]^T \end{aligned} \quad (2)$$

Die Vektoren der Gelenkwinkel \mathbf{q} sowie -geschwindigkeiten $\dot{\mathbf{q}}$ des Roboters haben, entsprechend der Anzahl an Gelenken, die Dimension n (vgl. Gleichung (3)). Um alle Freiheitsgrade im Raum (drei Positionen und drei Orientierungen) zu bedienen, benötigt man mindestens $n = 6$ Gelenke. Für den Fall der redundanten Kinematik ist $n > 6$.

$$\begin{aligned} \mathbf{q} &= [q_1 \ q_2 \ \dots \ q_n]^T \\ \dot{\mathbf{q}} &= [\dot{q}_1 \ \dot{q}_2 \ \dots \ \dot{q}_n]^T \end{aligned} \quad (3)$$

Für den Anwender oder Programmierer ist die inverse Kinematik von größerer Bedeutung, da bei der Implementierung einer Applikation stets kartesische Bahngrößen vorgegeben werden. In Abhängigkeit der durchzuführenden Aufgabe werden im Programm die Position und Orientierung des Endeffektors sowie die Bahndynamik vorgegeben. Lässt sich in (1) die Jacobi-Matrix invertieren, so erhält man für den Vektor der Gelenkgeschwindigkeiten:

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{x}} \quad (4)$$

Soll (4) auf einer industriellen Steuerung berechnet werden, geht man über zu einem Differenzenquotient im Iterationsschritt i . Die zeitliche Differenz zwischen zwei Berechnungsschritten Δt entspricht dem Interpolationstakt der Steuerung.

$$\frac{\mathbf{q}(t_i) - \mathbf{q}(t_{i-1})}{\Delta t} = \mathbf{J}_{i-1}^{-1}(\mathbf{q}) \frac{\mathbf{x}(t_i) - \mathbf{x}(t_{i-1})}{\Delta t} \quad (5)$$

Der Vektor $\mathbf{x}(t_i)$ enthält die vorgegebenen Positionen und Orientierungen der Bahn zum aktuellen Zeitpunkt t_i , $\mathbf{x}(t_{i-1})$ die entsprechenden Werte aus der letzten Iteration. Durch Umstellen von (5) lässt sich die aktuelle Gelenkstellung des Roboters $\mathbf{q}(t_i)$ aus den Bahnparametern, der inversen Jacobi-Matrix \mathbf{J}_{i-1}^{-1} sowie aus der Gelenkstellung der letzten Iteration $\mathbf{q}(t_{i-1})$ berechnen.

Aus der vorliegenden Berechnungsvorschrift kann die inverse Kinematik eines Roboters abgeleitet werden. Sogleich stellt sie allerdings die Grundlage zur redundanten Erweiterung einer kinematischen Kette dar.

3. Jacobi-Matrix basierte Behandlung kinematischer Redundanz

Die Berechnung der inversen Kinematik von Robotern mit Redundanz macht die Verwendung von differentiellen Algorithmen unumgänglich. Die Jacobi-Matrix in (1) hat in diesem Fall mehr Zeilen als Spalten und ist somit nicht mehr regulär. Die Invertierung, wie im nicht redundanten Fall nach (4), ist nicht ohne weiteres möglich. Es existieren unendlich viele Lösungen bzw. Gelenkstellungen für ein und dieselbe Lage des Endeffektors.

Die Bindung zusätzlicher Achsfreiheitsgrade wird durch das Formulieren eines linearen Optimierungsproblems mit Nebenbedingungen gelöst.

Eine Möglichkeit besteht darin, die Bewegung aller Achsen zu gleichen Anteilen zu wichten. Unter Verwendung der Transponierten der Jacobi-Matrix \mathbf{J}^T erhält die in [5] und [6] unabhängig voneinander eingeführte Pseudoinverse $\mathbf{J}^\dagger(\mathbf{q})$ der Jacobi-Matrix:

$$\mathbf{J}^\dagger(\mathbf{q}) = \mathbf{J}^T (\mathbf{J}\mathbf{J}^T)^{-1} \quad (6)$$

Eingesetzt in (4) lässt sich nach Beziehung (7) auch für den redundanten Fall eine gültige Lösung für die Gelenkkonfiguration finden.

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}^\dagger(\mathbf{q})\dot{\mathbf{x}} \quad (7)$$

Für die praktische Anwendung der Jacobi-Matrix bzw. deren Pseudoinverse besteht allerdings ein Problem: die Abhängigkeit der Matrix von der Gelenkkonfiguration des Roboters. Zum Zeitpunkt t_i ist nur die in der letzten Iteration berechnete Gelenkstellung $\mathbf{q}(t_{i-1})$ bekannt und fließt als $\mathbf{q}(t_i)$ in die

Jacobi-Matrix ein. Dies führt, je nach Bahn und Länge der Berechnungsintervalle, teils zu erheblichen, in der praktischen Umsetzung nicht tolerierbaren Bahnfehlern. Das ist der wesentliche Grund, warum auf konventionellen Robotersteuerungen stets geometrische Gleichungen zur Berechnung der Kinematik verwendet werden.

Um dem zu begegnen, kann der resultierende Bahnfehler $\mathbf{e}(t_i)$ in die Ermittlung der inversen Kinematik einfließen [7]. $\mathbf{e}(t_i)$ ist ebenfalls ein Vektor und enthält die Abweichungen zwischen Soll- und Istbahn zum Zeitpunkt t_i :

$$\mathbf{e}(t_i) = [e_x \ e_y \ e_z \ e_\phi \ e_\vartheta \ e_\psi]^T \quad (8)$$

Bild 2 zeigt in Form eines Blockschaltbildes den prinzipiellen Ablauf, der, bezogen auf die Koordinate einer Bahnachse, einem klassischen Regelkreis ähnelt.

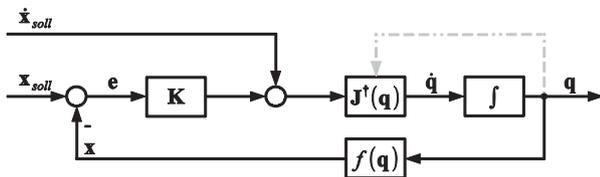


Bild 2: Berechnung der inversen Kinematik unter Einbeziehung des Bahnfehlers

Die positiv definite Diagonalmatrix \mathbf{K} der Dimension 6×6 enthält die Verstärkungsfaktoren in den einzelnen Bahnkoordinaten. Die Beziehung (9) beschreibt den auf der Robotersteuerung implementierten Algorithmus zur Berechnung der Gelenkstellungen $\mathbf{q}(t_i)$.

$$\mathbf{q}(t_i) = \mathbf{J}_{i-1}^{-1}[\mathbf{x}(t_i) - \mathbf{x}(t_{i-1}) + \mathbf{K}\mathbf{e}(t_i)] + \mathbf{q}(t_{i-1}) \quad (9)$$

In der Praxis stellt sich die Parametrierung der Matrix \mathbf{K} schwierig dar. Bekannt ist aus der Literatur [1], dass der Bahnfehler $\mathbf{e}(t_i)$ unter Verwendung von (8) entlang einer vorgegebenen Trajektorie gegen null geht. Die Eigenwerte von \mathbf{K} bestimmen die Konvergenzrate. In Abhängigkeit der Abtastzeit existieren allerdings obere Grenzen für die Einstellung. Ein weiteres Problem in der praktischen Umsetzbarkeit stellt die Abhängigkeit der Verstärkungsfaktoren von der Bahn und der Struktur der kinematischen Kette dar. Aus diesem Grund wird im Folgenden eine Methode vorgestellt, die es ermöglicht, unter Beachtung einer konkreten Applikation, eine optimale Einstellung für \mathbf{K} zu finden.

4. Metaheuristische Verfahren für redundante Kinematiken

Vorteile metaheuristischer Optimierungsverfahren gegenüber analytischen Ansätzen sind deren Anwendbarkeit auch bei sehr komplexen Systemen bzw. Modellen (nichtlinear, unstetig) [8], [9], [10]. Nachteile sind u.a. jedoch der hohe Rechenaufwand

und die nicht garantierte Optimalität der bestimmten Lösung. Eine mögliche Umsetzung dieser Verfahren ist die im Folgenden vorgestellte simulationsbasierte Optimierung (SBO).

Generell versteht man unter SBO das Suchen nach dem Extremum einer Zielfunktion durch die Kopplung eines Simulators mit einem Optimierer [9]. Es entsteht der in Bild 3 dargestellte zyklische Ablauf. Der Optimierer bestimmt eine gültige Lösung und übergibt diese dem Simulator zur Bewertung. Diese dient als Anhaltspunkt zur Ermittlung der nächsten Lösung. Hauptkomponenten des Simulators sind ein Modell des zu untersuchenden Gesamtsystems und der Bewerter für die ermittelte Lösung.

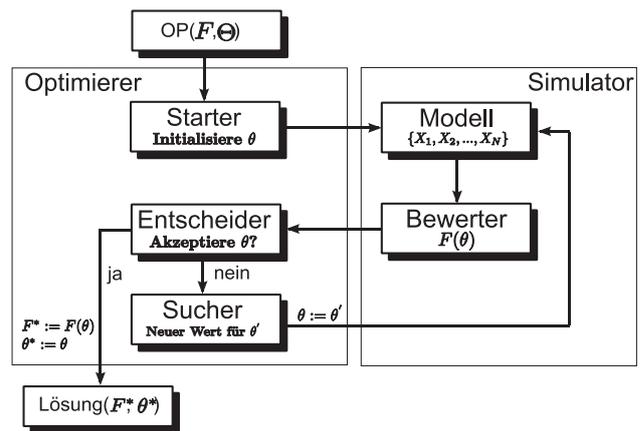


Bild 3: Struktur und Wirkungsweise der SBO

Es ist somit ein Optimierungsproblem (OP) der folgenden Art zu lösen (am Beispiel eines Minimums) [11]:

$$F(\boldsymbol{\theta}) \rightarrow \min_{\boldsymbol{\theta} \in \Theta} (F(\boldsymbol{\theta})) \quad (10)$$

Dabei wird $F()$ als Optimierungs- bzw. Effektivitätskriterium bezeichnet [12]. Es handelt sich bei $F()$ um eine reellwertige Funktion, so dass gilt: $F: \rightarrow \mathbb{R}$. Der Funktionswert von $F(\boldsymbol{\theta})$ stellt eine Bewertung der aktuellen Lösung $\boldsymbol{\theta}$ dar, wobei Θ eine Menge ist, die alle gültigen Lösungen beinhaltet. Es muss folglich gelten: $\boldsymbol{\theta} \in \Theta$.

Im Rahmen der Untersuchungen wurde die SBO zur Parametrierung der Verstärkungsmatrix \mathbf{K} in Gleichung (9) verwendet. Ziel ist es, den in der Bahnplanung mittels der differentiellen Algorithmen gemachten Fehler so gering wie möglich zu halten. Um dies zu gewährleisten, wird als Optimierungskriterium die Summe der Fehler in jeder Bahnachse gewählt. Dieses Maß wird in jedem Punkt, und somit jedem Interpolationstakt der Steuerung, der programmierten Sollbahn durch den Optimierer minimiert.

5. Implementierung und Ergebnisse

Das Anlagenkonzept, für welche die vorgestellte Methode implementiert wurde, umfasst eine ca. 6 m

lange Ablegebahn zur Bearbeitung eines Flugzeugflügels und ist in Bild 4 dargestellt. Es beinhaltet einen KUKA-Roboter KR500-2, der auf einer Schiene mit einem Lineardirektantrieb entlang des Bauteils verfahren werden kann. Das System ist mechanisch einfach überbestimmt.



Bild 4: Applikation zur Bearbeitung langer Flugzeugbauteile

Die Bahn wird grundsätzlich in klassischer Art und Weise als TCP-orientierte Werkzeugbahn in einem CAD-CAM-System geplant und programmiert. Die bislang verfügbare Ausgabe als NC-Teileprogramm beinhaltet die kartesische Position, die Orientierung des Werkzeugkopfes sowie eine Aufteilung der Bewegung auf die redundanten Achsen nach empirischen Algorithmen. Den schematischen Ablauf für einen Bearbeitungsvorgang (Hin- und Rückfahrt) zeigt Bild 5.

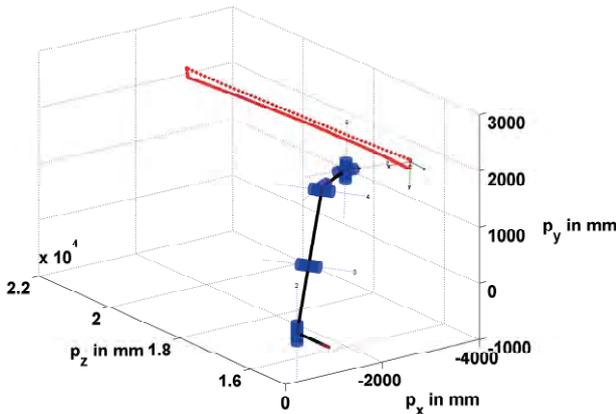


Bild 5: Vorgegebene Bahn für einen Bearbeitungsvorgang

Ziel war es, die Bewegung des Legekopfes nur mit der notwendigen Anzahl an Achsfreiheitsgraden zu beschreiben und die Redundanz automatisch aufzulösen. Außerdem soll der bei Verwendung der differentiellen Algorithmen gemachte Bahnfehler um Größenordnungen kleiner als die Positioniergenauigkeit des Roboters sein um den praktischen Einsatz zu rechtfertigen und einen präzisen Bearbeitungsvorgang zu garantieren.

Zur Bindung der redundanten Linearachse und zur Berechnung der inversen Kinematik kommt der Algorithmus in (9) zur Anwendung. Die Ermittlung der

Elemente in der Verstärkungsmatrix \mathbf{K} erfolgte zunächst empirisch, solange bis der Bahnfehler in der jeweiligen Bahnkoordinate am geringsten wurde. Diese Methode ist allerdings sehr zeitaufwendig und ungenau, was einen praktischen Einsatz ausschließt. Aus diesem Grund wurde zur Optimierung der Reglereinstellungen die Methode der SBO verwendet. Als Optimierungskriterium dient die Summe der Bahnfehler aller Bahnachsen. \mathbf{K} wird solange variiert, bis sich für das Kriterium ein Minimum ergibt. Die sowohl empirisch als auch mittels SBO gewonnenen Einstellungen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Parametrierung der Verstärkungsmatrix \mathbf{K}

	Empirisch	SBO
K_x	1,00	1,92
K_y	1,00	1,84
K_z	1,00	1,87
K_ϕ	-10,00	-11,09
K_ϑ	-2,00	-5,98
K_ψ	2,00	2,27

Bild 6 zeigt den zeitlichen Verlauf des Bahnfehlers für die drei Positionen e_x , e_y und e_z . Die geometrische Lösung der Steuerung wird, im Vergleich zu den mittels differentieller inverser Algorithmen gewonnenen Verläufen, als ideal null angenommen, da die Ungenauigkeit dort nur in der binären Abbildung einer Zahl (beispielsweise 16 Bit) zu suchen ist.

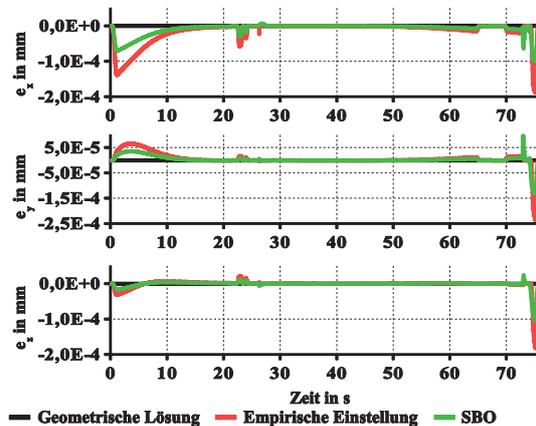


Bild 6: Zeitlicher Verlauf des Bahnfehlers - Position des Werkzeugkopfes

Vergleich man die beiden Verläufe der empirischen Einstellung und der SBO, so wird deutlich, dass die Extrema der SBO betragsmäßig nur halb so groß sind. Entscheidend ist jedoch die Tatsache, dass man die, der Verwendung differentieller Algorithmen geschuldeten Ungenauigkeit soweit reduzieren kann, dass eine praktische Verwendung möglich wird. Die maximal in der Bahnplanung gemachten Fehler liegen bei ca. 10^{-4} mm. Eine ähnliche Aussage kann für die drei Orientierungsrichtungen e_ϕ , e_ϑ und e_ψ getroffen werden (vgl. Bild 7).

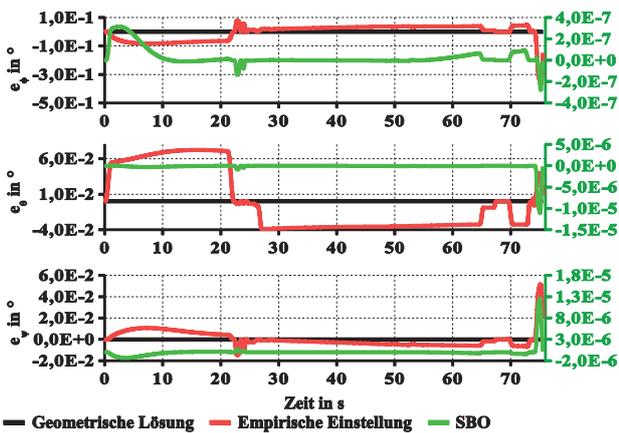


Bild 7: Zeitlicher Verlauf des Bahnfehlers - Orientierung des Werkzeugkopfes

Hier wird das Potential der SBO bisweilen sogar noch deutlicher. Mit den empirischen Einstellungen liegt der Bahnfehler in Größenordnungen von einem Zehntel Grad, was praktisch in der Positioniergenauigkeit eines Industrieroboters liegt.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich mit auftretenden Problemen für die Bahnplanung redundanter Robotersysteme. Es wird ein differentieller Algorithmus, auf Basis der Pseudoinversen Jacobi-Matrix vorgestellt. Problematisch ist hierbei die Parametrierung einer Verstärkungsmatrix \mathbf{K} , um den in der Bahnplanung gemachten Fehler, in die Berechnung der inversen Kinematik einfließen zu lassen. Die Verwendung eines metaheuristischen Optimierungsverfahrens erlaubt es dieses komplexe Problem zu lösen.

In der beschriebenen Applikation wird deutlich, dass es möglich ist den Fehler derart zu minimieren, dass die differentielle inverse Kinematik zur Berechnung auf einer industriellen Steuerung genutzt werden kann.

In zukünftigen Arbeiten soll aus den bisherigen Erkenntnissen eine Methodik zum Ableiten einer Einstellvorschrift für die Matrix \mathbf{K} entwickelt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] L. Sciavicco, B. Siciliano: Modelling and Control of Robot Manipulators. London: Springer-Verlag 2005.
- [2] KSL Keilmann Sondermaschinenbau GmbH: KL 500/502/504 Robot Unit – Datasheet, URL: http://www.ksl-lorsch.de/fileadmin/user_upload/Produkte/Linearachse_3D-Roboter-Naehanlage_KL502/Datasheet_KL_500_502_504.pdf, zugegriffen am 10.09.2015.
- [3] K. Hipp, M. Walther, H. Schlegel: Optimale Bahnplanung für Robotersysteme mit Achsredundanzen – Ein Überblick. 17. VDI-Getriebetagung, Bewegungstechnik, VDI-Berichte 2237, Nürtingen, 2014.

- [4] M. Walther, C. Hamm, K. Hipp, R. Neugebauer, S. Tauchmann: Optimale Ausnutzung von Achsredundanzen bei der Bahnplanung von Robotern. In: G. Frey, W. Schumacher, A. Verl (Hrsg.): SPS IPC Drives 2014, Tagungsband, Apprimus Verlag, Aachen, 2014.
- [5] E. H. Moore: On the reciprocal of the general algebraic matrix. In: Bulletin of the American Mathematical Society 26, S. 394–395, 1920.
- [6] Roger Penrose: A generalized inverse for matrices. In: Proceedings of the Cambridge Philosophical Society 51, S. 406–413, 1955
- [7] P. Chiacchio, S. Chiaverini, L. Sciavicco, B. Siciliano: Closed-loop inverse kinematics schemes for constrained redundant manipulators with task space augmentation and task priority strategy, Int. J. Robot. Res. 10 (4), 410–425 (1991).
- [8] C. Mohan, C., K. Deep: Optimization Techniques. Tunbridge Wells: New Age Science Limited 2009.
- [9] K. Hipp, A. Hellmich, H. Schlegel, W.-G. Drossel: Criteria for controller parameterization in the frequency domain by simulation based optimization. 14th Mechatronics Forum International Conference, Karlstad, Sweden, June 16-18, 2014.
- [10] K. Hipp, A. Hellmich, H. Schlegel, R. Neugebauer: Time domain criteria for controller parameterization by simulation based optimization. 11th International Conference High Speed Machining, Prag, 2014.
- [11] P. Köchel: Simulation Optimisation: Approaches, Examples, and Experiences. Chemnitz: Fakultät für Informatik, 2009.
- [12] M. Olbrich; B. Horst: Optimierung Leipzig: VEB Fachbuchverlag Leipzig, 1975.

SENSORAUSWAHL FÜR DIE ZUSTANDSSCHÄTZUNG EINES ELASTISCHEN ROBOTERARMES MIT EKF UND IMU

Juliane Hädrich, Holger Schlegel, André Sewohl, Reimund Neugebauer
Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau, Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse, Reichenhainer Straße 70, D-09126 Chemnitz

Im Rahmen dieses Beitrags wird an einem elastischen Roboterarm gezeigt, wie die notwendigen Zustandsgrößen zur Regelung der Position des Endeffektors mit einem erweiterten Kalman-Filter (EKF) geschätzt werden können. Basierend auf einem Armmodell unter Schwerkrafteinfluss werden verschiedene Sensorkonfigurationen verglichen. Dazu gehören Dehnungsmessstreifen, eine inertielle Messeinheit (IMU) und Laser mit zugehörigem PSD (position sensitive detector). Es werden ein Algorithmus zur Sensorauswahl beschrieben und die Ergebnisse an einem Demonstrator dargestellt. Der Abschluss dieser Arbeit gibt einen Ausblick auf die Regelung eines solchen Systems.

This paper shows how the Extended Kalman Filter (EKF) is used to estimate the necessary state variables to control an elastic robot arm. Based on an arm model under gravity, different sensor configurations are compared. This includes strain gauges, inertial measurement unit (IMU) and a laser with a position sensitive detector. A general algorithm is described for sensor selection and the results are shown on a demonstrator. The paper closes with an outlook on the control of such a system.

1. Einleitung

Elastische Roboter zeigen im Vergleich zu schweren Industrierobotern großes Potential und sind daher Teil aktueller Forschungstätigkeit. Sie können weniger steif konstruiert werden und weisen durch den geringeren Materialeinsatz einen Gewichtsvorteil auf; sie besitzen eine niedrigere Eigenfrequenz, welche mit den inhärenten Antrieben gedämpft werden kann und sie erreichen höhere Beschleunigungen bei gleicher Antriebsleistung. Vor allem bei einer möglichen Kollision wirken geringere Kollisionskräfte, woraus geringere Schäden an Umwelt und Mensch resultieren [1]. Die Herausforderung an elastischen Robotern sind die hohe Schwingneigung, die statische Verformung und die komplexe Regelung eines solchen Systems. Dafür sind schnelle und genaue Informationen über den aktuellen Zustand des Roboters notwendig, welche ein einzelner Sensor nicht erfassen kann.

Zustandsschätzer, sogenannte Beobachter, dienen der Fusionierung verschiedener Sensordaten und der Schätzung nur ungenau oder gar nicht messbarer Zustandsgrößen. Dabei bildet das Kalman-Filter die Grundlage zur Lösung der meisten Multi-Sensor-Datenfusions-Schätzprobleme [2]. Es ist ein Optimal-Filter, welches alle Zustandsgrößen mit der minimal möglichen Unsicherheit (Fehlervarianz) schätzt. Dafür muss das System- und Messrauschen bekannt, mittelwertfrei und gaußverteilt sein [2]. In diesem Zustandsschätzer ist es möglich, verschiedene Sensoren einzeln oder in Kombination zu berücksichtigen. Diese können sich unter anderem in Sensortyp, Genauigkeit, Beschaffungs- und Montagekosten unterscheiden. Nicht jeder Sensor erhöht die Informationsqualität des Systems. So liegt die Herausforderung darin, bereits im Vorfeld die optimale Sensorkonfiguration für die entsprechenden Randbedingungen zu ermitteln.

In diesem Beitrag wird ein Algorithmus zur Sensorauswahl in Abschnitt 4 vorgestellt. Zunächst wird in Abschnitt 2 die Modellierung des Systems erläutert. Der darauf folgende Abschnitt zeigt den Entwurf des Kalman-Filters. In Abschnitt 5 werden die experimentellen Ergebnisse dargestellt. Die beiden letzten Abschnitte geben einen Ausblick auf ein mögliches Regelungskonzept und fassen den Beitrag zusammen.

2. Modell des Roboterarms

Elastische Roboter werden in zwei Arten unterschieden: jene mit elastischen Gelenken [3-6] und jene mit elastischen Armen [7-9]. Für beide Arten wird meistens das Momentengleichgewicht an der Motorwelle oder auf dem Roboterarm als Basis für die Modellierung verwendet. So wie die erste Verwendung elastischer Roboterarme im Weltraum, berücksichtigen viele wissenschaftlichen Arbeiten [7, 8] die Erdanziehung nicht.

Im Gegensatz dazu wird in diesem Beitrag auf Basis früherer Arbeiten [9-11] die Bewegung in der vertikalen Ebene betrachtet, wodurch eine Berücksichtigung der Erdanziehung notwendig wird. Die Steuerung erfolgt durch eine industrielle Bewegungssteuerung (MC) mit Synchron-Standardantrieben und Harmonic-Drive-Getrieben. Aufgrund der hohen Übersetzung von 100:1, kann das System näherungsweise als rückwirkungsfreie Reihenschaltung von Antrieb und Arm betrachtet werden [9]. Bild 1 zeigt den Versuchstand und den Arbeitsraum mit Basiskoordinatensystem $[x_1 \ y_1 \ z_1]^T$ und das bezüglich des Roboterarms ortsfeste, um den Winkel q rotierte Koordinatensystem $[x_2 \ y_2 \ z_2]^T$. Die Erdanziehung wirkt in Richtung von y_1 . Die vertikale Durchbiegung an Position x wird mit w bezeichnet. Der aus einem Stück Aluminium gefräste Roboterarm hat eine Länge von 400 mm und besitzt eine Masse von 1 kg. Die Last am Endeffektor beträgt ebenfalls 1 kg.

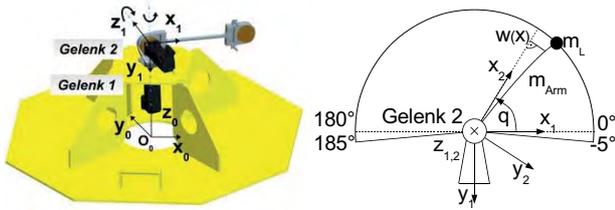


Bild 1: Links: Versuchsstand Roboter mit elastischem Arm; Rechts: Arbeitsraum mit Durchbiegung

Das Modell des elastischen Arms ist nichtlinear, weil die statischen und dynamischen Eigenschaften vom Arbeitspunkt abhängig sind. Unter Annahme kleiner Durchbiegungen und Berücksichtigung der lediglich ersten Eigenfrequenz kann der Roboterarm auf den Standardfall eines sich bewegenden Biegebalkens unter dem Einfluss der Erdanziehung, wie in [9] gezeigt, zurückgeführt werden. Die gesamte Durchbiegung ergibt sich aus Superposition der beiden Fälle: konstante Linienlast und masseloser Arm mit Last am Ende. Die Modellgleichung leitet sich aus dem Kräftegleichgewicht im Schwerpunkt des Armes ab. Die Dehnung μ ist abhängig von der Höhe des Querschnitts und der Krümmung der Biegelinie. An jeder beliebigen Position x des Biegebalkens ergibt sich ein konstantes Verhältnis zur Durchbiegung am Endeffektor. Anknüpfend an [11] ist die Übertragungsfunktion des Systems gegeben mit:

$$G_w(s) = \frac{w(s)}{F(s)} = \frac{K}{T^2 \cdot s^2 + 2 \cdot D \cdot T \cdot s + 1} \quad (1)$$

$$F = F_g + F_a = m \cdot g \cdot \cos(q) + m \cdot l \cdot \ddot{q} \quad (2)$$

Das System ist linear und entspricht einem Zweimassenschwinger mit der Kraft F als Eingangsgröße und der Durchbiegung w als Ausgangsgröße. K ist der statische Übertragungsfaktor, T die Zeitkonstante und D der Dämpfungsfaktor. Die Nichtlinearität liegt in der Eingangsgröße F , welche abhängig vom Armwinkel q und der Beschleunigung des Armwinkels \ddot{q} ist. Weitere Parameter sind die bewegte Masse m , die Erdbeschleunigung g und die Länge des Armes l . Im Gegensatz zum Ansatz aus [9, 11] kann unter Nutzung der Kraft anstatt der Beschleunigung des Armwinkels als Eingangsgröße nun auch die Systemanregung durch Änderung der Last abgebildet werden.

Es werden eine Reihe von verschiedenen Sensoren verwendet. Zwei Vollmessbrücken mit Dehnungsmessstreifen (DMS) sind entlang des Armes aufgebracht: einer in der Nähe des Antriebs (DMS₁) und einer in der Nähe des Endeffektors (DMS₂). Beide messen indirekt die gesamte Durchbiegung, wenn Sie mit den Übertragungsfaktoren (siehe Abschnitt 5) multipliziert werden. Weiterhin gibt es einen 3D-Beschleunigungs- (BS), einen 3D-Gyrosensor (Gyro) und einen PSD (position sensitive detector) am Endeffektor. Für den PSD ist es notwendig eine Laserdioden am Anfang des

Roboterarms zu befestigen. Der 3D-BS und der 3D-Gyro kommen in einer IMU (inertial measurement unit) vorwiegend zur Flugnavigation [12, 13] zum Einsatz. Erste Ansätze zur Berücksichtigung für Roboter und Werkzeugmaschinen werden in [14, 15] vorgestellt. Im Gegensatz dazu basiert der Ansatz dieses Beitrags auf dem Modell des Biegebalkens.

Aufgrund der Massenverteilung des Roboterarms kann dieser vereinfacht als masseloser Arm mit Last am Ende betrachtet werden (3). F ist die Kraft am Endeffektor, I der Flächenträgheitsmoment und E der Elastizitätsmodul. Gleichung (4) ergibt sich aus (3) und deren erste Ableitung nach der Position x . Dies führt über die Orientierung \pm (5) zur Winkelgeschwindigkeit $\dot{\alpha}_w$ (6) am Endeffektor, was dem Messwert des Gyros entspricht (Bild 2). Die Beschleunigung (7) ist die Summe aus Erd-, Zentrifugal- und Tangentialbeschleunigung sowie der Beschleunigung der Durchbiegung \ddot{z} . Dabei gibt r die Richtung des Roboterarms im Armkoordinatensystem an.

$$w(x) = \frac{F \cdot l^3}{6 \cdot E \cdot I} \cdot \left[3 \cdot \left(\frac{x}{l}\right)^2 - \left(\frac{x}{l}\right)^3 \right] \quad (3)$$

$$\left. \frac{dw(x)}{dx} \right|_{x=l} = \frac{3}{2} \cdot \frac{w(x=l)}{l} = \tan(\alpha_w) \quad (4)$$

$$\alpha(t) = q(t) - \arctan\left(\frac{3}{2} \cdot \frac{w(t)}{l}\right) \quad (5)$$

$$\omega_y(t) = d\alpha(t)/dt \quad (6)$$

$$\vec{a}(t) = \vec{g}(q(t)) + \vec{\dot{q}}(t) \times (\vec{q}(t) \times \vec{r}) + \vec{\ddot{q}}(t) \times \vec{r} + \vec{\ddot{w}}(t) \quad (7)$$

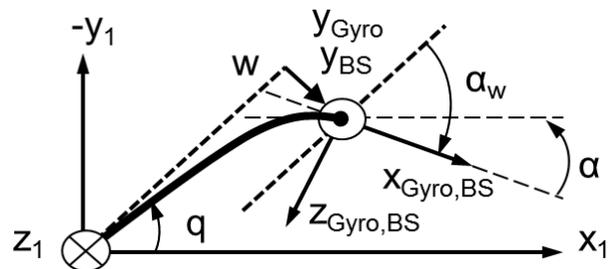


Bild 2: Orientierung des Beschleunigungs- und Gyrosensors am Endeffektor des Roboterarms

3. Erweitertes Kalman-Filter

Das Kalman-Filter ist ein spezieller Beobachter, welcher im Zustandsraum arbeitet. Für nichtlineare Systeme muss ein angepasster Algorithmus, wie das erweiterte Kalman-Filter (EKF) oder das Unscented Kalman-Filter (UKF) verwendet werden. Das EKF ist in der Praxis der bekannteste Algorithmus für nichtlineare Systeme. Es ist vergleichsweise einfach umzusetzen und führt für den Großteil der Anwendungen zu den besten Ergebnissen [2]. Gleichung (8) und (9) zeigen die Struktur des zeitdiskreten Systems. Der Algorithmus des EKFs ist rekursiv und sehr ähnlich zum linearen Kalman-Filter [11]. Hinzu kommt die Linearisierung der System- (F_{k-1}, L_{k-1}) und der Messgleichungen

(H_k, M_k) in jedem Durchlauf. Dabei ist k ein diskreter Zeitschritt, x enthält die Zustandsgrößen, u die Eingangsgrößen und y beinhaltet die Ausgangsgrößen. Die Rauschprozesse w und v sind weiß, mittelwertfrei, unabhängig und haben die bekannten Kovarianzmatrizen Q_k (Prozess) und R_k (Messung). P_k ist die Fehlerkovarianzmatrix der Schätzung und K_k ist die Kalman-Filter-Verstärkung. Weiterhin entspricht "-" der priori Schätzung "Timeupdate" und "+" der posteriori Schätzung "Measurementupdate" [2].

$$x_k = f_{k-1}(x_{k-1}, u_{k-1}, w_{k-1}) \quad (8)$$

$$y_k = h_k(x_k, v_k) \quad (9)$$

$$\hat{x}_0^+ = E(x_0) \quad P_0^+ = E[(x_0 - \hat{x}_0^+)(x_0 - \hat{x}_0^+)^T] \quad (10)$$

$$F_{k-1} = \left. \frac{\partial f_{k-1}}{\partial x} \right|_{x_{k-1}^+} \quad L_{k-1} = \left. \frac{\partial f_{k-1}}{\partial w} \right|_{x_{k-1}^+} \quad (11)$$

$$P_k^- = F_{k-1} P_{k-1}^+ F_{k-1}^T + L_{k-1} Q_{k-1} L_{k-1}^T \quad (12)$$

$$\hat{x}_k^- = f_{k-1}(\hat{x}_{k-1}^+, u_{k-1}, 0) \quad (13)$$

$$H_k = \left. \frac{\partial h_k}{\partial x} \right|_{x_k^-} \quad M_k = \left. \frac{\partial h_k}{\partial v} \right|_{x_k^-} \quad (14)$$

$$K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + M_k R_k M_k^T)^{-1} \quad (15)$$

$$\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + K_k [y_k - h_k(\hat{x}_k^-, 0)] \quad (16)$$

$$P_k^+ = (I - K_k H_k) P_k^- \quad (17)$$

Um das Systemmodell des Beobachters an die verwendeten Sensoren anzupassen, muss beachtet werden, dass die Ausgangsgleichung (8) unabhängig von den Eingangsgrößen ist. Es sollten möglichst wenige Zustandsgrößen verwendet werden, um den Rechenaufwand gering zu halten. Für das Modell (1-7) führt dies zu den zeitdiskreten Zustandsgleichungen (20-25) mit den Zustandsvariablen (19). Gleichung (18) ist das Ergebnis aus der Umformung von (1) in den Zustandsraum. A_d und B_d sind die zeitdiskreten (Z-transformierten) Matrizen des zeitkontinuierlichen Systems (18).

$$A_c = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{T^2} & \frac{2D}{T} \end{bmatrix} \quad B_c = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K}{T^2} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$x = [w_k, \dot{w}_k, \ddot{w}_k, \alpha_k, \omega_{y_k}, a_{x_k}, a_{z_k}]^T \quad (19)$$

$$F_k = m \cdot g \cdot \cos(q_k) + m \cdot l \cdot \dot{q}_k \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} w_k \\ \dot{w}_k \end{bmatrix} = A_d \cdot \begin{bmatrix} w_{k-1} \\ \dot{w}_{k-1} \end{bmatrix} + B_d \cdot F_k \quad (21)$$

$$\ddot{w}_k = \frac{\dot{w}_k - \dot{w}_{k-1}}{\Delta t} \quad (22)$$

$$\alpha_k = q_k - \arctan\left(\frac{3}{2} \cdot \frac{w_k}{l}\right) \quad (23)$$

$$\omega_{y_k} = \frac{\alpha_k - \alpha_{k-1}}{\Delta t} \quad (24)$$

$$\begin{bmatrix} a_{x_k} \\ 0 \\ a_{z_k} \end{bmatrix} = \vec{g}(q_k) + \vec{\dot{q}}_k \times (\vec{q}_k \times \vec{r}) + \vec{\ddot{q}}_k \times \vec{r} + \vec{\ddot{w}}_k \quad (25)$$

Für jede Ausgangsgröße y_k existiert eine Gleichung in Form von (9), die meist von nur einer Zustandsgröße abhängt. Unter Verwendung aller Sensoren (DMS₁, DMS₂, PSD, Gyro und BS) sind für das vorgestellte System sechs Ausgangsgrößen notwendig: $y_k = [w_k, \dot{w}_k, \ddot{w}_k, \omega_{y_k}, a_{x_k}, a_{z_k}]^T$

Es ist möglich jede beliebige Anzahl an Sensoren in einem Kalman-Filter zu fusionieren. Bei einem korrekten Systemmodell kann kein zusätzlicher Sensor die Genauigkeit der geschätzten Zustandsgrößen verschlechtern. Ist ein Sensor zu ungenau, wird er für die Schätzung nicht berücksichtigt. Mit statistischem Wissen über die Innovation r_k (26) kann überprüft werden, ob das System mit der Realität übereinstimmt. Die Innovation sollte ein weißes, mittelwertfreies Rauschen mit der Kovarianz von (27) sein. Wenn das Rauschen farbig, nicht mittelwertfrei oder eine falsche Kovarianz aufweist, arbeitet das Filter nicht korrekt. Die häufigste Ursache für solche Unterschiede ist ein Modellfehler [2]. Dies gilt näherungsweise auch für den EKF. Anschließend können die Matrizen F , H , Q und R manuell oder mit Hilfe statistischer Methoden angepasst werden.

$$r_k = y_k - H_k \hat{x}_k^- \quad (26)$$

$$E(r_k r_k^T) = H_k P_k^- H_k^T + R_k \quad (27)$$

4. Sensorauswahl

Wie in Abschnitt 3 dargelegt, führen zusätzliche Sensoren nicht zwangsläufig zu einer Verbesserung der Systemgenauigkeit. Nach [16, 17] wird zur Genauigkeitsbewertung des Kalman-Filters die Fehlerkovarianzmatrix P_k^+ (17) herangezogen. Üblicherweise konvergieren K_k und P_k^+ nach wenigen Iterationsschritten unabhängig von den Startwerten P_0^+ und \hat{x}_0^+ (10). Ist dies nicht der Fall kann im Gegensatz zu (28) über einen festgelegten Zeithorizont der Mittelwert für die Bewertung herangezogen werden. Um verschiedene Sensorkonfigurationen p miteinander zu vergleichen, kann der Leistungsindex (29) verwendet werden. Dabei wird von der Fehlervarianz der Zustandsgröße j der aktuell betrachteten Sensorkonfiguration $d_{p,a}^j$ die der bestmöglichen Sensorkonfiguration $d_{p,b}^j$ (alle Sensoren werden in der genauesten Ausführung verwendet) abgezogen. Dies wird für alle interessanten Zustandsgrößen des Satzes S wiederholt. Um Singularitäten zu vermeiden wird $d_0 = 1$ gesetzt. Damit entspricht der genaueste Beobachter dem Leistungsindex $d_p^S = 1$ und das ungenaueste Beobachter $d_p^S = 0$.

$$d_p^j = \lim_{k \rightarrow n} ([P_k^+]_j) \quad (28)$$

$$d_p^S = \left(d_0 + \sum_{j \in S} |d_{p,a}^j - d_{p,b}^j| \right)^{-1} \quad (29)$$

Für jede gemessene Zustandsgröße existiert meist eine Vielzahl an möglichen Sensoren, die sich in Genauigkeit, Beschaffungs- und Montagekosten unterscheiden. Mit dem Leistungsindex kann unter verschiedenen Randbedingungen, wie zum Beispiel maximale Kosten, minimale Genauigkeit oder bestes Verhältnis von Leistung zu Kosten, die optimale Sensorkonfiguration bestimmt werden. Dazu sind folgende Schritte notwendig:

1. Überprüfung auf Beobachtbarkeit und Berechnung der Kosten für die ausgewählte Sensorkonfiguration
2. Wenn beobachtbar, dann Schritt 3, wenn nicht, dann Schritt 4 und Leistungsindex = 0
3. Berechnung Leistungsindex nach (29)
4. Wiederholung Schritt 1 für alle Sensorkonfigurationen
5. Darstellung Leistung zu Kosten für alle Sensorkonfigurationen
6. Auswahl der Sensorkonfiguration nach gegebenen Randbedingungen

5. Experimentelle Ergebnisse

Die Kennwertermittlung des Systems und der Sensoren erfolgt nach [11] auf Basis von motorseitiger und externer Anregung. Ein Biegeversuch in einer Zug-Druck-Prüfmaschine dient zur Bestimmung der Übertragungsfaktoren zwischen Durchbiegung und Dehnung c_1 (DMS₁) und c_2 (DMS₂). Die statische Durchbiegung w_{smax} wurde in horizontaler Lage des Arms bestimmt. Nachfolgende Tabelle zeigt die Systemparameter und die gemessene Standardabweichung E der Eingangsgrößen.

Tabelle 1: Ermittelte Modellparameter

Parameter	Wert
f_E [Hz]	14,4 Hz
D	0,0043
T	11,1 ms
K	$6,2 \cdot 10^{-5} \text{ s}^2/\text{kg}$
w_{smax}	1,2 mm
c_1	4,1 mm/‰
c_2	19,6 mm/‰
$H(t)$	$8,2 \cdot 10^{-4} \text{ rad}$
$H(\dot{t})$	$1,7 \cdot 10^{-3} \text{ rad/s}$
$H(\ddot{t})$	0,2 rad/s ²

Für das gegebene System mit fünf Sensoren gibt es $2^5 = 32$ mögliche Sensorkonfigurationen. Je nach ausgewählten Sensoren ist eine Anpassung des Modells und der verwendeten Zustandsgrößen nötig. Für DMS₁, DMS₂ oder PSD reichen die Zustandsgrößen w und \dot{z} aus. Für die Berücksichtigung des Gyros sind die beiden

Zustandsgrößen \ddot{z} und \ddot{E}_y notwendig und für den BS \ddot{z} , a_x und a_z . Damit ist das System in jeder beliebigen Sensorkonfiguration vollständig beobachtbar, sofern mindestens ein Sensor verwendet wird.

Tabelle 2 zeigt die experimentell ermittelte Standardabweichung jedes Sensors mit zugehörigen Kosten, welche sich aus Beschaffung und Montage zusammensetzen. Aus der Standardabweichung kann die Kovarianzmatrix R für (15) berechnet werden.

Tabelle 2: Verwendete Sensoren

Sensor	Standardabweichung	Kosten
DMS ₁	3,1 μm	300 €
DMS ₂	25 μm	300 €
PSD	27 μm	1200 €
Gyro Y	$1,4 \cdot 10^{-2} \text{ rad/s}$	200 €
BS X	361 mm/s ²	200 €
BS Z	332 mm/s ²	

Für das hier betrachtete System wird der Satz S auf die Zustandsgrößen w und \dot{z} festgelegt. Bild 3 zeigt die Leistung in Abhängigkeit der Kosten für jede Sensorkonfiguration. DMS₁ hat den größten Einfluss auf die Genauigkeit des Systems, während der Gyro nahezu keinen Einfluss hat.

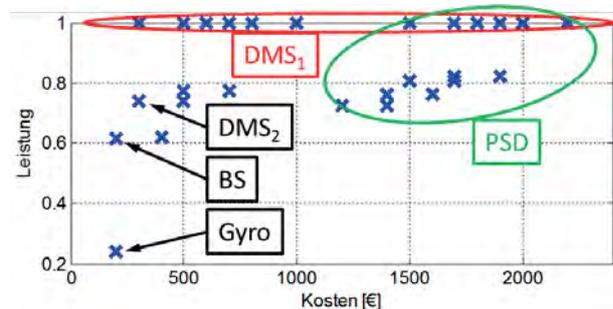


Bild 3: Leistung in Abhängigkeit der Kosten für alle möglichen Sensorkonfigurationen des Versuchsstands

Am Beispiel eines Abbremsvorgangs mit $350 \text{ }^\circ/\text{s}^2$ aus $90 \text{ }^\circ/\text{s}$ bei $t = 2,9 \text{ s}$ wird das Verhalten der Beobachter näher betrachtet. Bild 4 zeigt den zeitlichen Verlauf des Messwertes von DMS₁ „MW DMS1“ und die durch den jeweiligen Beobachter geschätzte Durchbiegung für die Einzelsensoren sowie für die alle Sensoren gleichzeitig „KF alle“. Der Beobachter „KF DMS1“, welcher nur DMS₁ verwendet verläuft dabei nahezu identisch mit „KF alle“. Da DMS₁ der genaueste Sensor ist (siehe Tabelle 2), soll er zum Vergleich der geschätzten Werte herangezogen werden. Zu erkennen ist, dass die Beobachter mit Gyro oder BS einen abweichenden Verlauf zeigen. Die Ursache dafür liegt in der Modellgenauigkeit und in der hohen Unsicherheit der Messwerte, sodass diese kaum berücksichtigt werden.

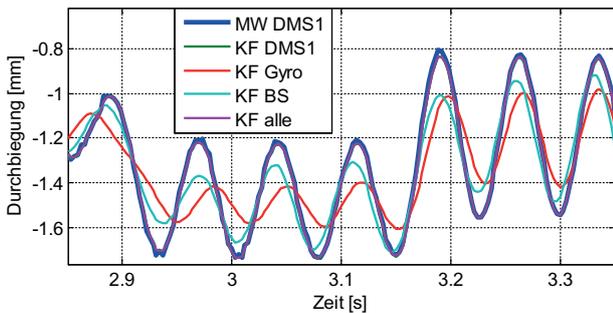


Bild 4: Durchbiegung aus DMS₁ und aus KF für verschiedene Sensorkonfigurationen

Dies bestätigt sich bei näherer Betrachtung der Innovation der Beobachter. Für jeweils einen Sensor (Bild 5) zeigen sich Abweichungen von dem zu erwartenden weißen, mittelwertfreien Rauschen. Besonders bei starker Anregung des Systems wie bei $t = 2,9$ s (Beginn Abbremsvorgang) und $t = 3,15$ s (Ende Abbremsvorgang) sind Unterschiede erkennbar.

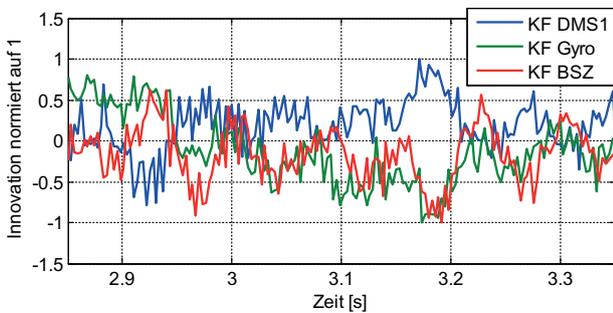


Bild 5: Auf eins normierte Innovation der Beobachter, welche jeweils nur einen Sensor berücksichtigen

Ein Vergleich der zu erwartenden (27) und der aus dem Signalverlauf der Innovation bestimmten Varianzen zeigt Tabelle 3. Die ermittelte Varianz aus dem Signalverlauf ist bei allen Beobachtern größer als der zu erwartende Wert, was ebenfalls für eine vorhandene Modellgenauigkeit spricht.

Tabelle 3: Vergleich Varianz der Innovation r_k

Variante	Gleichung (27)	Signal
KF DMS ₁	$1,6 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^2$	$3,1 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^2$
KF Gyro	$8 \cdot 10^{-2} (\text{rad/s})^2$	$18 (\text{rad/s})^2$
KF BS	$1,2 \cdot 10^5 (\text{mm/s}^2)^2$	$2,8 \cdot 10^5 (\text{mm/s}^2)^2$

Bei der Betrachtung der Durchbiegungsgeschwindigkeit, zeigt sich die besonders gute Eignung des Beobachters für die Schätzung höherer Ableitungen des Systems. Zur Veranschaulichung wurde in Bild 6 die differentielle Ableitung der Durchbiegung von DMS₁ und DMS₂ gefiltert und ungefiltert dargestellt. Im Gegensatz dazu ist der geschätzte Wert weder verzögert noch verrauscht und bietet damit die Möglichkeit diesen direkt in höheren Regelstrukturen integrieren zu können.

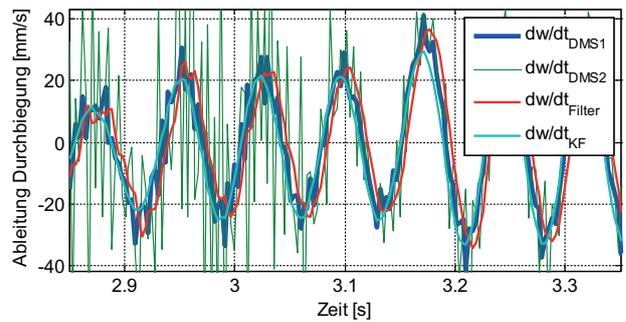


Bild 6: Darstellung gefilterte und ungefilterte zeitliche Ableitung der Durchbiegung sowie KF mit allen Sensoren

Der Algorithmus zur Sensorauswahl stellt für das gezeigte Beispiel einen Beobachter mit DMS₁ als beste Genauigkeit-Kosten-Variante heraus. Weit häufiger ergibt sich aber eine Kombination aus mehreren Sensoren, die in Abhängigkeit von konkreten Kostengrenzen entstehen. Hätte DMS₁ ein deutlich höheres Rauschen und gäbe es für alle Sensoren noch einen zehnmal genaueren Sensor zur Auswahl, würde sich Bild 7 ergeben. Dabei käme es nur zu einer leichten Erhöhung der Kosten, weil der Großteil von Montage und Kalibrierung abhängt. Es zeigt sich, dass nun auch DMS₂, PSD und BS eine sehr gute Leistung erzielen und eine Kombination der Sensoren sinnvoll wäre.

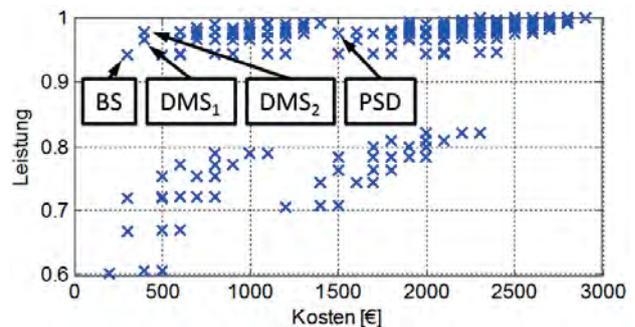


Bild 7: Leistung in Abhängigkeit der Kosten für eine erweiterte Auswahl an Sensoren

6. Ausblick auf Regelungskonzept

Der Leichtbauarm ist ein schwingungsfähiges System mit geringer Dämpfung. Die Gelenkregelung ist in Kaskadenform realisiert. Da bei Verwendung industrieller Standard-Antriebstechnik nur bedingt strukturelle Änderungen im Drehzahl- sowie Stromregelkreis möglich sind, ist eine effektive Dämpfung der Schwingungen des Endeffektors auf Ebene des Lageregelkreises zu favorisieren. Dies kann durch einen zusätzlichen D-Anteil zum üblichen P-Anteil gewährleistet werden [11]. Um ferner Auswirkungen einer sprungförmigen Änderung der Führungsgröße auf die Regelstrecke zu vermeiden, besteht die Notwendigkeit diese zu wichten bzw. zu filtern (set point weighting). Daraus entsteht für den Lageregler die Struktur eines PID-Reglers mit Sollwertwichtung. Um bleibende Regelabweichungen zu verhindern, wird der Regelfehler des Integralanteils nicht gewichtet. Die Reglereinstellungen werden mit dem Verfahren der Polvor-

gabe berechnet. Die Simulationsergebnisse für die Erweiterung des Lageregelkreises sind in Bild 8 dargestellt. Es wird deutlich, dass mit der diskutierten Reglerstruktur eine signifikante Dämpfung der Schwingung und damit ein präziser Positioniervorgang möglich ist [11].

Unter Nutzung des Beobachtermodells können sowohl die Beschleunigung, als auch die Geschwindigkeit des Endeffektors als Istgrößen in die kaskadierte Antriebsregelung einfließen. Gemäß [18] und dem dort dargestellten Prinzip des Advanced Position Control (APC) können im Antriebsstrang auftretende Schwingungen bereits in unterlagerten Regelkreisen gedämpft werden. In Hinblick auf die niedrigeren Abtastzeiten und die dynamischen Systeminformationen ist eine sehr schnelle und sichere Dämpfung zu erwarten.

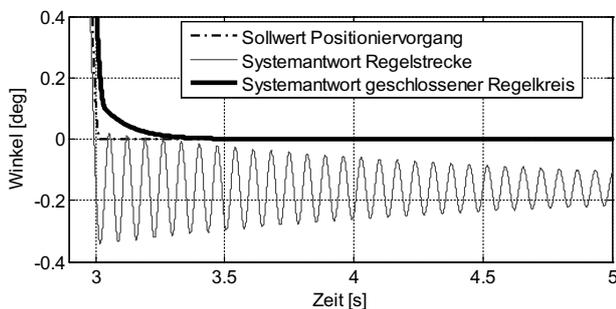


Bild 8: Systemantwort mit erweitertem Lageregler [11]

7. Zusammenfassung

Elastische Roboter haben großes Potential in Produktionstechnik und Servicerobotik. Die wesentliche Herausforderung ist eine genaue Positionierung des Endeffektors für solch ein schwingungsfähiges und schwach gedämpftes System. In diesem Beitrag wurde ein Modell betrachtet, dass auf dem Standardfall eines sich bewegenden Biegebalkens basiert. Es wurde eine Erweiterung präsentiert, die es ermöglicht zusätzliche Sensoren, wie beispielsweise Beschleunigungs- und Gyroskopsensoren, mit in die Zustandserfassung einzubeziehen. Außerdem wurde für die Sensorauswahl ein Algorithmus beschrieben, der es erlaubt einen Vergleich von Genauigkeit (Leistung) und Kosten für verschiedene Sensorkonfigurationen durchzuführen. Die Validierung des Algorithmus erfolgte an einem Demonstrator und die entsprechenden Ergebnisse wurden in Abschnitt 6 vorgestellt. Abschließend ist ein Ausblick auf die Regelung eines solchen Systems durch die Erweiterung des Lagereglers zu einem PID-Regler mit Sollwertfilter oder einer Erweiterung der unterlagerten Regelkreise durch APC gegeben worden. In zukünftigen Forschungs-tätigkeiten sollen beide Ansätze am Demonstrator erprobt und verglichen werden.

Literaturverzeichnis

[1] S. Haddadin, A. Albu-Schäffer, G. Hirzinger: Approaching Asimovs 1st Law: The Impact of

- the Robots Weight Class, Science and Systems Conference, Atlanta (USA), 2007.
- [2] Simon D.: Optimal Estimation-Kalman, H• and Nonlinear Approaches, John Wiley & Sons inc., Publication, 2006.
- [3] S. Gunnarsson, M. Norrlof, E. Rahic: Iterative learning control of a flexible robot arm using accelerometers, Control Applications, 2004.
- [4] K. Szabat, T. Orłowska-Kowalska, K. P. Dyrz: Extended Kalman filters in the control structure of two-mass drive system, Bulletin of the Polish Academy of Sciences, 2006.
- [5] A. De Luca, D. Schroder, M. Thummel: An Acceleration-based State Observer for Robot Manipulators with Elastic Joints, Robotics and Automation, 2007.
- [6] E. Naerum, H. et al.: Robustness of the Unscented Kalman filter for state and parameter estimation in an elastic transmission, Robotics: Science and Systems, 2009.
- [7] J. Wang: Modellbildung elastischer Roboter und Eigenwertanalyse, Forschungsbericht, Meß-, Steuer und Regelungstechnik, Universität Duisburg, 1998.
- [8] Y. F. Li, X. B. Chen: End-point sensing and state observation of a flexible-link robot, Mechatronics 2001.
- [9] J. Malzahn, A. S. Phung, et al.: Modellfreie Schwingungsdämpfung eines eingliedigen elastischen Roboterarms unter Gravitations-einfluss, Mechatronik Dresden 2011.
- [10] R. Neugebauer, M. Walther, J. Hädrich, H. Schlegel: Zustandserfassung flexibler Leichtbauarme durch Multisensor Daten Integration, Mechatronik Dresden 2011.
- [11] J. Hädrich, M. Walther, H. Schlegel, et al.: Sensordatenfusion zur Zustandserfassung nachgiebiger Leichtbauarme, 21st International Scientific Conference Mittweida, 2011.
- [12] R. Strasser: Untersuchung von Beobachter-verfahren für eine inertielle Messeinheit, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 8, 2005.
- [13] J. Wendel: Integrierte Navigationssysteme Sensordatenfusion, GPS und Inertielle Navigation, Oldenbourg Verlag, 2011.
- [14] T. Alban, H. Janocha: Dynamisches Vermessen von Robotern mit Inertialmesssystemen, Technisches Messen 67, Oldenbourg Verlag, 2000.
- [15] N. M. Tabatabaei: Zur inertialen Bahnvermessung für die Kalibrierung von Werkzeugmaschinen und Robotern, Kassel, 2008.
- [16] C. Benqlilou, M. J. Bagajewicz, A. Espuna, L. Puigjaner: Sensor-Placement for Dynamic Processes, European Symposium on Computer Aided Process Engineering 13, 2003.
- [17] E. Musulin, C. Benqlilou, M. J. Bagajewicz, L. Puigjaner: Instrumentation design based on optimal Kalman filtering, Journal of Process Control Volume 15, 2005.
- [18] Zirn O.: Machine Tool Analysis – Modelling, Simulation and Control of Machine Tool Manipulators, Zürich, 2008.

ALGORITHMEN ZUR EXPLIZITEN KRAFTREGELUNG FÜR EINEN LAGEGEREGELTEN ROBOTER

Alexander Winkler¹, Jozef Suchý²

¹Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, D-09648 Mittweida

²University of Matej Bel, Tajovského ul. 40, 974 01 Banská Bystrica, Slovakia

In diesem Beitrag werden Algorithmen zur positionsbasierten Kraftregelung von Industrierobotern untersucht und miteinander verglichen. Im Unterschied zu vielen seit Jahren publizierten Ansätzen zur Roboterkraftregelung, die an kommerziellen Robotersteuerungen nicht oder nur schwer implementiert werden können, da sie z. B. den Zugriff zu den Gelenkmomenten oder Motorenströmen voraussetzen, haben die hier betrachteten Konzepte eine möglichst einfache Struktur. Einer der vorgeschlagenen Algorithmen, der ein sehr gutes Regelverhalten zeigt, besteht aus einem einfachen Proportionalregler mit positiver Rückführung der aktuellen Endeffektorposition.

In this paper the algorithms of position-based force control for industrial robots are investigated and compared. A lot of approaches for robot force control published over many years cannot be implemented into commercial robot controllers as they may need access to the joint torques or motor currents. The approaches presented in this paper are as simple as possible. One of them is the simple proportional controller with positive feedback of the current end-effector position. This algorithm shows very good control behavior.

1. Einleitung

Auf dem Gebiet der Kraft-/ Momentregelung von Robotern finden seit mehreren Jahrzehnten umfangreiche Forschungsaktivitäten statt. Einen Überblick über die unterschiedlichen Regelungskonzepte findet man u. A. in [1-3]. Im Gegensatz dazu arbeiten die meisten eingesetzten Industrieroboter heute noch rein positionsgeregelt. Als ein Grund dafür kann die unzureichende Möglichkeit angesehen werden, Kraftregelalgorithmen in vorhandene Robotersteuerungen zu implementieren. So setzen viele der erwähnten Publikationen den Zugang zu den Sollwerten der Gelenkmomente voraus [4]. Dieser ist jedoch bei den meisten kommerziellen Robotersteuerungen nicht vorhanden. In einer Reihe von Ansätzen wird außerdem das komplette dynamische Modell des Roboters benutzt, um die Regelstrecke in Form eines verkoppelten, nichtlinearen Mehrgrößensystems zu entkoppeln und zu linearisieren [5].

Häufig bietet die Robotersteuerung jedoch nur den Zugriff zu den kartesischen Positions- und Orientierungssollwerten des Endeffektors (Vektor X_S) oder zu den Sollwerten der Gelenkkordinaten (Vektor q_S) an, die dann über die dezentrale Gelenkregelung, häufig in Form einer Kaskadenregelung, umgesetzt werden. Bei der Bewegungsvorgabe im kartesischen Raum muss zusätzlich noch die inverse Kinematik des Roboters einbezogen werden. Das Signalflussbild eines solchen Systems, das im weiteren Verlauf für Experimente verwendet wird, zeigt die Abb. 1. Der Zugriff zu den Lageregelkreisen erfolgt hier mit dem Robot Sensor Interface (RSI) [6], durch Aufschalten von Positionskorrekturen im Vektor ΔX_S .

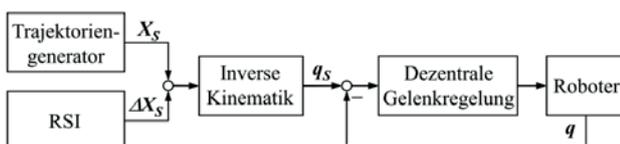


Bild 1: Zugriff zu den Lageregelkreisen mittels RSI

Aufgrund der genannten Einschränkungen beschäftigen wir uns im weiteren Verlauf ausschließlich mit der sog. positionsbasierten Kraftregelung, bei der der Kraftregler als Stellgröße die schon erwähnte Positionskorrektur liefert. Somit wird also der Kraftregelkreis über die Positionsregelung geschlossen.

Des Weiteren sollen die untersuchten Reglerstrukturen möglichst einfach sein, um sie auch in kommerzielle Steuerungssysteme implementieren zu können. Darum werden in diesem Betrag vor allem lineare Standardregler benutzt.

2. Versuchsaufbau

Der Aufbau des Versuchsstandes, an dem die ausgewählten Algorithmen experimentell untersucht werden, ist in der Abb. 2 zu sehen.



Bild 2: Versuchsstand zur Kraftregelung

Er besteht aus einem 6-Gelenk-Knickarmroboter vom Typ KUKA KR6/2 mit der Robotersteuerung KRC2. Für die Messung der Kontaktkraft kommt ein 6-Komponenten-Kraft-/ Momentsensor zu Einsatz. Wie schon erwähnt, ist es mit der KRC2-Steuerung und dem optionalen Robot Sensor Interface (RSI) möglich die Roboterbewegung auf der Ebene der Lage-sollwerte zu beeinflussen (siehe Abb. 1). Bei geringen Positionsänderungen kann das Verhalten des Roboters als Verzögerungsglied erster Ordnung mit Totzeit genähert werden [7]. Für einen einzelnen kartesischen Freiheitsgrad lautet die Übertragungs-

funktion des lagegeregelten Roboters wie folgt:

$$G_{Rob}(p) = \frac{X(p)}{\Delta X_s(p)} = \frac{1}{1 + pT_1} e^{-pT_T} \quad (1)$$

Die Zeitkonstante T_1 ist bei dem verwendeten System ca. 500 ms und die Totzeit T_T entspricht drei Interpolationstakten von je 12 ms.

Die Kontaktumgebung wird mit Hilfe einer sog. z-Achsen Nachgiebigkeit realisiert. Deren Steifigkeit k_U ist pneumatisch einstellbar. Bei den weiteren Betrachtungen ist $k_U=82$ N/mm. Die Anteile von Masse und Dämpfung der mechanischen Impedanz der Kontaktumgebung werden, aufgrund der geringen Geschwindigkeit des Roboters, vernachlässigt.

Bei den Versuchen wird zwischen zwei Szenarien unterschieden: Zum einen soll der Kontakt zwischen Endeffektor und Umgebung möglichst schnell hergestellt werden. Der Roboter befindet sich dabei in einer definierten Entfernung zur Kontaktoberfläche. Im zweiten Szenario wird bei bestehendem Kontakt der Kraft Sollwert verändert. Es wird also das Führungsverhalten des geschlossenen Regelkreises untersucht.

3. Regler mit proportionalen Verhalten

3.1 P-Regler

Der einfachste Regler ist der P-Regler mit folgender Reglerübertragungsfunktion:

$$G_R(p) = \frac{\Delta X_s(p)}{\Delta F(p)} = \frac{\Delta X_s(p)}{F_s(p) - F(p)} = k_p, \quad (2)$$

wobei F_s , F und ΔF Soll-, Istkraft bzw. Regelabweichung sind. Die Proportionalverstärkung k_p wurde für die Experimente mit 0.01 mm/N gewählt. Die Abb. 3 zeigt die Sprungantworten für unterschiedliche Änderungen des Kraft Sollwertes bei bestehendem Kontakt zwischen Endeffektor und Umgebung.

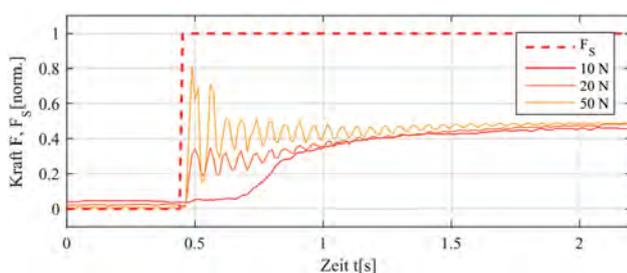


Bild 3: Sprungantworten bei Verwendung des P-Reglers

Daraus geht hervor, dass strukturbedingt eine relative hohe bleibende Regelabweichung auftritt, die folgendermaßen berechnet werden kann:

$$\Delta F(t \rightarrow \infty) = \frac{1}{1 + k_p k_U} F_s \quad (3)$$

Des Weiteren wird die Abhängigkeit des Regelverhaltens von der Höhe des Sollwertsprunges ersichtliche. Bei einer großen Sollwertänderung wird das System, bestehen aus Roboter und Kontaktumgebung, relativ stark zum Schwingen angeregt. Aus

diesem Grunde ist es auch nicht möglich die Proportionalverstärkung weiter zu erhöhen, und so die bleibende Regelabweichung zu reduzieren. Der P-Regler kann nur bei vorhandenem Umgebungskontakt eingesetzt werden, da der Verfahrweg im freien Raum bezüglich des vorgegebenen Kraftsollwertes begrenzt ist, und somit eine Kontaktfindung nicht garantiert ist.

3.2 P-Regler mit Filter

Um bei der Verwendung des P-Reglers die Anregung des mechanischen Systems und die daraus resultierenden Schwingungen zu reduzieren, sollten plötzliche Änderungen des Sollwertes bzw. der Regelabweichung vermieden werden. Durch das Einfügen eines Filters in den Regelkreis kann dies realisiert werden. Passend zum Regler sollte der Filter wieder eine möglichst einfache Struktur aufweisen. Für Experimente wurden daher lineare Tiefpassfilter erster und zweiter Ordnung mit der Übertragungsfunktion $G_F(p)$ und der Filterzeitkonstante T_F benutzt:

$$G_F(p) = \frac{1}{1 + T_F p}, \quad G_F(p) = \frac{1}{(1 + T_F p)^2} \quad (4)$$

Wird der Filter in den Zweig der Regelabweichung integriert, ergibt sich die folgende Reglerübertragungsfunktion:

$$G_R(p) = \frac{\Delta X_s(p)}{\Delta F(p)} = G_F(p) k_p \quad (5)$$

In der Abb. 4 sind die Sprungantworten für verschiedene Kombinationen von Proportionalverstärkung, Filterzeitkonstante und Filterordnung, bei bereits bestehendem Umgebungskontakt dargestellt.

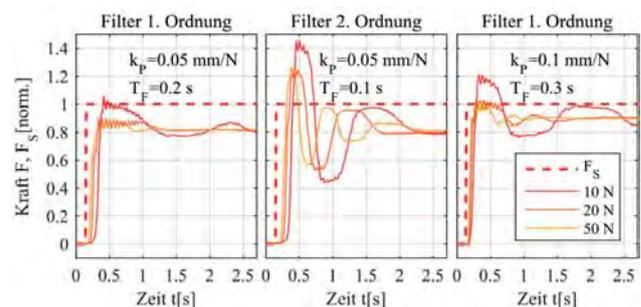


Bild 4: Sprungantworten des P-Reglers mit Filter

Daraus geht hervor, dass im Vergleich zum einfachen P-Regler die Reglerverstärkung signifikant erhöht werden kann, was zu einer reduzierten bleibenden Regelabweichung führt. Des Weiteren ist das Regelverhalten weniger von der Höhe der Sollwertänderung abhängig. Allerdings neigt der geschlossene Regelkreis bei höheren Filterzeitkonstanten zum Schwingen.

4. Regler mit integralem Verhalten

Befindet sich das Werkzeug des Roboters im freien Raum und soll das Herstellen des Kontaktes zwischen Roboter und Umgebung durch den Kraftregelkreis erfolgen, dann muss der Regler einen integrierenden Anteil enthalten.

4.1 I-Regler

Der I-Regler mit der Integrationskonstante k_I wird durch folgende Übertragungsfunktion beschrieben:

$$G_R(p) = \frac{\Delta X_S(p)}{\Delta F(p)} = \frac{k_I}{p} \quad (6)$$

Er kann für das Kontaktieren der Umgebung und bei bereits bestehendem Kontakt eingesetzt werden.

Betrachten wir zunächst die Phase des Herstellens des Kontaktes zwischen Endeffektor und Umgebung: Ein wichtiges Kriterium ist dabei der maximale erlaubte Wert der Kontaktkraft. Die maximale Kraft ist abhängig von der Umgebungssteifigkeit k_U , der Reglerverstärkung k_I und von der Reaktionszeit des Roboters um auf Messwertänderungen der Kontaktkraft reagieren zu können T_R . Möchte man z. B. gerade kein Überschwingen der Kraft beim ersten Kontakt, kann der Regler wie folgt parametrisiert werden:

$$k_I = (k_U T_R)^{-1} \quad (7)$$

In der Praxis lässt sich der Wert für T_R nur schwer ermitteln. Für das hier benutzte Beispielsystem wurden 4 Interpolationstakte angesetzt, was 48 ms entspricht. Bei einer Umgebungssteifigkeit von 82 N/mm ergibt sich daraus eine Integrationskonstante von $k_I=0.25$ mm/s/N.

Verwendet man diesen Wert bei bereits bestehendem Umgebungskontakt, dann tritt, wie aus der Abb. 5 hervorgeht, eine Dauerschwingung auf, die auf die begrenzte Auflösung des Positionsmesswertes zurück zu führen ist. Für den Kontaktfall sollte also eine geringere Integrationskonstante gewählt werden. Wie schon erwähnt, kann das Bewegungsverhalten des lagegeregelten Roboters als Verzögerungsglied erster Ordnung mit Totzeit angesetzt werden, siehe (1). Der Regelkreis hat dann näherungsweise PT2-Verhalten. Eine Möglichkeit den Regler zu parametrieren ist die Vorgabe der Dämpfung D_S des geschlossenen Kreises. In diesem Falle ergibt sich die Integrationskonstante wie folgt:

$$k_I = \frac{1}{4D_S^2 T_1 k_U} \quad (8)$$

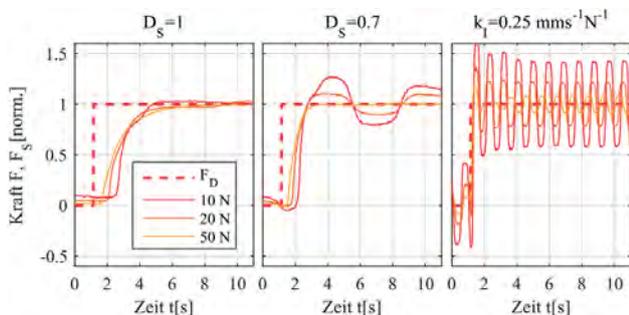


Bild 5: Sprungantworten des I-Reglers

In der Abb. 5 sind die Sprungantworten bei bestehendem Umgebungskontakt für den aperiodischen Grenzfall ($D_S=1$), für leichtes Überschwingen ($D_S=0.7$) und für den vorher für Kontaktfindung optimierten Regler ($k_I=0.25$ mm/s/N) dargestellt.

Mit sinkender Dämpfung bzw. steigender Reglerver-

stärkung wird die schon erwähnte Dauerschwingung sichtbar.

Für die eben verwendeten Reglereinstellungen zeigt die Abb. 6 den jeweiligen Verlauf der Kraft beim Herstellen des Kontaktes zwischen Roboter und Umgebung. Beim Start des Experimentes befindet sich der Endeffektor 10 mm von der Kontaktoberfläche entfernt. Der Sollwert der Kontaktkraft wird auf 50 N gesetzt.

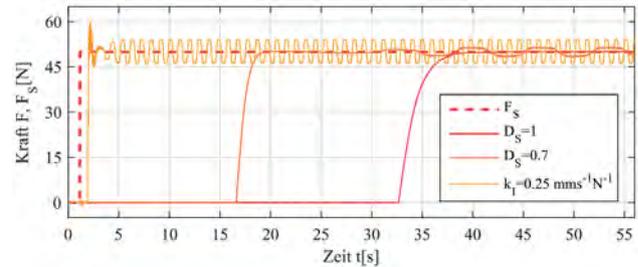


Bild 6: Kraftverläufe beim Herstellen des Kontaktes

Hier wird die Diskrepanz zwischen einer möglichst hohen Annäherungsgeschwindigkeit im freien Raum, die eine hohe Reglerverstärkung erforderlich macht, und einem guten Regelverhalten im Kontakt sichtbar. Aus diesem Grund scheint es sinnvoll zu sein, die Integrationskonstante situationsabhängig umzuschalten.

4.2 P-Regler mit positiver Positionsrückführung

Eine einfache aber sehr wirkungsvolle Reglerstruktur mit integralem Verhalten ist der P-Regler mit positiver Rückführung der aktuellen Endeffektorposition [8]. Die Stellgröße in Form der Sollposition X_S des Roboters setzt sich aus seiner Istposition X und der Regelabweichung ΔF zusammen:

$$X_S = k_p \Delta F + X \quad (9)$$

Das Signalflussbild des geschlossenen Regelkreises bestehend aus Regler, lageregeltem Roboter, Kontaktumgebung und Kraft-/ Momentsensor (KMS) ist in der Abb. 7 dargestellt.

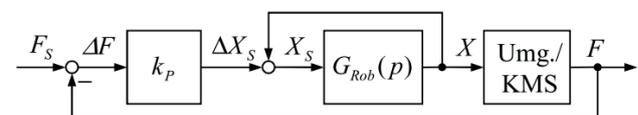


Bild 7: P-Regler mit positiver Positionsrückführung

Die Führungsübertragungsfunktion ergibt sich zu:

$$G_w(p) = \frac{F(p)}{F_s(p)} = \frac{k_p k_U G_{Rob}(p)}{1 + G_{Rob}(p)(k_p k_U - 1)} \quad (10)$$

Der Reglerparameter k_p kann zunächst wie folgt gewählt werden:

$$k_p = k_U^{-1} \quad (11)$$

Bei der verwendeten Kontaktumgebung bedeutet dies einen Wert von 0.012 mm/N. Um sprunghafte Änderungen des Lagesollwertes zu vermeiden, bietet sich wieder die Integration eines Tiefpassfilters $G_F(p)$ an. Eine Möglichkeit für dessen Platzierung

zeigt das Signalflussbild der Abb. 8.

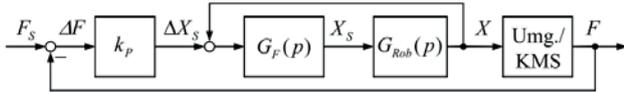


Bild 8: P-Regler mit Positionsrückführung und Filter

Damit ist es möglich die Reglerverstärkung zu erhöhen, um den Kontakt schneller herstellen zu können, ohne ein höheres Überschwingen der Kontaktkraft in Kauf nehmen zu müssen. Die Versuchsergebnisse für Kontaktfindung und Führungsverhalten zeigt für verschiedene Sollwerte die Abb. 9.

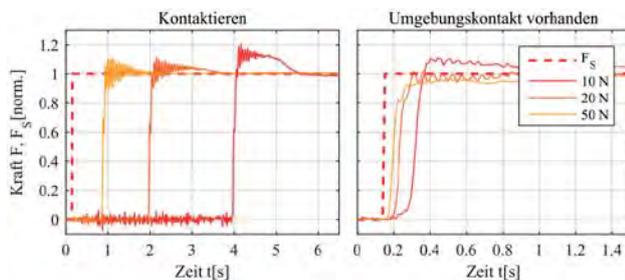


Bild 9: Verhalten des P-Reglers mit Positionsrückführung

Dabei wird ein Tiefpassfilter erster Ordnung mit einer Zeitkonstante von 100 ms verwendet. Die Reglerverstärkung beträgt 0.04 mm/N. Im Vergleich zu den vorher untersuchten Regelalgorithmen ist die Abhängigkeit des Regelverhaltens vom Kraft Sollwert wesentlich geringer.

5. Vergleich der Regelalgorithmen

Zunächst sollen die Regler bezüglich ihres Führungsverhaltens bei bestehendem Umgebungskontakt miteinander verglichen werden. Dafür kommen sowohl die Regler mit proportionalen als auch die mit integrierendem Verhalten in Frage. Die Abb. 10 zeigt die Sprungantworten des P-Reglers ($k_p=0.01$ mm/N), des P-Reglers ($k_p=0.1$ mm/N) mit dem Tiefpassfilter erster Ordnung ($T_f=0.3$ s), zweier I-Regler ($D_s=1$ und $k_f=0.25$ mm/s/N) und des P-Reglers mit positiver Positionsrückführung und Filter.

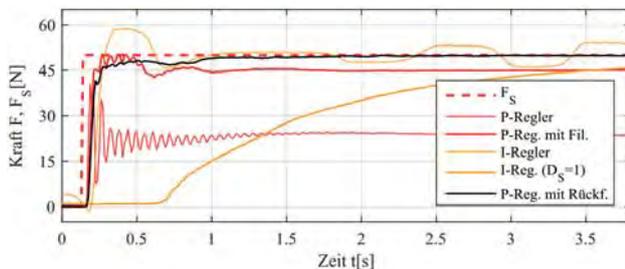


Bild 10: Vergleich des Führungsverhaltens

Wie zu erkennen ist, liefert der P-Regler mit Rückführung der Endeffektorposition das beste Ergebnis. Bei beiden Reglern mit proportionalen Verhalten tritt eine stationäre Regelabweichung auf. Der auf Führungsverhalten optimierte I-Regler ist recht langsam und der schnellere, auf Kontaktfindung optimierte I-Regler, führt zur Dauerschwingung der Kontaktkraft.

Ein Vergleich des Kontaktierungsvorganges macht nur zwischen dem I-Regler mit $k_f=0.25$ mm/s/N und dem P-Regler mit Positionsrückführung sind. Die beiden Kraftverläufe sind in der Abb. 11 zu sehen.

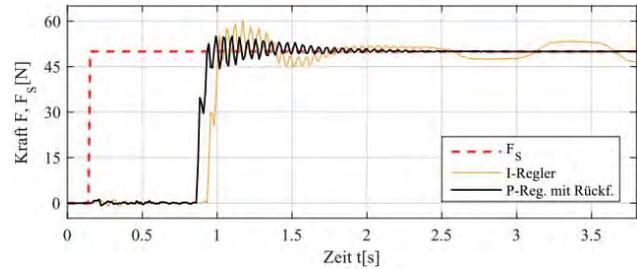


Bild 11: Vergleich Regelverhaltens beim Kontaktieren

Wieder liefert der letztere Regler das bessere Ergebnis, da der stabile Kontakt zwischen Endeffektor und Umgebung schneller realisiert wird.

6. Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wurden verschiedene Algorithmen zur eindimensionalen, positionsbasierten Kraftregelung, diskutiert und untersucht. Alle weisen eine sehr einfache Struktur auf. Diese erscheint notwendig, um die Regler auch in kommerzielle Steuerungen implementieren zu können. Im direkten Vergleich lieferte der Proportionalregler mit positiver Positionsrückführung die besten Ergebnisse.

Literaturverzeichnis

- [1] G. Zeng, A. Hemami, An Overview of Robot Force Control, Robotica, Vol. 15, Nr. (1997), 473-482.
- [2] D. E. Whitney, Historical Perspective and State of the Art in Robot Force Control, International Journal of Robotics Research, Vol. 6, Nr. 1 (1987), 3-14.
- [3] T. Yoshikawa, Force Control of Robot Manipulators, In Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (2000), 220-226.
- [4] O. Khatib, A Unified Approach for Motion and Force Control of Robot Manipulators: The Operational Space Formulation, IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-3, Nr. 1 (1987), 43-53.
- [5] T. A. Lasky, T. C. Hsia, Force Control of Robotic Manipulators, In Applied Control (1993), S. G. Tzafesta, Ed. Marcel Decker, Kap. 22, 639-661.
- [6] KUKA Roboter GmbH, KUKA Robot Sensor Interface (RSI) 2.1 (2007).
- [7] A. Winkler, J. Suchý, An Approach to Compliant Motion of an Industrial Manipulator, In Proc. of the 8th International IFAC Symposium on Robot Control (2006).
- [8] A. Winkler, J. Suchý, Position Feedback in Force Control of Industrial Manipulators – An Experimental Comparison with Basic Algorithms, In Proc. of IEEE International Symposium on Robotic and Sensors Environments (1012) 31-36.

POTENZIAL EINES NEUEN LASERWERKZEUGES FÜR DIE WEITERE FLEXIBILISIERUNG DER AUTOMOBILFERTIGUNG – ROBOTERGEFÜHRTE LASERSCHWEIßZANGEN OHNE ZUSÄTZLICHE LASERSCHUTZEINHAUSUNG

Frank Riedel, Gerd Töberling, Jens H. Lippmann
 Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU)
 Reichenhainer Straße 88, D-09126 Chemnitz

Das Laserstrahlschweißen ist heute eine Schlüsselfügetechnologie für viele Branchen, insbesondere für die Serienfertigung in der Automobilindustrie. Mit der Entwicklung von Laserschweißzangen kann die Flexibilität des Laserstrahlschweißens entscheidend verbessert werden. Damit sind Laserstrahlschweißprozesse genauso flexibel anwendbar, wie das weit verbreitete robotergeführte Widerstandspunktschweißen.

1. Einleitung

Ein wichtiger Trend im Karosseriebau der Automobilindustrie ist die weitere Flexibilisierung der Fertigung, unter den erschwerten Bedingungen des ständig steigenden Anteils an Multi-Material-Design-Lösungen. Das stellt insbesondere die Fügetechnologien vor steigende Anforderungen. Aktuell steht die ständig wachsende Anzahl verschiedener im Einsatz befindlicher Fügetechnologien einer Flexibilisierung der Fertigung im Automobilbau entgegen [1].

Im Automobilbau hat sich die Laserstrahltechnologie zu einer Schlüsseltechnologie für das Fügen im Automobilbau entwickelt. Das begründet sich auf die Vielzahl der Vorteile, wie z. B.:

- fast alle Stahl- und Aluminiumlegierungen sind schweißbar,
- minimaler Wärmeeintrag in die Bauteile,
- hohe Nahtgüten erzielbar,
- oft keine Verwendung von Zusatzwerkstoff und Schutzgas notwendig,
- höchste Fertigungsgeschwindigkeiten,
- Online-Qualitätssicherungssysteme sind verfügbar.

Als Beispiel sei hier die Türfertigung im Karosseriebau genannt, bei welcher mittels Laser-Remote-Schweißen Türkomponenten mit Hilfe einer Vielzahl von Steppnähten in wenigen Sekunden verschweißt werden. Das sind Fertigungstrends, die aus heutiger Sicht kaum noch zu steigern sind.

Restriktionen bei der Anwendung solcher Laserschweißtechnologien bestehen aber bezüglich der Lasersicherheit. So müssen die Bauteile in Laserschutzkabinen für das Verschweißen ein- und ausgeschleust werden. Das erhöht die Fertigungszeit in der Prozesskette und verringert die Flexibilität solcher Technologien.

Die Anwendungsmöglichkeit von Laserschweißzangen ermöglicht es, Laserschweißprozesse genauso flexibel einzusetzen, auch ohne zusätzliche Schutzeinhausung, wie beispielsweise robotergeführte Widerstandspunktschweißzangen.

2. Lasersicherheit

Laserstrahlen sind elektromagnetische Wellen von hoher Intensität, mit einem engen Frequenzbereich (monochromatisches Licht), einer scharfen Bündelung des Strahls und einer großen Kohärenzlänge. Damit ist es möglich, eine derart große Energiedichte in die zu bearbeitenden Werkstoffe einzukoppeln, dass zum Beispiel ein Verschweißen von metallischen Werkstoffen mit auch großer Blechdicke und hoher Schweißgeschwindigkeit möglich ist. Dementsprechend groß ist das Gefährdungspotenzial für den Menschen, durch die Schädigung bei der Einwirkung solcher Laserstrahlung. Dabei müssen indirekte Prozessemissionen (auch Reflexionen) oder mögliche direkte Einwirkungen durch z. B. Anlagenfehlfunktionen berücksichtigt werden. Entsprechend DIN EN 60825-1 sind Laserschutzklassen (LK) definiert, die verschiedene Leistungs- und Intensitätsgrenzen und dementsprechende Schutzmaßnahmen und –schutzeinrichtungen vorschreiben.

Tabelle 1: Laserschutzklassen LK nach DIN EN 60825-1

LK	Wellenlänge [nm]	Einwirkdauer [s]	Sicherheitsaspekt
1	alle	zw. 100 und 30.000	augensicher
1M	302,5 – 4.000	zw. 100 und 30.000	augensicher, wenn eine Verwendung optischer Instrumente ausgeschlossen ist
2	400 – 700	0,25	Lidschlussreflex
2M	400 – 700	0,25	Lidschlussreflex, jedoch unsicher wenn optische Instrumente verwendet werden
3R	302,5 – 10 ⁶	0,25 bzw. 100	Einhausung notwendig
3B	alle	100	Einhausung notwendig
4	alle	zw. 100 und 30.000	Einhausung notwendig

Fertigungsrelevante Laserstrahlanlagen für den Bereich der Blech verarbeitenden Industrie benötigen Laserstrahlquellen in einem Leistungsbereich, die in die höchste Laserschutzklasse (LK 4) einzuordnen sind. Das bedeutet, dass Laser(schweiß)prozesszellen so ausgeführt sind, dass der Laserbearbeitungsprozess völlig abgeschottet von der Umgebung stattfindet. Alle prozessrelevan-

ten Anlagen und Vorrichtungen befinden sich in einer solchen Laserzelle (s. Bild 1) und der Bearbeitungsprozess erfolgt i. d. R. automatisiert. Die Steuerung und Prozessüberwachung durch den Menschen muss von außerhalb der Laserbearbeitungszelle erfolgen.

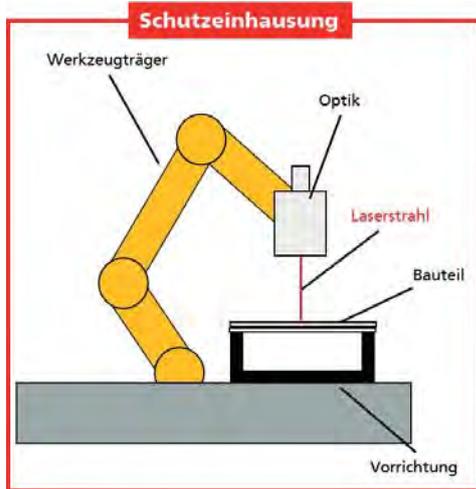


Bild 1: Laserschutzkonzept beim konventionellen Laserstrahlschweißen, schematisch

Trotz der genannten Vorteile schränkt sich dadurch aber auch die Flexibilität des Prozesses ein. Es werden fest installierte Vorrichtungen verwendet und die Bauteile müssen jeweils in eine solche Bearbeitungszelle ein- und ausgeschleust werden, wobei der Lasersicherheitskreis jeweils i. d. R. unterbrochen werden muss.

3. Prinzip Laserschweißzange

Ein traditionelles und etabliertes Fügeverfahren in der Automobilindustrie stellt das robotergeführte Widerstandspunktschweißen dar. Diese Schweißprozesse sind direkt in Montagelinien integriert und bieten aus Prozesssicht auch den Vorteil, dass durch das Zangenprinzip Toleranzen der zu verschweißenden Bleche beim eigentlichen Schweißprozess (durch das Zusammendrücken der zu verschweißenden Bleche) ausgeglichen werden können.

An dieses Prinzip hat sich die Entwicklung einer Laserschweißzange angelehnt. Auf einen zu verschweißenden Flansch werden mittels einer vergleichbaren Zangenkinematik hohle Druckstückprofile aufgesetzt und der Laserbearbeitungsprozess findet im Innenraum dieser Hohlprofile statt.

Der Laserbearbeitungsraum „einer Laserzelle“ reduziert sich damit auf den Innenraum der Druckstücke (Hohlprofile), siehe Bild 2. Es muss nun aus sicherheitstechnischer Sicht sichergestellt werden, dass der Laserstrahl diesen Bearbeitungsraum (oberes Druckstück - zu verschweißender Flansch - unteres Druckstück) nicht durchdringen kann, auch bei Anlagenfehlfunktion, und dass eine Freigabe des Lasers bei geöffneter Zange nicht erfolgen kann. Damit

ist eine Einstufung einer solchen Laserschweißzange in die Laserklasse 1 möglich. Ein solches Laserwerkzeug ist ohne zusätzliche Schutzhaube in einer Montagelinie betreibbar [2].

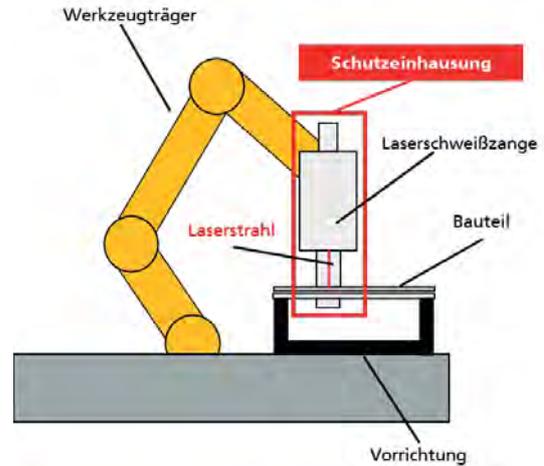


Bild 2: Laserschutzkonzept der Laserschweißzange, schematisch

4. Überblick über Laserschweißzangen

Aktuell sind 2 Laserschweißzangen verfügbar, siehe Tabelle 2. Eine etwas schlankere Bauform verwendet eine mechanisch bewegte Laserbearbeitungsoptik und eine neuere Entwicklung hat eine Scanneroptik integriert mit einem großen Freiheitsgrad der Laserstrahlführung und somit einem großen Potenzial für das Verschweißen von Materialien mit eingeschränkter Schweißbarkeit.

Tabelle 2: Laserschweißzangen, technische Daten [2, 3]

Bezeichnung	LaserSeamStepper 2	Rayflex Alpha
Ansicht		
Gewicht [kg]	45	68
Zangenkraft [N]	0,6 – 3.000	200 – 2.500
max. Öffnung	130 mm	145 mm
Prinzip	Optik mit Linearachse	Scanner PFO 33/2
Arbeitsbereich (l x b)	40 mm x 2 mm	51 mm x 12 mm
Leistung [W]	4.000	8.000
Schweißgeschwindigkeit	80 mm/s	22.000 mm/s
Nahtgeometrie	Strich, Wobbeln (2 – 25 Hz)	frei konfigurierbar

Beide Systeme werden i. d. R. robotergeführt und sind integrierbar in eine Serienfertigung. Das hauptsächliche Anwendungsgebiet ist das Verschweißen von Dünnschleifblechflanschen.

5. Schweißtechnische Aspekte

Mit einer Laserschweißzange können verschiedene Nahtformen in einem druckstückbedingten Arbeitsraum abgebildet werden. Üblicherweise beträgt der Bearbeitungsraum ca. 45 mm x 10 mm. Dabei bieten die verschiedenen möglichen Nahtformen ein großes Potenzial für das Festigkeitsverhalten der Bauteile, siehe Bild 3.

Linie	Kreis	C-Naht	Pendeln Linie
—	○	C	∩
			

Bild 3: Beispiele möglicher Nahtformen durch die Anwendung von Laserschweißzangen [3]

Verschweißbar sind 2- und 3-Blechverbindungen an Stahl- und Aluminiumwerkstoffen mit höchster Nahtqualität, siehe Bild 4.

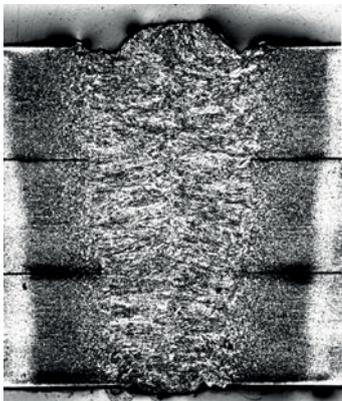


Bild 4: Beispiel einer geschweißten 3-Blech-Überlappverbindung mittels Laserschweißzange Rayflex Alpha, Nahtquerschliff (DP600+Z100, t = 1 mm)

Aktuelle Untersuchungen beschäftigen sich damit, die prozessbedingten Besonderheiten zu berücksichtigen und zu optimieren. Das bedeutet, dass in dem sehr eingegrenzten Bearbeitungsraum, innerhalb der Druckstücke, Besonderheiten bezüglich der Schweißnahtumgebungsatmosphäre zu berücksichtigen sind, wie z. B. die Zinkentgasung, beim Verschweißen von verzinkten Blechen oder die Schutzgasabdeckung beim Aluminiumschweißen. Dabei spielt letztlich auch die Verschmutzungsproblematik der Innenwände der Druckstücke für eine Serienanwendung und die damit verbundene Forderung nach Robustheit eine entscheidende Rolle.

6. Anwendungspotenzial und Ausblick

Aktuell gibt es eine erste Serienanwendung der Laserschweißzange für das Verschweißen von Karosserieflanschen aus Stahl. Die Laserschweißzangentechnologie hat damit den Weg in die industrielle Großserienanwendung vollzogen.

Das Potenzial dieser Technologie bietet viele vorteilhafte Anwendungsmöglichkeiten, insbesondere für die Anwendung des Laserschweißprozesses auch in einer flexiblen Fertigung ohne zusätzliche Laserschutzeinhausung.

Literaturverzeichnis

- [1] Riedel, F.; Marx, R.: New developments in joining technologies for hybrid metal constructions and hybrid metal fiber-composite construction. Automotive Circle International - Fügen im Karosseriebau 2012, Bad Nauheim 17.-19. April 2012
- [2] Siewert, A.; Krastel, K.: Fiber Laser Seam Stepper Replacing Resistance Spot-Welding. Laser Technik Journal 52 (2014) 4, S. 52-55
- [3] Bader, P.: Technical outline of the fusion of remote laser welding - and resistance pointwelding gun systems. Vortrag, Königsbrunn 2014

BRAUCHEN WIR NOCH (“REFA-”) METHODEN DER ZEIT- UND DATENERMITTLUNG IN DER WELT VARIABLER UND KUNDENWUNSCHORIENTIERTEN LEISTUNGSPROZESSE

Torsten Merkel

Westsächsische Hochschule Zwickau – Institut für Produktionstechnik,
Dr. Friedrichs-Ring 2a, D-08056 Zwickau

Die REFA-Methodenlehre für Zeit- und Daten-Ermittlung stellt eine sich seit 90 Jahren permanent weiterentwickelnde Sammlung aufeinander abgestimmter Instrumentarien der Betriebsorganisation, Arbeitsgestaltung und Unternehmensentwicklung dar. Der Beitrag stellt Fragen nach der Relevanz des REFA-Methodenwissens in der heutigen und künftigen Arbeitswelt.

The methodology of REFA is a collection of tools for the determination of time and data. For over 90 years, these methods of industrial engineering are applied. With the change in the working world, the question of the application in modern industry or industry 4.0.

1. Einleitung

Im Zeitalter selbstbestimmter und beteiligungsorientierter Arbeitsformen, dem Einsatz vernetzter Informationslösungen und einem Trend zum „Internet der Dinge“ fragt sich mancher betriebliche Entscheider, ob die Standard-Methoden der Zeit- und Datenermittlung (REFA-Methodenlehre) für die aktuelle Arbeitsgestaltung überhaupt noch eine Rolle spielen. So erscheinen die aufwendige Entwicklung und Pflege einer Datenbasis durch Zeitstudien, die Bildung von Planzeitkatalogen oder die Durchführung einer Verteilzeitermittlung für unsere variantenreichen Produkte und schnelllebigen betrieblichen Prozesse unzeitgemäß. Stattdessen erwartet man automatische Rückmeldungen der benötigten Ressourcen von Betriebsmittel und Mitarbeitern, welche sich bedarfsorientiert in den Datenbanken der Planer und Unternehmenslenker zusammenführen und auswerten lassen.

Mit der Entwicklung von Cyber-Physical-Systems als grundlegendes Element der Philosophie Industrie 4.0 erscheint es schlüssig, dass die automatisierten und sich teilweise selbst organisierenden technischen Systeme Taktgeber und auch Lieferant aller relevanten Planungsdaten sind.

Die Frage stellt sich aber anders, wie sollen moderne Informationssysteme sinnvoll arbeiten, wenn die strukturellen und damit verbunden ressourcenorientierten Änderungen ermittelt, beschrieben und optimiert werden. Häufig investieren Unternehmen in teure Softwarelösungen ohne sich über die bisherigen Strukturen und Abläufe im Klaren zu sein. Auslöser eines solchen Handelns ist häufig die Hoffnung, dass mit der Einführung eines solchen Softwaresystems hochkomplexe und nicht mehr überschaubare Prozesse wieder transparent und nachvollziehbar werden. Dies ist allerdings ein Irrglaube, da informationsverarbeitende Systeme schon dem Namen nach nur die Informationen verarbeiten können, die ihnen vorliegen. Damit dies bei einer lückenhaften Datenbasis funktioniert, werden Standardabläufe definiert, welche in vielen Fällen nicht mit den praktischen Abläufen harmonieren oder von

den handelnden Mitarbeitern nicht akzeptiert werden.

Ziel des Beitrages ist es deshalb auf die Chancen einer Anwendung der REFA-Methodenlehre als ein Baustein moderner Arbeits- und Betriebsgestaltung hinzuweisen.

2. Aktuelle Beispiele zur Anwendung der Methodenlehre für Zeit- und Datenermittlung

An einigen ausgewählten Schwerpunkten sollen im Weiteren Grundelemente der REFA-Methodenlehre für die Bewältigung aktueller Aufgabenstellung der Arbeits- und Betriebsgestaltung vorgestellt werden.

Ein mit den beiden Sozialpartnern abgestimmter Methodenansatz für erfolgreiche Unternehmen und humane Arbeit:

Die Akzeptanz eines von Arbeitgebern und Mitarbeitern anerkannten Methodeninstrumentariums ist ein wertvolles Gut, da für alle Seiten Planungssicherheit herrscht. Schnelle und einvernehmliche Lösungen bei der Bewertung von Arbeitsaufgaben und der Optimierung von Prozessen sind die Regel. Die Methoden sichern trotz Fokussierung auf die wirtschaftliche Effizienz eines Unternehmens menschengerechte Lösungen.

Sozialkompetenz des REFA-Organisators:

Die Akzeptanz eines von Arbeitgebern und Mitarbeitern anerkannten Methodeninstrumentariums ist ein wertvolles Gut, da für alle Seiten Planungssicherheit herrscht. Schnelle und einvernehmliche Lösungen bei der Bewertung von Arbeitsaufgaben und der Optimierung von Prozessen sind die Regel. Die Methoden sichern trotz Fokussierung auf die wirtschaftliche Effizienz eines Unternehmens menschengerechte Lösungen.

Arbeitssystem:

Mit der Definition von Arbeitssystemen lassen sich komplizierte Sachverhalte systematisch, vollständig und reproduzierbar aufbereiten. Mit den so gewonnen Daten steht ein Standardsystem zur Ableitung notwendiger Informationen bereit, welches die Grundlage für eine weiterfüh-

rende Informationsverarbeitung bietet.

REFA-Planungssystematik (6-Stufen-Methode):

Mit der REFA-Planungssystematik liegt ein auch rechtlich anerkanntes Modell zur Planung von Arbeitssystemen und –prozessen vor, welches eine umfassende Berücksichtigung relevanter Einflussfaktoren und Zielstellung sichert.

Methoden zur prozessorientierten Arbeitsorganisation:

Die Definition von Ablauf- und Zeitarten, Ablaufstrukturen und einheitliche Prozessdarstellungen bieten in Kombination mit einer systematischen Gliederung und Gestaltung von Arbeitsaufgaben die Grundlage für eine systematische Gestaltung und Optimierung der Arbeitsorganisation.

Arbeitssystemgestaltung – Ergonomie:

Teil der Methodenlehre ist die Berücksichtigung physischer und psychischer Leistungsvoraussetzung bei der Arbeitssystemgestaltung. Dieses Wissen erlaubt die systematische Berücksichtigung ergonomischer Gestaltungsanforderung.

Prozessdatenermittlung:

Arbeitsstudien und die damit verbunden statistischen Verfahren zur Datengewinnung sind das Rückgrat des REFA-Ansatzes. Durch die konsequente Umsetzung der Prozessdatenermittlung erhält der Anwender eine umfassende Grundlage zur Ermittlung von Durchlaufzeiten, Ressourcenbedarfe, Kosten und anderes. Mit der Modularität des methodischen Ansatzes lassen sich für Produktvarianten schnell und effektiv neue Datensätze ableiten. In Kombination mit der passenden Software sind exakte Planungs-, Steuerung und Kontrollfunktion umsetzbar. Die Datenermittlung darf dabei nicht losgelöst betrachtet sondern ist Teil des ganzheitlichen Ansatzes, welcher auch mit der Kostenkalkulation, der Arbeitszeit- und Entgeltgestaltung verknüpft ist.

Methodentraining:

Teil einer REFA-Ausbildung ist ein mehrtägiges Methodentraining welches eine Anwendung aller Methoden an einem praktischen Beispiel beinhaltet. Damit ist sichergestellt, dass die Teilnehmer nicht nur die Methoden kennen sondern auch deren Anforderungen und Zusammenspiel.

3. Ausblick

In der aktuellen Diskussion zum Schlagwort Industrie 4.0 bilden sich derzeit zwei gegensätzliche Prognosen ab. Eine Prognose geht von einer fast ausschließlich durch die Technik bestimmten Arbeitswelt aus. In dieser Welt treffen Menschen im Idealfall Grundsatzentscheidungen, im Regelfall verbleibt die Überbrückung von beständig abnehmenden Automatisierungslücken, wie das Bestücken, Programmieren, Einrichten und Reparieren beschränken.

Die andere Prognose geht lediglich von einer Verschiebung der Anforderungen zu wissensintensiveren Arbeitsfeldern aus.

In beiden Fällen spielen menschengerechte Lösungen,

das Vertrauen zu den einzuführenden Lösungen und eine sichere Planungsbasis eine wichtige Rolle. Hochkomplexe Systeme sind zudem durch eine entsprechende Sensibilität auf jede Art von Abweichungen geprägt, was die einem Ausschließen menschlicher Arbeit auch bei sehr futuristischen Ansätzen in Frage stellen dürfte. Zu den großen Vorteilen des REFA-Methoden-Ansatzes gehört, dass es sich nicht um eine rein mechanistisch geprägte Methodik handelt. Stattdessen stehen Sozialkompetenz, der Ausgleich zwischen den Sozialpartnern und die gemeinsame Entwicklung von Lösungen im Mittelpunkt. IEs ist deshalb auch in Zukunft nicht davon auszugehen, dass die alten Methoden ihre Bedeutung verlieren. Aktuell stellt sich sogar eine gewisse Renaissance des Industrial Engineering ein.

WORLD CLASS MANUFACTURING AND ONGOING IMPROVEMENT OF WORKPLACES

Dariusz Plinta, Monika Banach, Sławomir Kukla
University of Bielsko-Biala, Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biala, Poland

Market is demanding for competing organizations in present days. The heads of companies have to manage their workplaces on high level and with use of different methods and tools (Kaizen, 5S, SMED, Kanban, etc.), which belong to philosophy called World Class Manufacturing (WCM). This concept brings many profits, but it must be used in correct way and constantly to achieve ongoing improvement of workplaces. In this paper, there will be presented practical examples from automotive industry of application the mentioned above concept for improvements of workplaces.

1. Introduction

The target of the company is to earn money. This goal is necessary to exist on the market. Managers use modern tools to manage in correct way the company and have workplaces on the high level. [1, 3, 6]

One of the main philosophy which brings many profits is WCM (World Class Manufacturing). This philosophy is introduced in many enterprises to be competitive on present market.

2. WCM

World Class Manufacturing is a philosophy which contain many tools for better enterprise managing. There are 10 pillars which belong to WCM: Autonomous Maintenance (AM), Cost Deployment (CD), Focused Improvement (FI), Logistics – Customer Service (LCS), People Development (PD), Professional Maintenance (PM), Quality Control (QC), Safety (S), Workplace Organization (WO), Early Equipment Management (EEM). [4]

Each pillar has 7 individual steps. These steps have to be realized one by one. None of the steps can be missed or skipped.

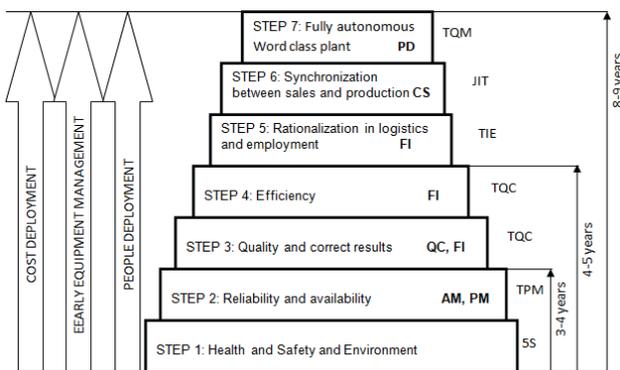


Fig. 1: Seven steps of World Class Manufacturing introduction

Achievement of world class level of management is not quick process. Introduction of WCM is realized in 7 steps (Fig. 1).

To improve production efficiency, it is necessary to introduce WCM. An approach focused on specific problem-solving activities, achieving quickly goals,

drastically reducing major production system losses eliminating process inefficiencies. [7]

The WCM is necessary to introduce, because:

- workplaces, materials and equipment are often damaged, dirty and untidy,
- product quality is achieved with too many controls and too much reworking,
- people's motivation can certainly be improved.

The purpose of the WCM is to improve production system efficiency and output by:

- restoring and maintaining basic conditions,
- eliminating non-value-added activities,
- involving people,
- improving knowledge of the products at the plants.

There are some tools which are used for each pillar – depends on problem it is necessary to use less or more complex tool. There can be used or implemented: Ishikawa diagram, 5S, Kaizen, 5W&1H (5 why and 1 how), Autonomous Maintenance Tag (AM Tag), ABC method, FMEA (Failure Mode and Effects Analysis), NVAA (Not Value Added Activity), OPL (One Point Lesson), PPA (eng.Processing Point Analysis), SMED (eng.Single Minute Exchange of Die), etc. [8]

Main activities of the WCM are:

- team building, training and preparation of the activity,
- elimination of everything not necessary, restore and cleaning,
- definition and application of maintenance cycles,
- analysis and elimination of non-value-added activities,
- improvement of work cycles and product quality by improving operator skills.

The expected results from introduced WCM are:

- elimination of losses of labor and materials,
- higher product quality obtained with a robust, error-proof process,

- improvement of productivity and suitable process costs,
- improvement of workplace ergonomics and safety,
- improvement of climate, motivation and pro-activeness.

3. WCM in practice

In this paper, there is described the worldwide class company in automotive market. There is production cars' safety system. It means that all products must be produced on the highest quality level, with the shortest production time and the lowest costs.

Analyzed system is dynamic developing company where many new projects are implemented. The company is introducing WCM steps one by one. It needs time to create standards and keep them on the high level. This concept is easier to introduce for new production line.

One of the projects is production start-up for a leading customer, where some of the WCM's tools are implemented.

The modified production line was staying 6 months in the analyzed company. At the beginning of this time, there was created file called OIL (Open Issues List) by launching team. Quality specialist, maintenance specialist, process engineer, logistic specialist, project manager, launch specialist and production leader belong to the launch team. Different people from different department give better look at the problem.

There are points regarding health and safety, machines, processes, quality, modifications, efficiency, layout, etc. The list contain 126 open points, which have to be solved before SOP (Start of Production).



Fig. 2: Component place – before 5S



Fig. 3: Component place – after 5S

After some modifications there were performed “run and rates”, which shows the level of line efficiency and possible problems.

At first, it was obligated to introduce 5S method (Fig. 2 and Fig.3). This method is perfect to see where we have problems with process, efficiency, ergonomics, etc. After cleaning and standards assignment, operators can start the production. There are a lot of problems during first production, which are written down.

The target was to manufacture 600 parts during 3 shifts (1 shift = 8 hours). The company's target of OEE (Overall Equipment Effectiveness [2]) is 86% . The OEE in the first day was 0,6% and grew up in next days till 16,3% (Fig.7 – red columns). This result was caused especially by 3 reasons: breakdowns, quality problems and operators work.

Due to really wrong results of this production, it was decided to create special team which will be working on activities to improve OEE. Te best idea is to use some of WCM's tools – in this case it was used Kaizen.

Kaizen is the methodology to improve process by small steps [5].

One of the biggest problem is that CT (eng. Cycle Time) is over predicted time. It is necessary to improve CT, because there will be problem meet deadlines with sending parts in time.

The team created following plan: daily run and rates to evaluate the situation, push and daily reckon up the supplier of modification.

The established CT is 39 seconds. The measured time (during run and rate) was 59-75 seconds for stations at the end of line. It was necessary to analyze this situation to reduce the cycle time. The critical time is on loop consisting of station 75, 80, 90 and 100. The team decided to change steps of operator work on each machine to check if it reduce the time. Unfortunately, despite many different combination of operator work, it did not meet the target of 39 seconds. The shortest time was 55 seconds. After another analysis, there was decision to modify two machines – station 90 and station 100.



Fig. 4: Workstation 100 – before modification



Fig. 5: Workstation 090 – before modification

The assembly of sealing component was moved from station 90 to station 100, because there were too many process on one machine. Machines after modification are shown at Fig. 6 and Fig. 7.



Fig. 6: Workstation 100 – after modification

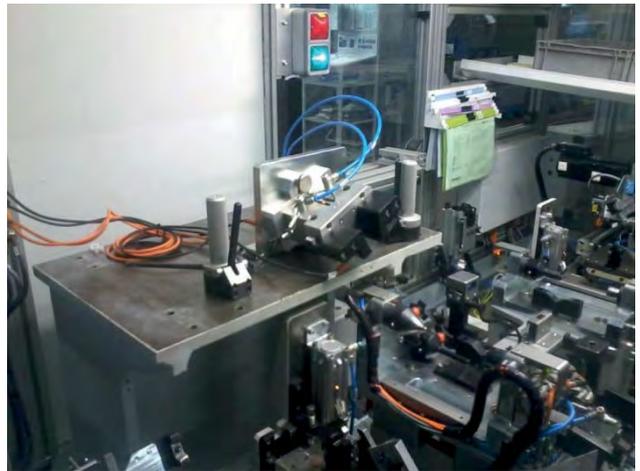


Fig. 7: Workstation 090 – after modification

The range of modification is huge. It was necessary to design new fixing for tools (completely different reference center), realization of mechanical connections, realization of electrical connections, modify PLC programs, change schems and diagrams. All these activities were done for two machines. The modification took 2 weeks. Before production, the specialist from health and safety department had to check machines if they are safety and accept modification.

After modification and new operator work standard procedure the CT is reduced to 42 seconds. Operators need more practice on these machines. Additionally, there was changed a little bit of layout on modified machines for easier and quicker work.

Another WCM's improvements, which was implemented on new production line, were connected with Kaizen. All points regarding to kaizen method were written down to the OIL.

4. Summary

Because of WCM the results of indicators are better. Some of WCM's tool brought quick result (Fig.8 and Fig.9).

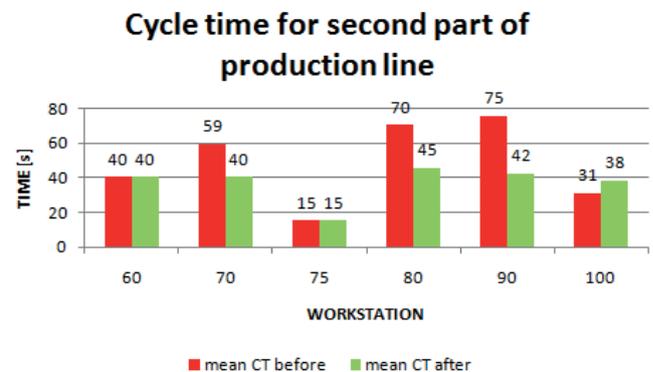


Fig. 8: OEE of new production line

By elimination of some points from OIL which not allow to meet the targets during SOP, the indicator OEE grew up. Yellow columns from Fig.7 shows this improvement. The OEE is about 40%. This result is not satisfied the team, because the target is 86%.

Additionally the CT is still too high, it should maximum 39 seconds.

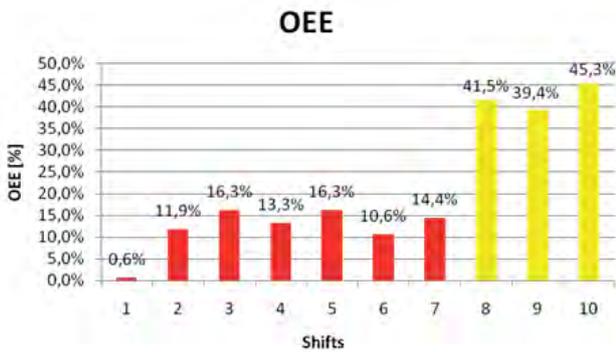


Fig. 9: OEE of new production line

OEE was on very low level during start-up production, but daily meeting and realization of activities complies with WCM standards. During 7 weeks, OEE was increased.

Additional task for the team is to create schedule for new project launches to eliminate the situation from SOP described above and start with minimum 70% of OEE.

All modern managing tools are necessary to be the competitive company. One of the rule during implementation of WCM is to get involved all workers – from head, managers, engineers to operators. It is easier to implement WCM for new production line, because from the beginning many assumptions are introduced.

WCM is very good tool to manage modern company. It brings many profits when it is introduced in correct way and everybody is getting involved.

Systematic activities and overview, correct implementation of tools (step by step), good analysis of the problems are basics for well-implemented WCM.

References

[1] J. Bicheno, M. Holweg, The Lean Toolbox. The essential guide to lean transformation, PICSIE Books, 2009.

[2] S. Borris, Total Productive Maintenance, The McGraw-Hill Companies, 2006.

[3] E.M. Goldratt, J. Cox, The goal: A Process of Ongoing Improvement, North River Pr Inc., 2000.

[4] J. Górska, World Class Manufacturing – Produkcja Klasy Zwiatowej. Pomiar Automatyka Robotyka PAR, 1/2008.

[5] M. Hamel, Kaizen Event Fieldbook: Foundation, Framework, and Standard Work for Effective Events, Society of Manufacturing Engineers, 2009.

[6] M. Imai, Gemba kaizen. A commonsense approach to a continuous improvement strategy. Kaizen Institute, 2012.

[7] R. Schonberger, World Class Manufacturing: The Lessons of Simplicity Applied, Fireside Books, 1986.

[8] R. Schonberger, World Class Manufacturing: The Next Decade: Building Power, Strength, and Value, The Free Press, 1996

THERMOFORMING PROCESS DEVELOPMENT

Matuszek Józef, Kinga Byrska-Bienias

Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, ul. Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biała

Abstract

The article presents the procedure for identifying the correct order to implement the considered options for the improvement of working conditions on a selected sample workstation. Presented were adopted criteria, introduced restrictions connected with the determination of different variants of solutions. There have been determining the area of Pareto optimal solutions using the Yager method. Suggestions for improvement can be expanded to include fuzzy logic solutions

1. Introduction

Improving production processes is carried out in businesses on many levels. The organization adopting targets for its business shapes, determine the criteria for assessing the effectiveness of its run. The two most important and most frequently adopted by the company goals are income and lack of accidents at work. Minimizing the risk of accidents happen on the workshops workplace are continuously evaluated and corrected. The more complex the analysis and the more rationalization proposals are implemented in the higher level of the wider culture technical crew. One of the elements of this culture growth is humanisation of work, including spending on health care and ergonomics improve.

Research methods may be complex - group and fragmentary. Possible directions and the ranges of the study are plenty. The selection of results always depends on the situation, needs and currently existing opportunities. Currently, there are both classic versions of the assessment sheets and checklists as their modified forms. Dortmund List was developed at the request of the First Congress Ergonomics and presented at the Second Congress in Dortmund in September 1964. By a team led by GC Burger. Ergonomic Analysis System Checklist, in short ESAC contains 323 questions and covers the issues of mental and physical load in the workplace, physical stress, psychological and environmental issues related to working methods, organization of work, functional and total load capacity of the system. On the basis of this list, a list of check-Ergonomics Test II - CET II. The checklist CET - II opens the 11 questions of a general nature. After it there is 350 questions divided into four categories: A, B, C, D, depending on the level of detail [4]

The use of such extensive lists in production practice is very difficult, which is why companies decide to shorten their checklists, focus on selected criteria or create their own tools for evaluating jobs. Examples of selected checklists along with the dates of their development are: Ergonomic Assessment Worksheet - EAWS, Ergonomic Job Analysis Technique, developed in 1983 by Romert and Landau method JDS - Job Diagnostic Survey - Hackman JR Oldman GR, 1980 - applies a

subjective perception of work for the working person, the Work Ability Index - Tuomi K. et al. - 1994, checklists Karaffa-Korbutta - 1933, Hansen list - 1963 H. Kirschner and P. Krasucki - 1968, 1970, Oginski - 1968 J. Gierasimiuk - 1984 J. Lewandowski - 1995, a checklist developed at the request of the International Labour Organisation (ILO, 1996), Checklist for the post of computers Grabosz, Sikorski - 1999 Finnish Checklist Ergonomic Workplace Analysis Ed. Ahonen M., Launis M. and Kuorinka T.: Ergonomie Section Finnish Institute of Occupational Health - 1989, French Ergonomie en Production. Principales specifications. Version 2, Ed. Renoux J.: Renault Securite Conditions de Travail, the Renault Le Mans -1996 [4].

1. 1. Criteria for assessing the work environment

Operating conditions effect on people, resulting in a different perception by the staff workload. This may lead to a reduction in the efficiency of the senses, difficulty in matching, reasoning, clarity of thought, impaired memory and concentration, fatigue, decreased psychomotor performance, emotional changes - an increase in excitability, tension, depression, reluctance to act [1].

Conditions of work affect [1]:

- technical factors - types of work, size and shape of the objects of labor, technical efficiency and security positions and transport equipment,
- organizational factors - the ergonomics of product, organizational form, the method of implementation, work space, taking into account anthropometric data on the position between the positions, lations transport method and order delivery of parts, the correct calculation of working time standards, rhythm and pace of work, downtime - planned resulting from the technological process and the resulting work process,
- material environmental factors - climate, lighting, noise, vibration, air pollution,
- physical strain - muscle strain static and dynamic.
- psychological stress - monotony, the need for intensive thinking, making risky decisions, the

flow of information - a resource, access, their use,

- safety - use protection against violation of normal operating conditions, traumatic threat protection, guarding of machinery, equipment, tooling, when lifting and carrying objects.

To the overall ergonomic quality can consists of four subcriteria which are listed in Table 1.

Tab. 1: Criterion in total ergonomic evaluation

K1	The total assessment of ergonomic K1 (consisting of sub-criteria KE1, KE2, KE3, KE4)
K2	Manufacturing cycle
K3	The cost of implementing ergonomic solutions
K4	Time to implement the adopted ergonomic solution

2. Yager method in ergonomic optimisation

Ergonomic optimization of manufacturing processes can be carried out during the workstation design - this is the ergonomic design optimization. The second name is conceptual ergonomics. The aim of the paper is to present a sample algorithm optimization of multi-structure implemented manufacturing process (ergonomic correction design) for example thermophorming machine. The workstation of the plastic pipe installation of with the criteria of quality ergonomic duration of the production cycle which shall be made in the economic efficiency of the process, the cost of implementation of the selected solutions and restrictions within the fastest possible implementation of planned solutions.

In the article is presented example of multi-criteria optimization. Proposal changes are in the parameters of the processes structure and body movement profile. Example include two stages [2]:

- the appointment of a set of optimal solutions Pareto,
- proceedings in order to choose the best solution.

The task is to find such an option from the set of variants of the process that best meets all the criteria adopted. Each criterion assigned weights, which are the coordinates of the eigenvector corresponding to the maximum of their own vector. These coordinates must also satisfy the condition that their sum is equal to the number of adopted criteria to evaluate options. Then the decision takes the following form according to the formula 1 [2]:

$$D = K_1^{w1} \cap K_2^{w2} \cap K_3^{w3} \cap K_4^{w4}$$

where:

- K_1 - solutions criterion,
- w_1 - the weight of criterion.

The most preferred variant of this embodiment, which corresponds to the largest component of the optimum decision [2].

2.1. Options for improving the ergonomics in the analyzed workstation

The individual elements of the optimization problem of rationalizing the ergonomic position for thermoforming will include input data, which are: [2]

- number of variants of the manufacturing process.
- number of criteria,
- elements of the individual criteria validity matrix,
- array elements that are normed Rankings s-variant of t-criterion.

Introduced a ergonomic design variants catalog for thermoforming machine is open. It is represented by the statement given in Table 2.

Table 2. Summary of options for the improvement of ergonomic

RO3	enlarge workspace (currently is definitely too small), it can cause the risk of workers injury,
RT1	machine form height adjustable, also possibility to change form angle,
RZ1	during the day work in different machines with different levels of arduous work, not one machine all day, to extend the scope of work; limiting the monotony
RP2	air conditioner, stable work environment,
RO2	boxes for tubes, colorfully marked, adjustable angle, equipped with wheels and brake,
RM3	the best available work techniques and method training for exchange experience between operators,
RP7	easier insertion method putting tube into the channel,
RZ2	teamwork chacku chacku type, if it is possible to follow the product during start to the process end
RM4	reduce stress, cycle time alignment by equal enhancing the assembly operations,
RP3	frequent repair forms, smoothing form surface, easier tube insert during work process
RP4	forms should be stored close to the machines where are use, if it is possible that storage is required in special dedicated warehouses, needed is minimize form transport to machines,
RO1	variable floor height,
RT5	care of fixing 'ticks' that positioning the form to the machine frame, it is unacceptable that a form is moving during operation; Fixing ticks should be assigned to the machine easier to control if lost or to be destroyed
RP1	lower work rate, reduction workers energy expenditure,
RP5	silicon in the form of a gun, not spray tube,
RZ3	appropriate choice workers to the teams,
RM1	variables work method – one cycle from the

	right side, pushing the tube in the machine channel with the left hand; second cycle from the left side, pushing the tube with right hand, equal loading of the limbs during shift
RP8	insertion tube from top side,
RP9	silicone dispenser near employee hands. If this is possible fixed to hand or be a part of glove.
RO4	component placement on machine in accordance with the sequence of setting tubes to the machine, especially when during one cycle is produced several pipes types,
RT2	increase the space between the lower part of the machine actually there was lack of space for inserting a foot if worker want to stand closer to the machine,
RT3	reducing the volume of machine alarm status, actual volume is onerous,
RT4	machinery standardization, easier is to work on different types and dimensions machines if the work method does not need to be change
RT6	cycles performed counter, not only general for all machine forms, should be available the ability to save personal currently settings for each operator, actually it is counts manually how many cycles should settle on the form,
RT7	cycle counter available for operator located at the cycle start button control the state demanding production,
RT8	controls location standard on all machines of this type,
RŚ1	personal protection, manual gloves, waterproof, suitable glasses,
RŚ3	ergonomic, comfortable safety shoes,
RŚ4	adequate separation between worker and hot machine elements water tank, the insulation is more energetic efficiency, give less heat loss
RŚ5	thimble to protect the thumb, must be worn under waterresistant material but solution must give possibility to manual work,
RŚ6	prevent wristband,
RŚ8	body support available in the workplace, seat position during breaks.
RŚ7	in summer at high temperatures, an additional 5 minutes break per work shift,
RT10	process automation, changing in whole machine structure, conceptual ergonomics
RT9	reduce forms weight, material change to lighter
RT11	change the machine body shape to a more ergonomic and comfortable for workers,
RT12	change the most ergonomic problematic components of the machine,
RŚ2	transparent polycarbonate barriers in sensitive parts of the machine limiting the dispersion of steam,
RM2	reduce the spring friction of the in the form, selection of the appropriate chemical substance (currently used silicone spray),
RP6	preheating pipes with large diameters, then they are be more flexible and easier to put on the machine form,

After creating a set of priority decisions are the decisions of the mutually exclusive, which received higher the smallest component of the assessment. The set of constraints resulting from the economic, organizational and organizations related to the availability of proposed solutions, the availability of technical expertise required to apply the solution and security and health policy in the enterprise determined by O1, O2, O3, O4 assaying.

O1 - the solution can not cause prolongation of the production cycle,

O2 - adopted to implement the solutions must be implementable in less than 5 years

O3 - Total ergonomic comfort must improve by at least one point.

O4 - the maximum cost of implementing solutions may not exceed the cost of 10 units.

3. The scale adopted for the evaluation of the different options

Possible judgments adopted for each criterion are:

- time implementation of the adopted solution, marking 0 points means immediate possibility of a solution, 1 point - the time required to implement a solution 0 - 0.5 years; 2 points - the required time 0.5-1 years, 3 points - 1-2 years; 4 points - 2-5 years, 5 points - more than 5 years - criterion K2
- time production cycle, for which he was for a standard wire thermo-formed time equal to 2.5 minutes. Shortening cycle time is marked as number with a positive sign, elongation cycle assessment obtained with a negative sign - K3
- The cost of implementing a single solution, the estimated time is given as a result of the analysis and experience of the experts, is defined as the cost of holding all positions for thermoforming covered by perfecting an ergonomic, expressed in units of cost - K4.

Yager evaluation included 40 variants possible to improve the ergonomics (see Table 2) and four major criteria (see Table 1).

4. The validity of the criteria matrix

In example were engaged 5 experts. It was needed to made matrix formation as follows:

- each of the 5 experts created their own individual scoring matrix of the different options,
- the partial matrix obtained created a summary matrix validity of the criteria - Table 3.

Table 3. Cumulative matrix validity of the criteria

Criteria	K2	K2	K3	K4
K1	1	0,417	2,600	0,417
K2	2,400	1	3,600	4,000
K3	0,385	0,278	1	0,700

K4	2,400	0,250	1,429	1
----	-------	-------	-------	---

5. Calculations

The matrix validity criteria put to the eigenvector Y which satisfies the matrix equation (3):

$$B * Y = \lambda_{max} * Y \quad (3)$$

where:

B – cumulative matrix validity of the criteria

Y – eigenvector that the above equation is a matrix of column

λ_{max} – scalar indicating the maximum value of its own matrix B

$$\begin{matrix} 1 & 0,417 & 2,600 & 0,417 \\ 2,400 & 1 & 3,600 & 4,000 \\ 0,385 & 0,278 & 1 & 0,700 \\ 2,400 & 0,250 & 1,429 & 1 \end{matrix} -$$

$$\begin{matrix} \lambda_{max} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{max} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{max} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_{max} \end{matrix} =$$

$$\begin{matrix} 1 - \lambda_{max} & 0,417 & 2,600 & 0,417 \\ 2,400 & 1 - \lambda_{max} & 3,600 & 4,000 \\ 0,385 & 0,278 & 1 - \lambda_{max} & 0,700 \\ 2,400 & 0,250 & 1,429 & 1 - \lambda_{max} \end{matrix}$$

Eigenvector matrix we call each nonzero vector Y, which retains direction after multiplication by this matrix. Size is the intrinsic value λ of the matrix B vector corresponding to its own Y. Each eigenvector has a corresponding value of its own. Eigenvalues of the matrix are defined clearly $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$. The set of all eigenvalues of the matrix is called the spectrum of the matrix [3].

Search is the vector for which the above equation is satisfied for the largest possible number $\lambda = \lambda_{max}$. Seeking vector has the coordinates so far established criteria. These coordinates satisfy the condition that their sum was equal to the number of criteria adopted. The coordinates of the eigenvector are the weights for the adopted criteria and are referred to as w_1, w_2 . Weight is the validity of the corresponding criterion. Received eigenvectors:

$$v_1 \approx (-0,300671, -0,861873, -0,184943, -0,364098)$$

$$v_2 \approx (-0,288472+0,198118i, -0,799801+0,1i, -0,0998712+0,11227i, 0,135098-0,44387i)$$

$$v_3 \approx (-0,288472-0,198118i, -0,799801-0,1i, -0,0998712-0,11227i, 0,135098+0,44387i)$$

$$v_4 \approx (-0,0735629, -0,969473, 0,159648, 0,170946)$$

Established the eigenvectors:

$$\lambda_1 \approx 4,29955$$

$$\lambda_2 \approx -0,091759+1,12006i$$

$$\lambda_3 \approx -0,091759-1,12006i$$

$$\lambda_4 \approx -0,116036$$

Where: λ_{max} - is a scalar denoting the maximum value of its own B.

Possible eigenvectors modules are shown in Figure 1.

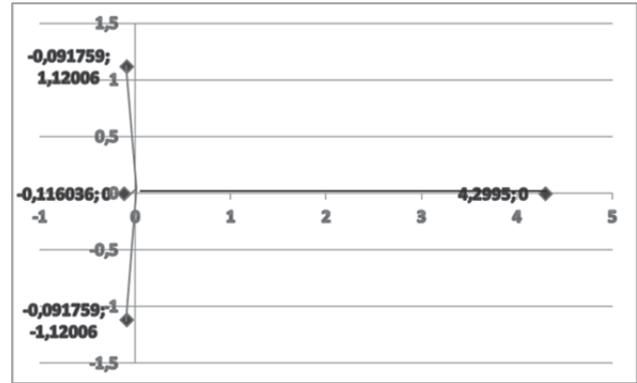


Fig. 1. eigenvectors modules

Value is determined by individual modules of complex numbers. The maximum value λ_{max} is 4.29955. Checked the condition of cohesion $\frac{\lambda_{max}-k}{k-1} < 0,1 = \frac{4,29955-4}{3} < 0,1$.

Because $0,09985 < 0,1$, a condition is met. In the Saaty method is shows the condition that satisfactory consistency provides sufficient adequacy of the method, in which there are eigenvalues and eigenvectors of the matrix B. [2], [3]

Creating a matrix where the values 1 was replaced by the value $1-\lambda_{max}$:

$$\begin{matrix} 1 - \lambda_{max} & 0,417 & 2,600 & 0,417 \\ 2,400 & 1 - \lambda_{max} & 3,600 & 4,000 \\ 0,385 & 0,278 & 1 - \lambda_{max} & 0,700 \\ 2,400 & 0,250 & 1,429 & 1 - \lambda_{max} \end{matrix}$$

Next received the results:

$$\begin{matrix} -3,29955 & 0,417 & 2,600 & 0,417 \\ 2,400 & -3,29955 & 3,600 & 4,000 \\ 0,385 & 0,278 & -3,29955 & 0,700 \\ 2,400 & 0,250 & 1,429 & -3,29955 \end{matrix}$$

The solution of equations with four unknowns:

$$\begin{cases} -3,29955y_1 + 0,416667y_2 + 2,60000y_3 + 0,416667y_4 = 0 \\ 2,40000y_1 - 3,29955y_2 + 3,60000y_3 + 4,00000y_4 = 0 \\ 0,38462y_1 + 0,27778y_2 - 3,29955y_3 + 0,70000y_4 = 0 \\ 2,40000y_1 + 0,25000y_2 + 1,42857y_3 - 3,29955y_4 = 0 \end{cases}$$

and the appointment in such a way that according to formula (4):

$$y_1 + y_2 + y_3 + y_4 = k = 4 \quad (4)$$

Calculated that:

$$\begin{aligned} 0,82660y_4 + 2,36899y_4 + 0,50910y_4 + 1y_4 &= 4 \\ 4,70469y_4 &= 4 \\ y_4 &= 0,85021 \end{aligned}$$

This value has been substituted into the equation and obtained the coordinates of weights criteria:

$$\begin{aligned} 0,82660 * 0,85021 + 2,36899 * 0,85021 + 0,50910 \\ * 0,85021 + 0,85021 * 0,85021 &= 4 \end{aligned}$$

Further values correspond to the weight criteria that are symbolized

$$w_1, w_2, w_3, w_4: \begin{cases} 0,70279 \text{ (for } w_1) \\ 2,01414 \text{ (for } w_2) \\ 0,43284 \text{ (for } w_3) \\ 0,85021 \text{ (for } w_4) \end{cases}$$

An array containing the base values for each criterion is normalized and creates an array $N = [n_{ij}]$ of standardized assessments and this variant of the j-criterion. The array elements is regulated by determining the i-th variant, according to the j-th criterion specified by the e-th expert, which determines the degree of membership and this option to set preferred by j-th criterion. The evaluations given by the expert are created as many sums as have been adopted criteria. Then immediately reduced the scores to the value normalized by dividing the scoring by the sum of the scores for each criterion adopted by that expert. Then the value of belonging to a closed interval $<0.1>$. The sum of the standardized ratings is 1. Where there are more basic assessments of experts creates a matrix averaging ratings given by individual experts, according to the equation (5):

$$c_{ij} = \frac{1}{p} \sum_{e=1}^p c_{ij}(e) \quad (5)$$

where:

p - the number of experts

The decision optimal method Yager is a decision type a minimum. Optimal decisions are those with the fewest ingredients, they have the formulas (6):

$$D_i = \min_j c_{ij}^{wj} \quad (6)$$

A variant of the most preferred is the one which corresponds to the largest component of the optimal decision. Decisions are shown in table 4.

Table 4. Decions data

variant	K1 result	K2 result	K3 result	K4 result	min
RT10	0,112476	0,005533	0	0	0
RP5	0,09615	0,000216	0,204041	0,024144	0,000216
RO3	0,07855	0,00353	0,254533	0,01897	0,00353
RT1	0,07855	0,00353	0,126823	0,017246	0,00353
RZ1	0,07855	0,001978	0,254533	0,025869	0,001978
RP2	0,07855	0,001978	0,171197	0,022419	0,001978
RO2	0,07855	0,001978	0,231098	0,022419	0,001978
RT9	0,07855	0,001978	0	0,012072	0
RZ2	0,07855	0,000874	0,171197	0,025869	0,000874
RM4	0,07855	0,000874	0,126823	0,025869	0,000874
RP3	0,07855	0,000874	0,231098	0,022419	0,000874
RP4	0,07855	0,000874	0,126823	0,025869	0,000874

RO1	0,07855	0,000874	0,231098	0,020695	0,000874
RT5	0,07855	0,000874	0,254533	0,024144	0,000874
RZ3	0,07855	0,000216	0,254533	0,024144	0,000216
RM1	0,07855	0,000216	0,254533	0,025869	0,000216
RP8	0,07855	0,000216	0,126823	0,017246	0,000216
RP9	0,07855	0,000216	0,204041	0,024144	0,000216
RO4	0,07855	0,000216	0,231098	0,025869	0,000216
RT2	0,07855	0,000216	0,204041	0,022419	0,000216
RT3	0,07855	0,000216	0,254533	0,025869	0,000216
RT4	0,07855	0,000216	0,204041	0,025869	0,000216
RT6	0,07855	0,000216	0,171197	0,022419	0,000216
RT7	0,07855	0,000216	0,204041	0,022419	0,000216
RT8	0,07855	0,000216	0,204041	0,025869	0,000216
RT11	0,07855	0,000216	0	0,012072	0
RT12	0,07855	0,000216	0	0,012072	0
RŚ1	0,07855	0,000216	0,231098	0,022419	0,000216
RŚ3	0,07855	0,000216	0,231098	0,025869	0,000216
RŚ4	0,07855	0,000216	0,204041	0,01897	0,000216
RŚ5	0,07855	0,000216	0,204041	0,022419	0,000216
RŚ6	0,07855	0,000216	0,254533	0,024144	0,000216
RŚ8	0,07855	0,000216	0,231098	0,020695	0,000216
RŚ2	0,07855	0	0,204041	0,020695	0
RŚ7	0,05907	0,000216	0,254533	0,017246	0,000216
RM2	0,05907	0	0,171197	0,022419	0
RM3	0,03629	0,001978	0,254533	0,024144	0,001978
RP7	0,03629	0,001978	0,126823	0,01897	0,001978
RP1	0,03629	0,000874	0,254533	0,020695	0,000874
RP6	0	0	0	0,017246	0

==>> 0,00353

Variants which are most expected for thermofoming machine: RO3,RT1,RZ1, RP2, RO2, RM3, RP7, RZ2, RM4, RP3, RP4, RO1, RT5, RP1, RP5, RZ3, RM1, RP8, RP9, RO4, RT2, RT3, RT4, RT6, RT7, RT8, RŚ1, RŚ3, RŚ4, RŚ5, RŚ6, RŚ8, RŚ7, RT10, RT9, RT11, RT12, RŚ2, RM2, RP6.

6. Conclusion

Application of Yager allowed to prioritize a very large number of possible solutions which result in different field of improving ergonomics and other key criteria such as production cycle time, analyzed possible solutions implementation time and costs of implementation of the analyzed solution. Scheduling

it formed a series of solutions from those with the greatest effect of implementation to those whose effect will be felt the least, and for which the estimated cost will be highest.

Priority is given to this solution of the conflict solutions which has received major component associated with optimal decision. A key role in the analysis is the analysis of expert knowledge, their experience and correct decisions during the cycle analyzes - both at the stage of assessing the validity criterion by Saatiago and during the assessment of appropriate solutions.

The introduction of restrictive criteria at a higher level could point scale to allow, where necessary, simplify phase calculations and selecting a smaller set of solutions. Application of Yager may be useful in the production practice when planning investments in organizations. The method does not introduce restrictions on the number of pending criteria, making it flexible and can be tailored to the needs of the organization

References

- [1] Byrska K. Matuszek J.: Zastosowanie arkusza ergonomicznego do analizy warunków pracy na wybranych stanowiskach roboczych, w: Współczesne standardy w zakresie zarządzania bezpieczeństwem i higieną pracy: nowa perspektywa, red. J. Lewandowski i M. Znajmiecka-Sikora, Łódź, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 2014.
- [2] Lorek R.: Optymalizacja wielokryterialna procesów wytwarzania rotorów przędzarek, praca doktorska, Akademia Techniczno-Humanistyczna, Bielsko-Biała, 2009
- [3] Ogiński. L., Płonka S., Wybór optymalnego wariantu procesu wytwarzania wrzeciona przędzarki obrączkowej, Multicriterial Optimisation of the Manufacturing Process of a Spindle Working in a Ring Spinning Frame. FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe 2014; 22, 6(108): s51-58.
- [4] Wróblewska M.: Ergonomia skrypt dla studentów, Opole, 2004.

APPLICATION OF NEURAL NETWORK IN ASSEMBLY

Izabela Kutschenreiter-Praszkiewicz

University of Bielsko-Biała, Willowa 2, 43-300 Bielsko-Biała

Abstract: The paper presents neural network application for time standard assesment of innovative product parts assembly. Methods of time standard assesment were discussed. Neural network was presened as a tool of data analysis and prediction. Neural network application in assembly of machine parts was illustrated with an example.

1. Introduction

In order to accompany the increasing variety of customers' demands, manufacturers tend to produce different models of the same product on an assembly line by introducing group assembly design concepts that improve the flexibility of assembly systems [1]. Assembly to order has become one of the efficient methods which can help to fulfil customer needs.

For that reason it is necessary to improve methodology of assembly standard time assessment for different product variants in an efficient way.

Standard time is defined as time achieved by a worker who uses a given method and equipment, performs work under given conditions, by a worker with sufficient skills to do the job properly, by a worker who is as physically fit for the job, after adjustment to it, as an average person who can be expected to be put on the job and working at the pace of an approved pace standard [12]. Standard time is calculated as a sum of basic time and allowance time.

Standard times are used by industries for assembly line balancing, assembly process plan, man power planning, estimating labour costs, calculating productivity of the production process, scheduling and designing tasks [1] [4] [5]. Standard time can be assessed with the use of various work measurement methods.

The selection of the most appropriate prospective method of work measurement depends on several factors which include the length, the precision (in terms of time units) and the general cycle-time of the job [2] [5].

One of the work measurement methods which apply to worldwide standards is MTM.

The MTM-system is integrated as a standard method of predetermined times for the computation of basic task execution times [11].

The idea of MTM is focused on analysing basic human motions, like e.g. reach, grasp, move, etc. and uses tables with times for them. The result of analysis comes from synthesis of basic motion times.

During years MTM was developed. Several variants have been worked out, such as e.g. MTM-2, MTM-3, work factor (WF), universal analysing system (UAS). MTM is time consuming, even if a computer aided system is used (e.g. Maynard Operation Sequence Technique).

In assembly to order, MTM as a method of time standard setting is not sufficient. To increase time standard setting efficiency it is suggested to apply

modern methods of data analysis, like neural network (NN).

2. Neural network application in assembly – literature review

Standard time assessment for assembly with the use of the MTM method needs experienced industrial engineers who are able to analyse the production process in proper way. MTM analysis is time consuming, so it is necessary to develop a method which is more efficient.

In literature ideas focused on applying artificial intelligence in that process are described. L.E. Lai at al [9] described the WIPA system which applies multi-layer feed-forward-back propagation neural network NN model to forecast time of each operation for particular product with the use of case based reasoning CBR method.

Hsu at al [6] proposed assembly sequence planning knowledge system which used feature-based assembly modelling. Authors constructed a graph – based assembly sequence planning and developed a knowledge system with a neural network engine.

Another approach proposed by Kim at al [7] presents neural net-based inference system in the assembly process that can infer the complex relationship between the corrective motion and the measured information of parts deformation and misalignments.

Chumakov [3] presented Elman neural-network for detecting faults in the assembly of thread-forming screws.

3. Neural network for time standard determination in manual assembly process of machine parts

Basic human motion analysis helps to create standards in manual assembly of machine parts. In enterprises it is possible to use this kind of analysis in the following cases:

- setting time standards for new (innovative) products in a given assembly layout and workplace arrangement,
- improving layout and workplace arrangement for well-known products,
- layout planning and workplace arrangement for new (innovative) products.

The first case is the most common. It quite often happens, especially in B2B trade, that an enterprise sells products assembled to order for a particular

client with the use of given tools and workstation arrangement.

In such a situation, the enterprise has databases of verified time standards created for the products assembled in the past. Those time standards can be set with the use of MTM or another work measurement method.

If an enterprise uses MTM, description of the assembly process is quite precise and the process will proceed in a repeatable manner.

Therefore, in the presented approach MTM was proposed as a method of time standard setting for manual assembly of machine parts.

B2B trade enterprises often compete with one another preparing offers for tenders. The offer should include not only the price, but also a deadline for given product. In that case preliminary preparation of data regarding the production process is quite important.

Data analysis in make to order (assembly to order) products has to be fast, but high precision is not required.

One of promising methods of data analysis is neural network. Neural networks, also called artificial neural networks, are a family of statistical learning methods inspired by biological neural networks which can be used, among others, to estimate functions which depend on a large number of features.

Neural network is a system of connected neurons, where each connection has numeric weight established during the learning process. The number of neurons in the network, their type, structure and connection between them all create a model of the analysed process.

The proposed approach links MTM and NN as methods of data analysis in the assembly process of mechanical parts (fig. 1).

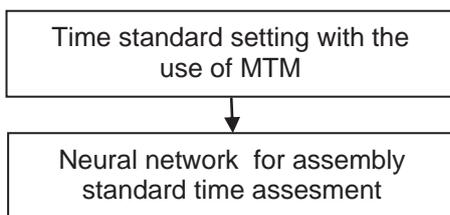


Fig. 1. MTM and NN in assembly standard time assessment

Time standard setting with the use of MTM indicates important features in manual assembly process. These features are related with the workstation arrangement and assembled parts. MTM in several basic motions used the same features like: part weight, distances resulting from workstation arrangement, part size, assembly part arrangement which come from layout plan (parts can be supplied to the workstation e.g. in baskets, by a feeder, etc.). Some of these features are fixed for particular workstation, whereas some of them are changeable.

In order to assess time standards for new (innovative) products with the use of neural network, it is necessary to indicate features which are important for product and process.

An idea of the proposed system was presented in fig. 2

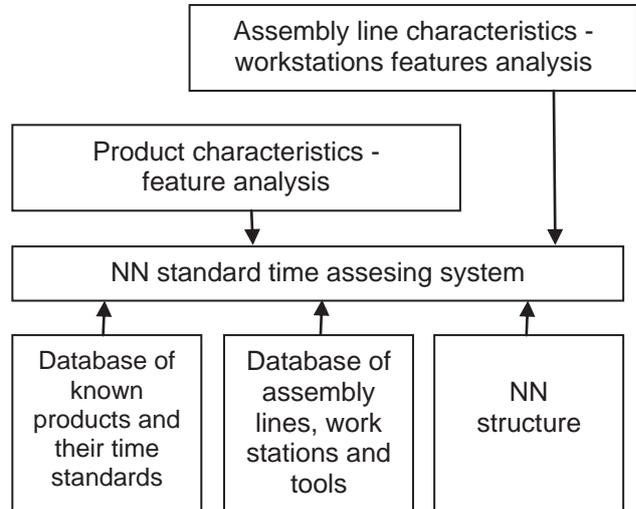


Fig. 2. Neural networks in assembly standard time assessment.

NN structure can be established with the use of a learning process in which the learning set includes examples of standard times linked with products and workstations characteristics (table 1).

Tab. 1. NN learning set

Case n_0	Input variables						Output variable
	Assembly line (workstation) characteristics				Product characteristics		Standard time
	Feature w_1	Feature w_2	Feature w_n	Feature p_1	
1							
2							
...							

Among many features used in product and process characteristics, it is necessary to find the ones which are important for time standard assessment in the particular assembly process.

For that purpose, sensitivity analysis can be applied. Sensitivity analysis helps to improve a model of the analysed process. Model of a chosen process consists of a number of input and output variables and relations between them given in evident series of equations or in a hidden manner, e.g. NN. The sensitivity analysis tests cause – effect relationships between input variables and their influence on model output data. Input variables are systematically eliminated from the model and output of the model is an-

analysed. Those input variables which have no meaningful influence on the accuracy of output data generated by the model are eliminated from the model (fig. 3).

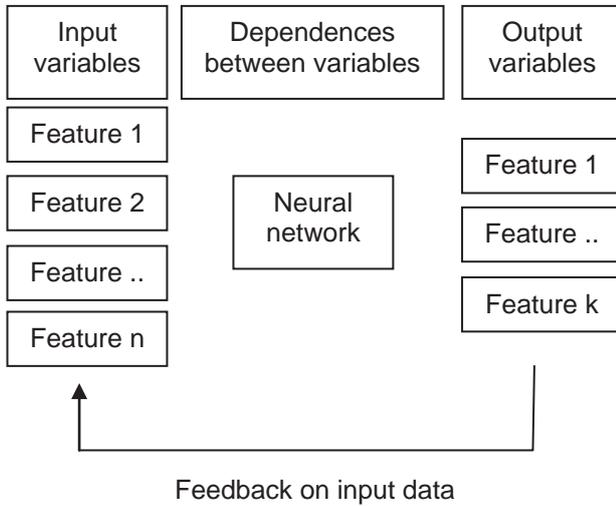


Fig. 3. Sensitivity analysis of a process model

Sensitivity analysis helps to create a model of the analysed process in the simplest way.

4. An example of NN application in the assembly process

The analysis was focused on creating an NN model of the assembly process for toothed gears with the use of the MTM method.

In the given workstation equipped with an assembly table, a subassembly table, shelving, an overhead crane, spanners, a hammer, a tong the assembly process of 14 toothed gears was analysed.

A sample of analysis was presented in table 2 [8].

Tab. 2. Toothed gear assembly process analysis

Step	Description	Time [TMU]
1	Technical documentation analysis	8334
2	Walking from the assembly table to the subassembly table, bringing a hammer and a tong, putting it on the subassembly table	190
3	Walking from the subassembly table to shelving, bringing sleeves	900
....		

Time standards for assembly process of toothed gears were presented in table 3 [8].

Tab. 3. Time standards for assembly process of toothed gears

Weight	Size	Stage_no	Work-station	Time_sta [h]
20	75	1	1	2.738
45	125	1	1	2.858
190	200	1	1	3.01
280	250	1	1	3.168
530	300	1	1	3.368
50	200	2	1	4.008
170	325	2	1	4.226
268	400	2	1	4.424
880	650	2	1	5.022
2600	1000	2	1	5.344
140	400	3	1	4.472
285	500	3	1	4.978
410	625	3	1	5.708
1350	1000	3	1	6.748

For each assembled toothed gear features characterised it like weight, size, stage number were indicated. All toothed gears were assembled in the same workstation marked 1 (tab. 3).

Data in table 3 was used in NN training process.

For creating a NN model of toothed gears assembly, process Sphinx software was used.

Sphinx consist of several modules, among others, a NN simulator is available.

Structure of the NN model for time standard assessment of toothed gears was presented on fig. 4.

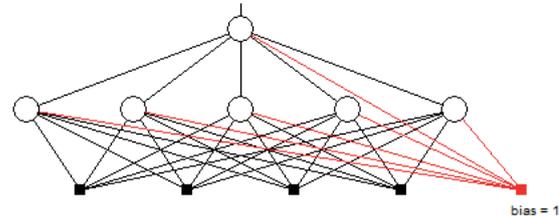


Fig. 4. NN structure

NN consists of 4 input neurons and bias, 5 neurons in the hidden layer and 1 output neuron.

As a measure of network performance RMS was used [10], which is calculated according to the equation (1).

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=0}^{m-1} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} (T_i - O_i) \right)_j} \quad (1)$$

Where:

- n-number of NN outputs
- T_i -expected value of NN output i
- O_i -real value of NN output i
- m- number of cases analysed during 1 training cycle (1 epoch)

Results of the analysis were presented in figure 5. The upper part of this figure shows a learning set, in the middle part the performance of the NN was calculated, and the bottom part presents results of NN run.

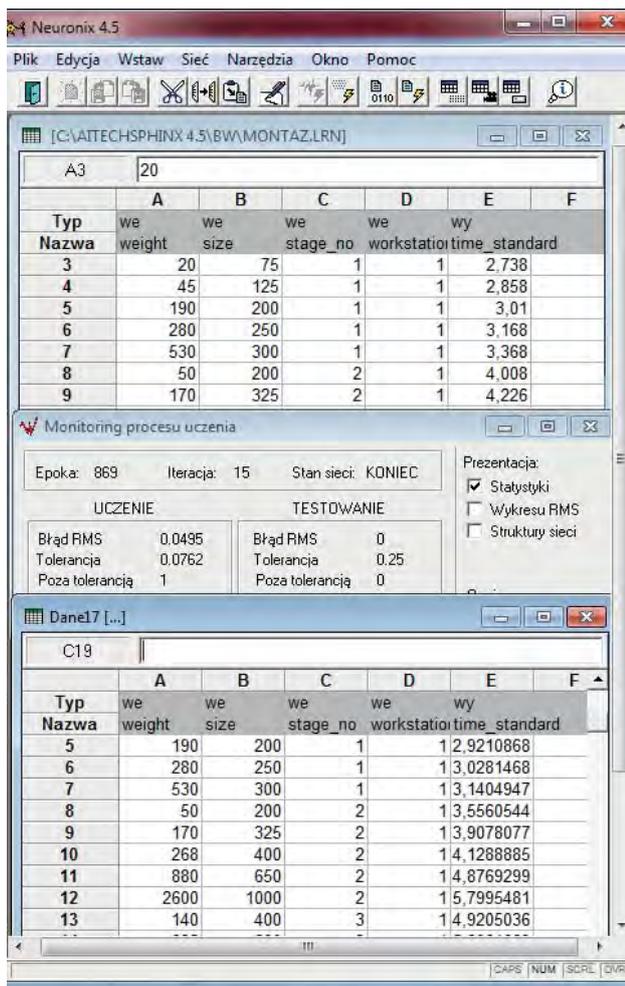


Fig. 5. NN learning process and its results

5. Conclusions

The proposed approach links word standard MTM of manual assembly time standard setting with NN which is a modern method of data analysis.

NN is useful as a method of time standards reusing in assembly to order production process.

The presented example used NN simulator Neuronix, which is a module of the Sphinx software, for time standard assessment in toothed gear assembly process.

Results of the presented analysis are promising.

Literature

- [1] Battini D., Faccio M., Ferrari E., Persona A., Sgarbossa F.: Design configuration for a mixed-model assembly system in case of low product demand. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2007, Volume 34, Issue 1, pp 188-200
- [2] Bentley T.J.: The Management Services Handbook, 2nd ed. Pitman Publishing, London 1991
- [3] Chumakov R.: An artificial neural network for fault detection in the assembly of thread-forming screws. Journal of Intelligent Manufacturing. 2008, Volume 19, Issue 3, pp 327-333
- [4] Fan X., Gao F., Zhu H., Wu D., Yin Q.: A real – Virtual Mapping Method for Mechanical Product Assembly Process Planning in Virtual Assembly Environment. Chapter in book: Shumaker R.: Virtual and Mixed Reality. Springer Berlin Heidelberg, 2009
- [5] Gironimo G., Martino C., Lanzotti A., Marzano A., Russo G.: Improving MTM-UAS to pretermine automotive maintenance times. International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM). 2012, Volume 6, Issue 4, pp 265-273
- [6] Hsu Y., Tai P., Wang M., Chen W.: A knowledge-based engineering system for assembly sequence planning. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, Volume 55, Issue 5, pp 763-782
- [7] Kim J., Cho H.: Neural Net-based assembly algorithm for flexible parts assembly. Journal of Intelligent and Robotic Systems. 2000, Volume 29, Issue 2, pp 133-160
- [8] Kutschenreiter-Praszkiwicz I.: Metodologia planowania przebiegu prac technicznego przygotowania produkcji elementów maszyn. Praca doktorska. Politechnika Łódzka Filia w Bielsku-Białej. Bielsko-Biała 2000
- [9] Lai L., Liu J.: WIPA: neural network and case based reasoning models for allocating work in progress. Journal of Intelligent Manufacturing. 2012, Volume 23, Issue 3, pp 409-421
- [10] Michalik K.: Neuronix Symulator sztucznych sieci neuronowych. Aitech Artificial Intelligence Laboratory. Katowice 2006.
- [11] Sakamoto S.: Beyond World-Class Productivity. Industrial Engineering Practice and Theory. Springer-Verlang London, 2010
- [12] Zach M., Wiesbeck M., Sork S., Schubo A.: A multi-dimensional measure for determining the complexity of manual assembly operations. Production Engineering. 2009, Volume 3, Issue 4, pp 489-496

PRODUKTION ZWISCHEN WERTSTROMDESIGN UND MES

Mario Strucks

Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, Friedrich-List-Platz 1, D-01069 Dresden

Die Wertstrommethode hat sich als die Leitmethode der Lean Production etabliert. Sie steht für Komplexitätsreduzierung und das Postulat einer „schlanken Planung und Steuerung“ ohne bzw. mit nur sehr wenig Informationstechnologie (IT). MES – „Manufacturing Execution Systems“ – hat sich als Oberbegriff für IT-Systeme (Software) zur Produktions-, Fertigungs- bzw. Werkstattsteuerung etabliert. MES steht dabei eher für den Ansatz der Komplexitätsbeherrschung mittels IT. Die Vielfalt der Produktionsbedingungen insbesondere in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) erfordert beide Konzepte. Weiterhin sind wesentliche Grundbegriffe und Methoden des „klassischen“ Industrial Engineering (IE) für die Prozessanalyse und -gestaltung unverändert wichtig. Schließlich gewinnt die Analyse quantitativer Zusammenhänge zunehmend an Bedeutung, insbesondere für die Bewertung und Validierung von Produktionsstrukturen und Steuerungsstrategien. Hierzu gehört auch die Fabriksimulation als unverzichtbares Werkzeug.

1. Einleitung

Die Produktion in der Metallindustrie hat nach wie vor die klassischen Zielkonflikte zwischen Durchlaufzeiten, Termintreue, Beständen und Auslastung zu bewältigen. Insbesondere im Bereich der kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) sind diese Zielkonflikte wegen der hohen Anforderungen an Flexibilität und Variantenvielfalt einerseits und der geringen Stückzahlen bzw. Losgrößen andererseits besonders scharf. Der permanent hohe Druck schürt seit Jahrzehnten unverändert eine „Hoffnung auf Erlösung“ in Gestalt neuer Management-Methoden und/oder neuer Technik, insbesondere Informationstechnik.

2. Wertstrommethode und kein Ende – alles „lean“?

Die Wertstrommethode [1], Ende der 1990er/Anfang der 2000er Jahre eingeführt, hat sich als Leitmethode der Lean Production und der Ganzheitlichen Produktionssysteme etabliert. Wissenschaftlich umstritten, ist sie aber zu einem Standardwerkzeug der industriellen Praxis geworden. Begriffsbildungen mit „Wertstrom“ als Wortbestandteil sichern mittlerweile hohe Aufmerksamkeit beim Management von Produktionsunternehmen, so dass sie in einschlägigen Veröffentlichungen und bei Beratern inflationär geworden sind.

Im Kontext dieses Beitrags wird die Wertstrommethode übrigens immer als die Gesamtheit von „Analyse“ (Ist-Zustand) und „Design“ (Soll-Zustand), von „Mapping“ (zeichnerischer Darstellung), Bewertung und Gestaltung des Wertstroms nach Grundsätzen und Richtlinien der Lean Production verstanden.

Diese Bemerkung erscheint notwendig, weil mittlerweile in der Praxis sehr häufig die vorgebliche Anwendung der Wertstrommethode lediglich in der Prozessvisualisierung mit den etablierten grafischen Wertstromsymbolen besteht.

Im Allgemeinen kommt die Wertstrommethode bei Praktikern und Studierenden wegen ihrer Eingängigkeit gut an. Die gewollten methodischen Vereinfachungen bei der Erfassung und Bewertung von Zeiten und Mengen verursachen aber regelmäßig Unsicherheiten, wenn es z. B. um Zusammenhänge

und Differenzen mit den klassischen Ablauf- und Zeitarten nach REFA geht. Häufig besteht die Gefahr, dass durch die Fokussierung auf „Best Practice“ und Verschwendungsbeseitigung wichtige Aspekte wie Normalleistung, Verteilzeiten oder Reproduzierbarkeit von Analyseergebnissen ignoriert, unterschätzt oder gar als obsolet betrachtet werden. Unrealistische Soll-Vorgaben und mangelnde Nachhaltigkeit vieler Verbesserungsprojekte beruhen nicht zuletzt auch darauf.

Vor- und Nachteile der Wertstrommethode sind in der einschlägigen Fachliteratur hinlänglich diskutiert (Bild 1, vgl. u. a. [2] bis [4]), was nicht heißt, dass dies auch Allgemeingut aller Manager und Praktiker wäre. Die bekannten Schwächen der Wertstrommethode haben zahlreiche Autoren angeregt, methodische Verfeinerungen, Erweiterungen der Anwendungsgebiete, Kombination mit anderen Methoden usw. vorzuschlagen (u. a. [4] bis [10]). Häufig geht dabei aber ein für ihren bisherigen Erfolg sehr wesentlicher Vorteil der Wertstrommethode, ihre plakative Simplität, verloren.



Bild 1: Häufig genannte Stärken und Schwächen der Wertstrommethode in der Praxis

3. Wozu braucht man MES?

MES – „Manufacturing Execution Systems“, deutsch häufig „Fertigungsmanagementsysteme“ – hat sich als Oberbegriff für IT-Systeme (Software) zur Produktions-, Fertigungs- bzw. Werkstattsteuerung etabliert [11]. MES realisiert die Feinplanung und Fertigungssteuerung (Fertigungsleitebene, kurzfristig) als Bindeglied zwischen ERP/PPS-Systemen

(Unternehmensleitebene; lang- und mittelfristige Planung) und den Maschinen- und Anlagensteuerungen (Fertigungsebene, Online-Steuerung im Echtzeitbetrieb). Die VDI-Richtlinie 5600-1 nennt noch neun weitere Aufgaben (Bild 2 [11]).

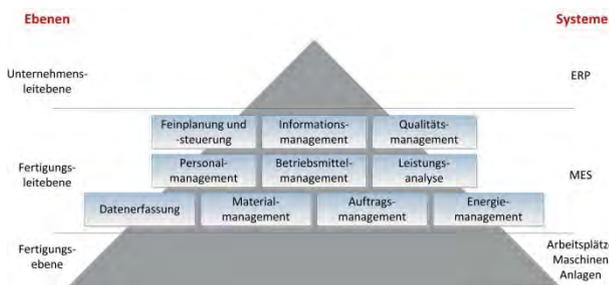


Bild 2: Aufgaben und Einordnung von MES nach VDI-Richtlinie 5600-1 (Entwurf 2015-01) [11]

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass MES-Funktionalitäten in der Praxis nicht nur mit originärer MES-Software realisiert werden. Sie können auch in ERP-/PPS-Pakete integriert oder auf Systeme zur Prozessautomatisierung aufgesetzt sein.

Die etwas provokante Frage „Wozu braucht man MES?“ spielt auf das mit dem Wertstromdesign verbundene Postulat einer „schlanken Planung und Steuerung“ an. Bei konsequenter Umsetzung der Wertstrom-Gestaltungsgrundsätze soll im Prinzip „eine rein manuelle Lösung ohne ... Informationstechnologie“ [1, S. 257] möglich sein. Als wesentliches Argument wird dabei die Einschränkung der Freiheitsgrade der Planungssysteme durch eine physisch fixierte Fabrikstruktur angeführt. So entfallen z. B. bei fester Ressourcenzuordnung die Maschinenbelegungsplanung als Aufgabe der Produktionsfeinplanung. Eine gesonderte Auslastungsüberwachung und -steuerung der einzelnen Arbeitsplätze sei ebenfalls nicht erforderlich.

Eine Umsetzung der flussorientierten Gestaltungsregeln des Wertstromdesigns setzt jedoch relativ homogene Prozesse voraus (gleichartige technologische Folgen und nicht zu stark schwankende Bearbeitungszeiten). Dies erfordert bei einem vielfältigen Teilespektrum zunächst die produktfamilienorientierte Segmentierung der Fertigung in verschiedene Wertströme. Komplexe Materialflüsse, wie sie typischerweise aus der Werkstattfertigung bekannt sind, werden entflochten, indem Teilefamilien- bzw. Teilegruppen gebildet und diesen jeweils eigene Betriebsmittel zugeordnet werden.

Diese Vorgehensweise stößt spätestens bei Einzel- und Kleinserienfertigung mit heterogenem Produktspektrum, großer Variantenvielfalt und hohem technischem und organisatorischem Koordinationsbedarf an ihre Grenzen. Vorherrschende Organisationsform ist dann die Werkstattfertigung, geteilte Ressourcen und wandernde Engpässe sind eher die Regel als die Ausnahme; ein sinnvoller Kundentakt ist nicht ermittelbar, wenn man dem Begriff nicht jegliche Anschaulichkeit nehmen will. Es zeigt sich hier, dass die Komplexität von Produktionsprozessen

nicht beliebig reduzierbar ist.

Aus Sicht von Planung und Steuerung kann man zwei idealtypische Strategien unterscheiden: Flussorientiert und turbulenzorientiert [12]. Flussorientierte Strategien (wie im „idealen“ Wertstrom) kommen i. d. R. mit den Stellgrößen Zugang und Abgang (des Auftragsbestands) aus, da im Allgemeinen eine Pull-Steuerung und das FIFO-Prinzip (First In First Out) angewendet werden können.

Turbulenzorientierte Strategien müssen zur Absicherung der logistischen Ziele zusätzlich insbesondere die Auftragsreihenfolge steuern, was den Planungs- und Steuerungsaufwand erheblich erhöht (Bild 3). Hier liegt ein potenzielles Einsatzfeld der MES-Feinplanung und von APS (Advanced Planning and Scheduling).

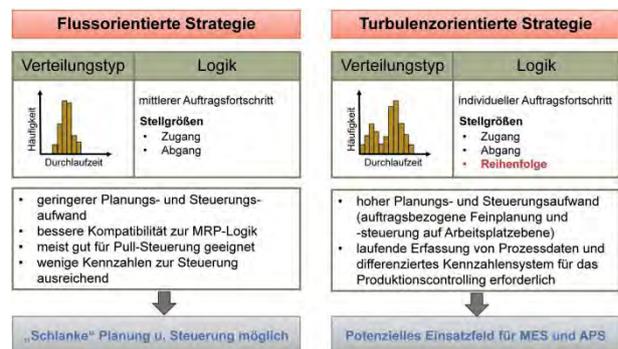


Bild 3: Wirkungsweise der Steuerungsstrategie auf die Durchlaufzeit (unter Verwendung von [12])

Gleichwohl bleiben zwei Grundprobleme bestehen, die es seit Beginn des IT-Einsatzes in der Produktion gibt. Zum einen stellt die Qualität der Eingangsdaten nach wie vor ein Hauptproblem vieler Unternehmen dar. Zum anderen besteht bei komplexen Optimierungsalgorithmen die Gefahr, dass deren Planungsergebnisse dem Anwender nicht plausibel sind und von ihm nicht akzeptiert werden.

In beiden Fällen ist aber MES nicht nur Teil des Problems, sondern kann auch zur - wenigstens teilweisen - Lösung beitragen:

Die integrierte Echtzeit-Erfassung und -Aufbereitung aller relevanten fertigungsnahen Daten, wie z. B. Auftrags-, Maschinen-, Prozess-, Qualitäts- und Personaldaten, ist Basis von MES. Die laufende statistische Auswertung von Vergangenheitsdaten bietet das Potenzial zur Verbesserung von Stammdaten für die Planung.

Das Vertrauen in Planungsergebnisse kann außerdem durch die Simulation, Bewertung und Visualisierung verschiedener Varianten der Maschinenbelegungsplanung verbessert werden.

4. MES meets Lean = Manufacturing Excellence?

„Lean Production“ und „MES“, lange Zeit in Fachliteratur und Industriepraxis oft als Parallel- oder sogar Gegenwelten wahrgenommen, werden neuerdings unter dem Konzept der „Manufacturing

Excellence“ zusammengeführt [13] [14]. Die Annäherung der beiden Welten wird dabei vorrangig von der IT-Seite betrieben, die die manifeste Abneigung der Lean-Verfechter gegen IT endlich überwinden will. Mit dem Thema „Industrie 4.0“ – dem neuesten „Erlösungsversprechen“ für die Produktion - haben auch das MES-Konzept und die Diskussion, wie es mit dem Lean-Konzept „versöhnt“ werden kann, eine neue Dimension erhalten [15].

Interessant ist, wie die IT-Promotoren den Lean-Verfechtern die möglichen Synergien mit der IT schmackhaft zu machen versuchen, u. a.: MES ermöglichen durch aussagefähige Kennzahlen und Analysen das Erkennen jeder der sieben Verschwendungsarten. Mit MES könne man das Lean-Prinzip der Visualisierung für Shopfloor und Management aktueller und besser realisieren als mit Flipcharts und Schautafeln. Zudem unterstützen MES den kontinuierlichen Verbesserungsprozess durch qualifizierte Entscheidungsgrundlagen sowie mittels Gestaltung, Abwicklung und Dokumentation geeigneter Workflows.

Versteht man das Konzept der „Manufacturing Excellence“ als Versuch, das Leitbild einer idealen Produktion zu beschreiben, kann es sicher interessante Anregungen vermitteln. Kritisch ist vor allem anzumerken, dass teilweise suggeriert wird, die Gegenläufigkeit der Ziele Wirtschaftlichkeit, Termintreue und Flexibilität sei durch die mittels MES zu schaffende Transparenz und Reaktionsfähigkeit zu durchbrechen [13, S. 5] - wieder ein Erlösungsversprechen, das in der Realität nicht eingelöst werden kann.

5. Kleinserien- und Einzelfertiger zwischen Wertstromdesign und MES

Für das von Termin- und Kostendruck geplagte KmU mit Kleinserien- und Einzelfertigung bringen Wertstrommethode und MES weder allein noch in Kombination die erhoffte „Erlösung“.

Die Wertstrommethode kann in der *Analysephase* durchaus hilfreich sein, wesentliche Schwachpunkte des Ist-Zustandes zu identifizieren. Die flussorientierten Gestaltungsprinzipien des Wertstrom*designs* für den Soll-Zustand hingegen sind i. d. R. wenig zielführend, da, wie oben festgestellt, bei Einzel- und Kleinserienfertigung turbulente Produktionsprozesse überwiegen.

Größere Bedeutung kommt dagegen dem Einsatz von MES-Funktionalität zu. Allein schon wegen der Fülle der für die Auftragsrealisierung erforderlichen Daten, der überwiegend CNC-gesteuerten Betriebsmittel und der mittlerweile bei vielen Kunden hohen Anforderungen an die Rückverfolgbarkeit (Tracking und Tracing) sind Datenerfassung und -verteilung ohne IT nicht mehr möglich. Sie werden von nahezu allen KmU praktiziert, wenn auch auf sehr unterschiedlichen Niveaustufen und durchaus oft nicht mit originären MES-Lösungen.

Feinplanung und -steuerung erfolgen hingegen noch sehr häufig anhand von handgeschriebenen oder

mit Excel erzeugten Listen sowie mithilfe von Planberatungen und Terminjägern. Die Unternehmen spüren hier einen besonders starken Leidensdruck und zeigen zunehmend Interesse an den Angeboten moderner MES-Feinplanungslösungen, obwohl man meist schon über ERP- bzw. PPS-Planungssoftware verfügt.

Allerdings haben gerade die potenziellen Nutzer aus der Einzel- und Kleinserienfertigung das Problem, dass ihnen Daten für die Anwendung von Optimierungsalgorithmen nicht oder nicht in ausreichender Qualität zur Verfügung stehen. Die MES-Anbieter verweisen dann auf die Möglichkeit, mittels MES aus einer statistisch abgesicherten Anzahl von Ist-Werten neue Planwerte generieren zu können [13] [14] [15]. Das aber ist einerseits wegen des geringen Wiederholungsgrads von Aufträgen wenig sinnvoll. Andererseits schwanken die Belegungszeiten auch bei ähnlichen Aufträgen teilweise stark. Für diese Schwankungen gibt es häufig komplexe Ursachenbündel (technische Probleme beim Rüsten und Einfahren, Veränderung von NC-Programmen, Störungen, Langsamlauf usw.). Regelmäßig wird dagegen das Argument vorgebracht, der Werker habe ja die Möglichkeit und die Pflicht, Abweichungen vom Standardablauf mit Ursache (z. B. Maschinenstörung, Qualitätsproblem usw.) und jeweiliger Dauer über die elektronische Betriebsdatenerfassung einzugeben [15]. Die Praxis zeigt aber immer wieder, dass diese Art von Datenerfassung durch den Einfluss des „menschlichen Faktors“ sehr unzuverlässig ist: Fehlinterpretationen, Bequemlichkeit, bewusste Vertuschung u. a. m. verhindern oft realistische, statistisch brauchbare Auswertungen.

Aus anderen Gründen schwierig ist der Wert von über ERP oder MES ermittelten durchschnittlichen Durchlaufzeiten zu beurteilen. Kapazitätsauslastung, Bestände, Planungs- und Steuerungsstrategien u. a. Faktoren haben bekanntlich einen großen Einfluss auf die Höhe der Durchlaufzeiten.

Daten fehlen auch noch an weiteren Stellen. Die dritte industrielle Revolution, die Digitalisierung der Fabrik und insbesondere der Betriebsmittel, ist noch lange nicht abgeschlossen. So scheitert z. B. häufig eine zuverlässige Verfügbarkeitsprüfung für Werkzeuge, Vorrichtungen und Prüfmittel über MES an den dafür notwendigen Daten [16] [17].

Am Ende steht eine Erkenntnis, die nicht neu, aber offensichtlich von jeder neuen Generation von Anwendern in der praktischen Anschauung neu errungen werden muss: IT bleibt auch im Zeitalter von modernen MES-Lösungen und „Industrie 4.0“ nur ein den Menschen unterstützendes Werkzeug. Vor dem erfolgreichen IT-Einsatz sind die grundlegenden organisatorischen Voraussetzungen zu schaffen: Prozesse und Zuständigkeiten definieren, geeignete Verfahren zur Planung und Steuerung auswählen und parametrisieren, Informationsbedarf ermitteln, Datenbasis erfassen usw.

6. Der menschliche Faktor

Die Verantwortung zur Schaffung dieser Vorausset-

zungen, für das Verständnis von Möglichkeiten und Grenzen verschiedener Methoden und Werkzeuge und deren praktische Anwendung, liegt aber immer bei den beteiligten Menschen im Unternehmen.

Erforderlich ist ein Stamm hochqualifizierter und mit dem Unternehmen über längere Zeit verbundener Mitarbeiter, die sowohl über umfangreiche Methodenkompetenz wie auch über detaillierte Kenntnis der unternehmensspezifischen Bedingungen verfügen. Einem solchen Qualifikationsprofil entsprechen i. d. R. viele Arbeitsvorbereiter. In KmU erfüllen sie häufig in Personalunion Aufgaben der operativen Arbeitsplanung und des arbeitsgestalterisch und betriebsorganisatorisch wirksamen Industrial Engineering.

Die Arbeitsvorbereitung war jedoch von der personellen Ausdünnung gerade durch die Lean-Philosophie jahrelang besonders stark betroffen. Es zeigt sich aber immer wieder: Allein mit projektbezogen ins Unternehmen geholter externer Expertise und im halbjährlichen Rotationsverfahren ausgetauschten studentischen Praktikanten ist auf diesem Gebiet kein nachhaltiger Erfolg zu erreichen.

Die Potenziale durch mehr Personal in der Arbeitsvorbereitung können natürlich nur realisiert und wirtschaftlich wirksam werden, wenn es das „richtige“ Personal ist, d. h. fachlich gut ausgebildet, kompetent im Umgang mit Mitarbeitern und Management, bereit und fähig zu ständiger Weiterbildung.

Der Aspekt der Ausbildung betrifft den Verfasser als Lehrenden an einer Fachhochschule in den Studiengängen Produktionstechnik und Wirtschaftsingenieurwesen unmittelbar.

7. Welche Themen gehören in die Lehre?

Von einem FH-Ingenieur wird vor allem anwendungsbereites Grundlagen- und Methodenwissen sowie die Fähigkeit zu team- und projektorientierter Arbeit erwartet. Wichtige, in der industriellen Praxis etablierte Methoden dürfen nicht einfach ignoriert werden, weil sie vielleicht unter wissenschaftlichen Aspekten anfechtbar sind. Praxisorientierung kann aber nicht heißen, nur den aktuellen Stand der Technik in der Lehre zu widerspiegeln. Es heißt gleichermaßen, Kritikfähigkeit zu schulen sowie Inhalte verstärkt zu vermitteln, die offensichtlich in der Praxis defizitär sind.

Der Verfasser sieht für seine Lehrgebiete Produktionslogistik und Produktionsplanung und -steuerung (PPS) neben den zu erwartenden Schwerpunkten „Verfahren der PPS“ und „IT-Systeme für die Produktionslogistik“ auch die Wertstrommethode und die Lean Production Systems als wichtige Bausteine.

Weiterhin sind unbedingt wesentliche Grundbegriffe und Methoden des „klassischen“ Industrial Engineering (IE) für die Prozessanalyse und -gestaltung zu vermitteln bzw. zu festigen.

Schließlich gewinnt die Analyse quantitativer Zusammenhänge zunehmend an Bedeutung, insbesondere für die Bewertung und Validierung von Pro-

duktionsstrukturen und Steuerungsstrategien. Hierzu gehört auch die Fabriksimulation als unverzichtbares Werkzeug. Zu diesen Themen müssen zumindest wichtige Grundkenntnisse vermittelt werden.

7. Fazit

Die Vielfalt der Produktionsbedingungen erfordert verschiedenartige Ansätze, um Komplexität sowohl zu reduzieren als auch, wenn keine weitere Reduzierung möglich ist, zu beherrschen. „Eines schickt sich nicht für alle“ – die Lösungsansätze können sehr verschieden sein. Dies sollte am Beispiel der Gegenüberstellung von Wertstrommethode (Komplexitätsreduzierung) und MES (Komplexitätsbeherrschung) gezeigt werden.

Das Verständnis der Methoden und Software-Werkzeuge und deren sinnvolle und zielführende praktische Anwendung im Unternehmen setzt hochqualifizierte Mitarbeiter voraus.

In der Lehre ist die Vielfalt der praktischen Lösungsansätze an ausgewählten, dafür möglichst vertieft dargestellten Schwerpunkten zu zeigen.

Literaturverzeichnis

- [1] Erlach, K.: Wertstromdesign. Der Weg zur schlanken Fabrik. 2. Aufl. Berlin: Springer, 2010
- [2] Hämmerle, M.; Rally, P.: Wertschöpfung steigern. Stuttgart: Fraunhofer, 2010
- [3] Neuhaus, R.: TPS, Lean, Produktionssysteme und kein Ende der Missverständnisse? Eine Betrachtung der vergangenen 20 Jahre. In: Betriebspraxis und Arbeitsforschung (2013) 215/März 2013, S. 16–25
- [4] Wolff, M.: Methode zur Wertstromoptimierung mittels simulativer Bewertung von Handlungsalternativen. Aachen: Shaker, 2013
- [5] Erlach, K.; Westkämper, E. (Hg.): Energiewertstrom. Stuttgart: Fraunhofer, 2009
- [6] Kuhlmann, P.: Produktivitätssteigerung durch die kombinierte Anwendung von MTM und Wertstromdesign. In: Britzke, B. (Hg.): MTM in einer globalisierten Wirtschaft. München: mi, 2010, S. 239-268
- [7] Keil, S.: Flussorientierte Gestaltung von Produktionssystemen. Anwendung am Beispiel von Halbleiterfabriken. Diss. TU Dresden, 2011
- [8] Fuchs, S.: Wertstromorientierte Auftragsfreigabe bei dynamischen Engpässen in der Produktion nach dem Werkstattprinzip. Aachen: Apprimus, 2013
- [9] Günthner, W.; Boppert, J. (Hg.): Lean Logistics. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013
- [10] Hinrichsen, S.: Was Toyota von REFA lernen kann. In: Industrial Engineering 67 (2014) 2, S. 4–8
- [11] VDI-Richtlinie 5600 Blatt 1 (Entwurf) (2015-01): Fertigungsmanagementsysteme (Manufacturing Execution Systems - MES)
- [12] Wiendahl, H.-H.: Situative Konfiguration des Auftragsmanagements im turbulenten Umfeld. Heimsheim: Jost-Jetter, 2002
- [13] Kletti, J. Schumacher, J.: Die perfekte Produktion. Berlin: Springer, 2011
- [14] VDI-Richtlinie 5600 Blatt 5 (2015-03): Neue Optimierungsansätze mit MES
- [15] Schließmann, A.: iProduction, die Mensch-Maschine-Kommunikation in der Smart Factory. In: Bauernhansl, T.; u. a. (Hg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014
- [16] Marcziński, G.: Das Werkzeug als Cyber-Physical System? In: VDI-Z Special Werkzeuge (2014) Mai
- [17] Scheel, M.: Beitrag zur Einführung eines Werkzeugverwaltungssystems bei einem mittelständischen Fertigungsunternehmen für Maschinenbauteile. Diplomarbeit, HTW Dresden, 2015

THE SYSTEM FOR OBJECTS AND GOODS IDENTIFICATION IN INDUSTRY THROUGH THE BARCODES

Juraj Uríček, Vladimír Bulej, Ján Stanček

University of Žilina, Univerzitná 1, SK-01026 Žilina, Slovakia, uricekj@fstroj.uniza.sk

The article deals with the design of system for object and goods marking and identification in a warehouse through the barcodes. There is described the designed control algorithm and graphical interface for application Folsklad with handheld scanner Datalogic Skorpio X3. Second algorithm was developed with graphic interface for local workstation named Server. In Server we designed database MS-SQL for communication with handheld scanner, Folsklad app and Webserver which allow the connection to the database tables through mobile devices in the future as well. As a peripheral device in Server we installed label printer Zebra GX430t for printing barcodes and additional notes. Finally we created project schedule in Gantt chart.

Keywords: barcodes, handheld scanner

1. Introduction

Automatic Identification and Data Capture Technologies (AIDC) rely on identification processes which are significantly more reliable and less expensive than those that are not automated. The most common AIDC technology is bar code technology, which can use optical scanners to read labels. Almost all people have direct experience with bar code technology because they have seen cashiers scan goods at supermarkets and retail stores. Bar codes are an enormous improvement over ordinary text labels because personnel are no longer required to read numbers or letters on each label or manually enter data into IT system, they just have to scan the label. [1] The next generation of AIDC is Radio Frequency Identification (RFID), it's innovation of bar codes with improved the speed and accuracy of the identification process and facilities with better management of inventory pricing when coupled with information system. RFID works wirelessly in specific electromagnetic fields which could be easy cancelled or hacked as it's often used for security purpose. The most of RFID tags needs an external energy what's not allowable to work in the place without electric power. However bar code technology still brings economic results for huge warehouse. Generally it is quite cheap to design and print, regardless of their purpose, or where it will be affixed. It can be customized economically, in a variety of finishes and materials.

2. The System Concept for Goods Identifying

The article deals with the design of a system for goods identifying through barcodes in the company Midai, Ltd. (Slovakia). Then we will be able to shorten the effective time of workers thanks to the inventory labeling with the barcodes. Electronic preview of the warehouse will be available for the authorized users who need the information for further evaluation. The error rate of manual data entry and manual calculations for different units of measuring are reduced thanks to the electronic system. In this section we will evaluate the current situation of storage system, select the appropriate hardware and software solution for warehouse and production, design the marking labels with barcodes,

label printer and finally we will evaluate the time shedule of the project.

3. The Present State

Currently the goods, to which we want to apply an identification system, is produced in cooperation with foreign companies. It is a material made of polyvinylchloride (PVC) or polypropylene (PP) is wound in the width from 172 till 205mm with a maximum diameter 730 mm, weight from 90 to 110 kg and a thickness of 1 to 4 mm (Fig. 1).



Figure 1. The good, to which we want to apply and identification system – the roll of PVC foil (this example: PVC, 3 mm thickness, for food industry)



Figure 2. The pallet with 9 pieces of foil roll.

After performing the certification audit in 2014 and obtaining management system ISO 9001: 2008, the company passed from hand written to electronic records of material in Excel tables, which processes the current stock quantity. All input data are entered manually. The system automatically monitors the real inventories.

4. Conceptual Design of System for Labeling and Sensing of Foils, Pallets and Warehouse

The company plans several innovations. First innovation step is to buy an extruder (figure 3). The company will produce the foil rolls without the cooperation from the first half of July 2015. Estimated annual production of PP and PVC foil is 500 tons. We proposed a new store layout and production for material flow. We also deal with conceptual design for labeling and sensing of foil rolls, pallets and warehouse space.



Figure 3. Extruder for foil production (length 17m).

Variant A - Utilization of Handheld Scanner

Skorpio X3 handheld scanner from Datalogic is a good solution for applications in storage area. Midai company in 2014 bought the device and its role is in the storehouse of plastic products and in the manufacture presses for thermoforming. The scanner has a 3,2" color TFT LCD screen display with a resolution of 240x320 pixels and touch screen. There is a choice of two operating systems Windows CE 6.0 or Windows 5.6. Of course there is detection of all certified 2D and 1D codes.



Figure 4. Datalogic Skorpio X3.

The scanner is suitable for warehouses, stores or wherever there is dust, dirt and humidity (IP64). It works in a temperature range of -10 °C to +50 °C. In figure 4 we can see Skorpio X3, which includes the base (docking station) for charging and connection with the computer via USB 1.1 or RS-232. Also wireless connection is supported through WiFi IEEE 802.11 a / b / g with WPA or WPA2. It contains also slower interface Bluetooth. It is using "Green dot" optical confirmation of successful reading code.

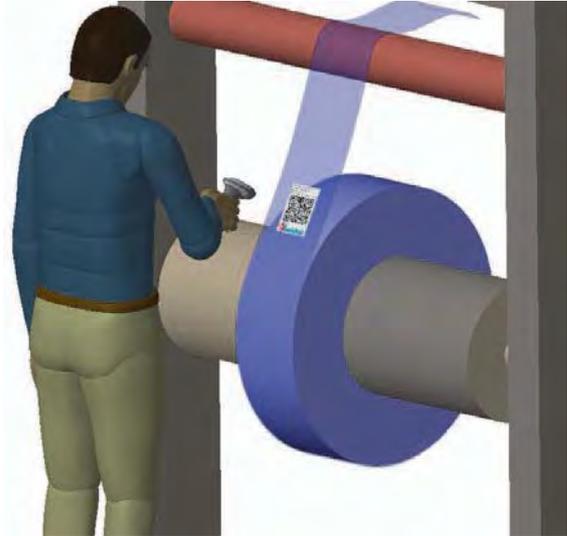


Figure 5. Manual scanning of barcode label by Datalogic Skorpio X3.

The foil will be rolled at the end of the foil extrusion process. Foil rolls will be stacked on the pallet, where the bar code is placed in the front and the back side which uniquely identifies the palette. Each pallet has a special place reserved in the warehouse and the operator can release it from the database only when the pallet is empty.



Figure 6. Roll of foil labeled by QR code and pallet labeled by Code 39.

In Fig. 5 and 6 is shown the manual scanning and stocking the rolls on pallets. The place reserved for the pallet will be marked on the floor by lines and bar code.

Variant B - Utilization of Static Scanner

This solution is based on the sensor Cognex DataMan 60L shown in Fig. 7. DataMan is primarily arranged for reading 1D and 2D barcodes in industrial applications. After proposing its own software solutions we are able to fully utilize 1/3-inch CMOS sensor with a resolution of 752x480 pixels as inspection solution that can be seen in Fig. 8.



Figure 7. Cognex DataMan 60L.

In figure 8 is shown continuous quality control of the foil with alert the operator in case of immediate worse quality. The sensor provides the code scanning in the same time. The disadvantage of static location of DataMan is a limited workspace. Therefore it will be necessary to choose such dimensions of the barcode lable which enables to perform both activities simultaneously and smoothly.

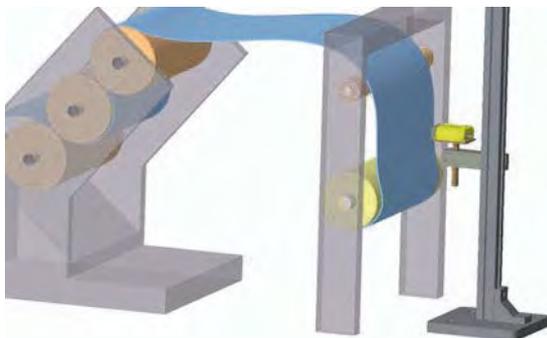


Figure 8. Application of DataMan sensor for unmanned control of foil quality.

With respect to the highest flexibility we choose the variant A with the mobile device Datalogic Skorpion X3.

5. Printing of Lables

Any vector or bitmap editor can be used for label design. Such a solution is not practical suitable for long-term application.



Figure 9. Printer Zebra GX430t

Therefore, a manufacturer of specialty printers for printing labels develop their own simple graphical interfaces that are adapted for specific types of printers. The user can compose the pattern from basic elements: text, company logo, curves, tables and other, the area of the virtual label. If neede, we should add dynamic fields, such as date, data from the database if the barcode is generated from the input information automatically. Before printing, check the edges and dimensions of the label.

We choose the largest transfer desktop printer from Zebra brand named GX430t that inhibit daily 1000-3000 labels with a resolution of 300dpi (fig. 9).

For our application we prepare suitable design of the lables which contains all necessary information. The label for foil rolls is shown in figure 10.



Figure 10. Designed pattern of the label with the code

Inscription label for the foil rolls is chosen with standard size 100 x 150 mm and thickness of 0.1mm. The label may also include a multi-colored objects, such as a corporate logo. All information in the field of encode information into QR codes for digital transmission to the database.



Figure 11. Designed label with the code for palette (left) and place in a warehouse (right)

To mark the palette we choose the Full ASCII Code 39, that we are able in the future to cover a variety of distribution or enlarging the number of pallets. Printed labels with codes according to fig. 11 is placed on the middle of the shorter sides of the pallet. The label contains only the barcode itself stretched to the maximum possible size of the place on the pallet. Visual inspection of the code is automatically generated output below the bar to registration, in this case (Fig. 11, left) to the "P1". P stands for the first letter of the word variety, and

numerical value of 1 is the serial number label. P1 is illustrative in the future, thanks to Full ASCII Code 39 can be arbitrarily changed as required or supplement. Based on indications pallet barcode together in an MS-SQL database for a variety of foils and one point in the stock. The same way was designed also the code label for the place in the warehouse reserved for each palette (Fig. 11, right).

6. Warehouse Network

In Fig. 12 we can see the interconnection and location relation client - server. The client part is in our case the device Skorpion X3. The main router Mikrotik RB2011 Skorpion connects to the internal corporate network through the wifi interface. Signal range of devices Mikrotik covers the manufacturing and office space (frequency 2.4GHz).

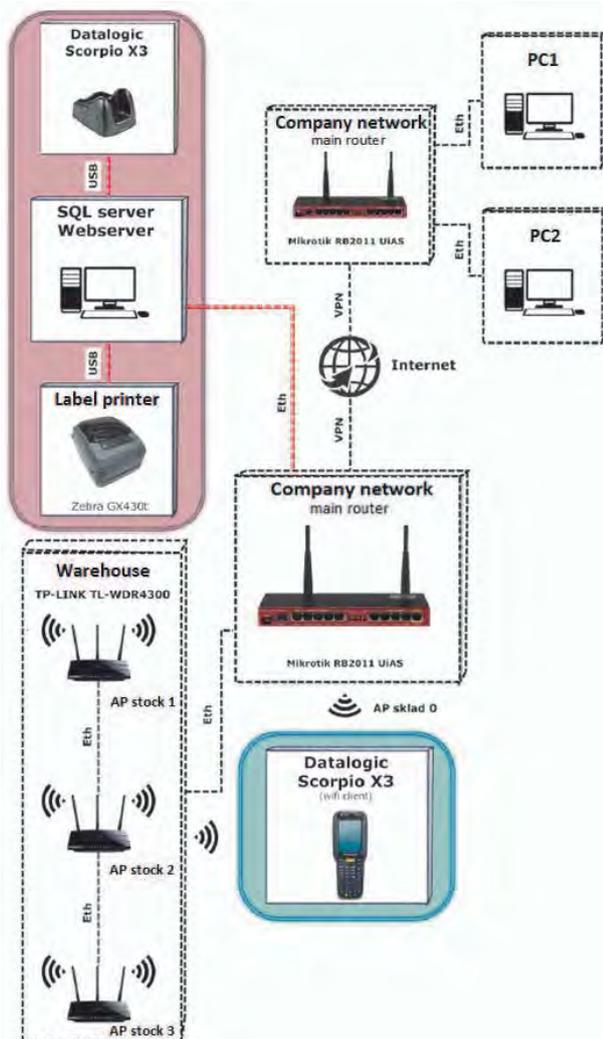


Figure 12. Warehouse network

In figure we can see also the foil warehouse where are symmetrically distributed AP devices TP-LINK TL-labeled WDR4300 to provide the WiFi connection of client device Skorpion in any warehouse or production site. Optimizing client to work interference, or poor WiFi coverage area is carried out at the highest level of design and testing, warehousing system. The storage areas are WiFi devices TP-LINK interconnected by UTP cable,

which eliminates possible errors caused by wireless transmission. The main MIKROTIK can also establish connections UTP line from any device TP-LINK from the warehouse, thereby ensuring a continuous flow of data between the client and in the future between clients and servers. The server side is a combination of docking stations Skorpion, computer work stations Server and Zebra label printers. As for server hardware that provides services at different levels can not be docking station and printer, yet these devices serve as peripherals (connected via USB), which complement the Workstation service. The workstation is connected to a local network UTP cable. Mikrotik further connects the server workstation to client devices - Skorpion the first application (physical) layer ISO. Mikrotik and operates in bridge mode, easy to manage ports (port forwarding) that you need to open the SQL data communication with the client. Output to the Internet poses a high risk of leakage and misuse of data. Secure PPTP VPN connection enables fast data exchange with a subsidiary outside the country. Using VPN, all network components behave as if UTP connection was simply one more on the physical layer. After Enabling Webserver is possible simple control of the production of any place in the world of electronic devices. In the future we plan to create a single mobile application whereby user can quickly check the status of stocks.

4. Conclusions

The main objective of this work was a concrete proposal for a system of identification products, pallets and warehouse locations using bar codes in the warehouse of company Midai, Ltd.. Labelling has been designed using self-adhesive label on which is printed a bar code or additional information. It was drafted proposal for a new layout of workplaces together with material flow. Furthermore, two variants have been designed barcode scanning, of which the company has chosen variant A, the use of a mobile terminal from Datalogic Skorpion X3. It was prepared of graphic design of labels for labeling of goods containing in addition to the QR code and area information or pre-printed logo. Labelling pallets and place consists of bar code Full ASCII code 39. At the end has been designed hardware, software and network structure to the complexity of the labeling system. The software contains a database designed in MS-SQL, "Fosklad" application created in the programming language Visual Basic for server and client part.

References

- [1] KOLAROVSKZI, P.: Warehouse management system based on selected automatic identification technology. [Online] 10 07, 2013. [Cited: 09 06, 2015.] Riga, Latvia, p. 257–264. ISBN 978-9984-818-58-0
- [2] TRULIK, S.: Object identification in industry through barcode. [Master thesis]. Žilina. 2015

GRUNDLAGEN UND POTENTIALE ZUR RESSOURCENEFFIZIENTEN TECHNOLOGISCHEN PLANUNG DER FERTIGUNG

Leif Goldhahn, Dorit Bock, Robert Eckardt

Hochschule Mittweida

Fakultät Ingenieurwissenschaften

InnArbeit – Zentrum für innovative Arbeitsplanung und Arbeitswissenschaft

Technikumplatz 17, D- 09648 Mittweida

Trennende, umformende und andere Fertigungsverfahren zur Herstellung innovativer, technisch anspruchsvoller Produkte haben eines gemeinsam: sie benötigen neben einer intakten Mitarbeiter- und Betriebsmittelstruktur auch Energie und Material als klimarelevante Ressourcen. Diese Ressourcen sind wesentliche Einflussfaktoren auf die Gesamtkostenstruktur jedes Unternehmens in der metallverarbeitenden Industrie. Darüber hinaus zeichnet sich seit Jahren eine Verknappung und damit eine Verteuerung dieser grundlegenden Produktionsfaktoren ab. Aus den genannten Gründen erscheint die Reduzierung von Energie- und Materialbedarf als wesentlicher Schritt sowohl in eine nachhaltige als auch wirtschaftliche Richtung. Die innerhalb dieses Beitrages vorgestellten Erkenntnisse thematisieren die Grundlagen zur Erarbeitung alternativer und ressourceneffizienter Fertigungsverfahren. Die Entwicklung technologischer Planungsalgorithmen, als zukünftiger Beitrag zur ressourceneffizienten Fertigung, soll darauf aufbauen. Das BMBF-geförderte Verbund-Forschungsprojekt „Entwicklung technologischer Planungsalgorithmen für ERP-Systeme in der metallverarbeitenden Industrie - TechPlan“, welches von der Hochschule Mittweida, der CIMPCS GmbH sowie der Loll Feinmechanik GmbH bearbeitet wird, trägt diesem Anspruch Rechnung.

1. Einleitung

Die globalen Megatrends, wie die Internationalisierung der Beschaffung, die wachsende Variantenvielfältigkeit von Produkten oder eine stetige Verkürzung der Produktlebenszyklen tragen in ihrer Konsequenz zu einem Paradigmenwechsel in den produzierenden Unternehmen bei. [1]

Des Weiteren gehen das stetig wachsende Wohlstandsstreben und das Wirtschaftswachstum grundsätzlich mit gesteigerten Bedarfen endlicher natürlicher Ressourcen einher. [2]

Die Thematik um die Reduzierung von Ressourcenverbräuchen, wie Energie und Material zur nachhaltigen Sicherung der Lebensgrundlage folgender Generationen, ist aktuell eines der ausführlichsten beachteten und bearbeiteten Ansätze, um den stetig steigenden Verbrauch natürlicher Ressourcen entgegenzuwirken. Die Bundesrepublik Deutschland beschloss zur Unterstützung dieser Thematik im Jahr 2002 eine Nachhaltigkeitsstrategie, welche u.a. die Paradigmen für eine nachhaltige Energiewende beinhaltet. Grundsätzlich sollen bis zum Jahr 2050 80 Prozent des erzeugten elektrischen Stroms aus erneuerbarer Energie, wie Wind oder Photovoltaik, erzeugt werden. Grundlagen zur erfolgreichen Umsetzung dieser Strategie bilden neben Gesetzen, wie dem Erneuerbaren-Energie-Gesetz oder dem Energieeinsparungsgesetz, vor allem Förderprogramme. [3]

Die sich speziell aus diesen Thematiken ergebende Diskussion um einen nachhaltigen und verantwortungsbewussten Umgang mit den begrenzten natürlichen Ressourcen und den daraus resultierenden monetären Aspekten, führen zu steigenden Ressourcenpreisen (Bild 1, am Beispiel des elektrischen Stroms). Vor allem für Unternehmen, die perspektivisch konkurrenzfähig bleiben wollen, ist die Entkopplung der Entwicklung technisch

innovativer Produkte, von den damit oft einhergehenden enormen Ressourcenbedarfen als Zukunftsziel essentiell.

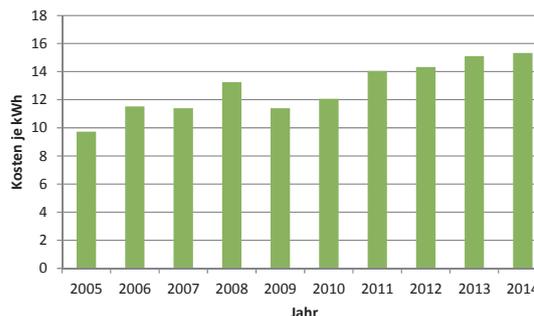


Bild 1: Strompreisentwicklung BRD [4]

Die Studie des Zentrums für Ressourceneffizienz des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) aus dem Jahr 2014 verdeutlicht sowohl das erhebliche Einsparpotential im monetären als auch im nachhaltigem Bereich. Die Kernbotschaft dieser Publikation war, dass ausgehend vom Bruttoproduktionswert eines Produktes, durchschnittlich ca. 45 Prozent für fertigungsseitig benötigtes Rohmaterial aufgewendet werden muss. [5] Das Bild 2 untersetzt diese Aussage und verdeutlicht darüber hinaus einerseits das erhebliche Einsparpotential betrieblicher Kosten und andererseits die Möglichkeit, die natürlichen Ressourcen, die für die Bereitstellung von Rohmaterial grundhaft sind, nachhaltig zu schonen.

Zum Beispiel verursacht nach [6] jedes entstandene Kilogramm Ausschuss am Ende einer spanenden Prozesskette einen Energieverlust von bis zu 22 Kilowattstunden (kWh). Weiterhin geht aus diesem Bericht hervor, dass jedes an Rohmaterial eingesparte Kilogramm Stahl einen bis zu 6 kWh geringeren Energiebedarf nach sich zieht. Der wesentliche Kern dieser Publikation ist daher, dass durch jede

materialbasiert eingesparte kWh Kohlenstoffdioxid (CO₂)-Emissionen reduziert werden können, da ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen Energieerzeugung und CO₂-Emissionen besteht.

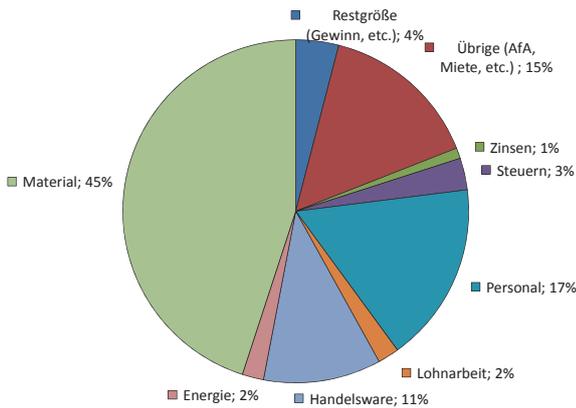


Bild 2: Unternehmenskostenstruktur [5]

Die Selektion sowie die Applikation alternativer und nachhaltiger Fertigungsverfahren, werden innerhalb der technologischen Planung spezifiziert. Der technologische Variantenvergleich, als innovativer Ansatz zur Ressourcenbedarfsreduzierung im Rahmen der Arbeitsplanung, sowie darüber hinaus als Grundlage zu entwickelnder technologischer Planungsalgorithmen, muss hierfür um geeignete energetische Bewertungsverfahren, wie bspw. eine integrierte energetische Handlungsempfehlung ergänzt werden. Beispielhaft zu nennen sind dabei die Aufgaben der Rohteilbestimmung, die Generierung und Bewertung ressourceneffizienter Fertigungsfolgen sowie die Fertigungsmittelauswahl. [7]

2. Grundlagen einer ressourceneffizienten technologischen Planung

2.1 Arbeitsplanung

Die technologische Planung – im Folgenden auch als Arbeitsplanung bezeichnet - als technologiebasierte Teilaufgabe der Arbeitsvorbereitung, umfasst „alle einmalig auftretenden Planungsmaßnahmen, welche unter ständiger Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit die fertigungsgerechte Herstellung eines Erzeugnisses (Einzelteile, Baugruppen oder Komponenten) sichern“ [8]. Das Ergebnis der Arbeitsplanung umfasst die Festlegung: **was**, **wie** und **womit** gefertigt werden soll.

Diese wesentlichen Informationen können energetisch spezifiziert und bei der Reduzierung des Energie- und Materialeinsatzes infolge einer Betrachtung und Spezifikation alternativer sowie effizienterer Fertigungsverfahren und Rohmaterialien verwendet werden.

Durch diese gezielte Neubetrachtung alternativer Fertigungsverfahren innerhalb der Arbeitsplanung können nachhaltigere Fertigungsfolgen schon in der Planungsphase bei geringem Kostenaufwand spezifiziert werden, wodurch sich u.a. eine Reduzierung der Materialkosten, des Materialverbrauchs aber auch des Energieverbrauchs ergeben wird.

Im Kapitel 3 wird die Arbeitsplanungsaufgabe

Arbeitsplanerstellung (markiert im Bild 3) detailliert, da nach [9] erhebliches Potential durch die Planung zielentsprechender (z. B. Energie- und Materialeinsparung) Fertigungsprozesse besteht. Auch die Aufgaben der Operations-, Prüf- sowie Fertigungs- und Prüfmittelplanung besitzen ein erhebliches Ressourceneinsparpotential, welches im aktuellen Verbundprojekt „Entwicklung technologischer Planungsalgorithmen für ERP-Systeme in der metallverarbeitenden Industrie“ verdeutlicht werden wird.

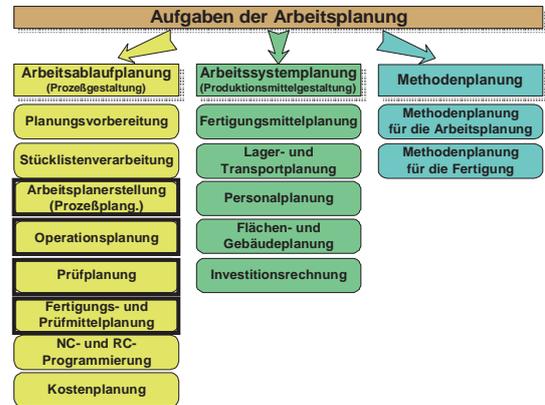


Bild 3: Aufgaben der technologischen Planung [10]

2.2 Ressourceneffizienz

Grundlegendes

Die Ressourceneffizienz tangiert alle betrieblichen Bereiche und Prozesse eines Unternehmens. [2] Dadurch erfährt vor allem die Thematik um eine effizientere Nutzung von Produktionsfaktoren immer mehr an Relevanz. Innerhalb dieses Beitrages werden unter dem Begriff Ressourcen die benötigte elektrische Energie und das zu verbrauchende Rohmaterial verstanden.

Materialeffizienz

Das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie [11] spezifiziert den Begriff Materialeffizienz als „vereinfachtes Verhältnis der Rohstoff- und Materialmenge in den erzeugten Produkten zu der Menge der dazu eingesetzten Rohstoffe und Materialien“ (vgl. Formel (1)). Eine Erhöhung der Materialeffizienz kann bspw. durch die Reduzierung von Ausschuss oder durch die Wahl alternativer Fertigungsverfahren erfolgen.

$$\text{Materialeffizienz} = \frac{\text{Masse Produkt}}{\text{Masse Rohmaterial}} \quad (1)$$

Maßnahmen zur Steigerung der Materialeffizienz sind in der Regel betriebsspezifisch.

Energieeffizienz

Nach [12] spezifiziert der Begriff Energieeffizienz „einen gewünschten Nutzen (Produkt oder Dienstleistungen) mit möglichst wenig Energieeinsatz herzustellen oder aus einem Energieeinsatz möglichst viel Nutzen zu ziehen.“

Die Energieeffizienz (vgl. Formel 2) ist daher ein „Gradmesser für die Qualität der Energieumwandlung.“ [13]

$$\text{Energieeffizienz} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Energieeinsatz}} \quad (2)$$

Die Arbeitsplanung beeinflusst deshalb die Energie- und Materialeffizienz der Fertigungsprozesse wesentlich mit.

Die Reduzierung der Energiekosten durch eine ERP-System-unterstützte dispositive Planung konnte von den Beteiligten im Forschungsprojekt „Entwicklung energetischer Planungsalgorithmen für ERP-Systeme“ [14], [15] nachgewiesen werden. Weiterhin wurde innerhalb dieses Projektes gezeigt, dass auch die technologische Planung wesentlichen Einfluss auf die Reduzierung sowohl des Materialeinsatzes als auch auf den spezifisch notwendigen Energieeinsatz hat. Eine weitere Forschungsarbeit zur Ressourceneinsparungsthematik in der technologischen Planung untermauert dies [16].

3. Potentiale einer ressourceneffizienten technologischen Planung

Innerhalb der Arbeitsplanerstellung, welche Teil der technologischen Planung ist, wurden zur Herstellung von rotationssymmetrischen Präzisionsteilen drei Fertigungsvarianten (vgl. Tabelle 1) festgelegt, daraus jeweils ein Arbeitsplan mit den entsprechenden Arbeitsgängen abgeleitet und anschließend gefertigt. Weiterhin wurden jeweils der Energie- und Materialverbrauch sowie die entsprechenden Maschinenzeiten aufgenommen, um eine Vergleichsbasis für die nachfolgenden Auswertungen zu schaffen. Die Aufnahme der dem Beitrag zugrundeliegenden Daten erfolgte durch eine studentische Belegarbeit. [17]

Die drei spezifizierten Fertigungsvarianten unterscheiden sich in der Anzahl der notwendigen Maschinen und den Bearbeitungstechnologien, was einerseits deutliche Unterschiede bei den Energie- sowie Materialbedarfen und andererseits bei den Bearbeitungszeiten mit sich bringt und damit hervorragend zur Demonstration des Einsparungspotentials geeignet ist. Die Arbeitsgänge der Fertigungsvariante 3 wurden komplett an einer Maschine durchgeführt, was bspw. den Vorteil der Einsparung von Transport- und Durchlaufzeiten nach sich zieht. Fertigungsvariante 2 hingegen unterscheidet sich zu Fertigungsvariante 3 darin, dass mehrere Maschinen zur Bearbeitung Anwendung finden, was einen Vorteil in der Flexibilität, z. B. bei Maschinenstörungen in sich birgt. Der Unterschied zur Fertigungsvariante 1 besteht darin, dass der Arbeitsgang Sägen durch das Abstechen innerhalb der CNC-Drehmaschine substituiert wurde. Diese Form des Trennens ist deutlich schneller und auch grundsätzlich energieeffizienter, da deutlich weniger Zeit zur Ausführung benötigt wird (vgl. Bild 4).

Für die Berechnung der fertigungsvariantenspezifischen Materialeffizienz werden der prozentuale Anteil des zerspannten Rohmaterials und der des Endproduktes betrachtet.

Da Reststücke noch genutzt werden, bleibt dieser Rohmaterialanteil außen vor. Die nachfolgende Berechnung dokumentiert dazu beispielhaft die Ermittlung der Materialeffizienz (MAE) der Fertigungsvariante 1 (FV1).

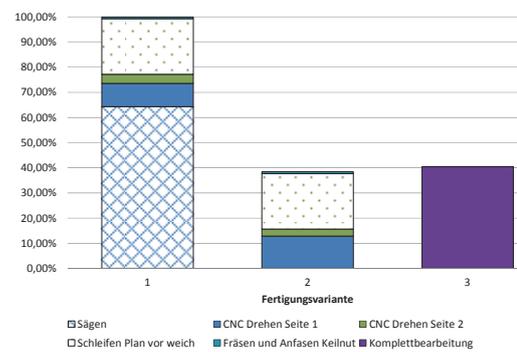


Bild 4: Energiebedarfs-Vergleich der Fertigungsvarianten

$$FV1 = \frac{\text{prozentualer Gewichtsanteil Produkt}}{\text{prozentualer Gewichtsanteil Rohmaterial}}$$

$$FV1 = \frac{25,8\%}{80,4\%} * 100\% = \underline{\underline{32,1\%}}$$

Aus dem Bild 4 und der obigen Materialeffizienzberechnung wird deutlich, welches Ressourceneinsparpotential die Festlegung einer Fertigungsvariante besitzt. Weiterhin lässt sich ableiten, dass zusätzliche Zwischenarbeitsschritte (z. B. zusätzlicher Sägearbeitsgang in FV 1) bei der Produkterstellung mehr Materialbearbeitungszuschläge bedürfen, was wiederum den Gesamtmaterialbedarf in Form von zusätzlicher Zerspanung negativ beeinflusst. Der erhöhte Materialbedarf des Sägens lässt sich technologisch mit der Breite des Sägeblatts begründen. Dies untermauern auch die Ergebnisse der Fertigungsvarianten 2 (MAE = 34,5%) und 3 (MAE = 38,9%), welche jeweils weniger Zwischenarbeitsschritte beinhalten (Tabelle 1). Allein durch die Wahl der Fertigungsfolge werden im Beispiel 17,5% Materialeinsparung erzielt.

Darüber hinaus zeigt sich, dass zusätzliche Zwischenarbeitsschritte, wie bspw. das in der Fertigungsvariante 1 eingesetzte Sägen, zu einem deutlich höheren Energiebedarf führen. Weiterhin wird deutlich, dass kein signifikanter Unterschied im Energiebedarf zwischen der Fertigungsvariante 2 und 3 besteht.

Nachfolgend ist das systematische Vorgehen stichpunktartig aufgeführt, welches versuchsbasierend zur Steigerung der Ressourceneffizienz abgeleitet und erweitert wurde:

1. Bestimmung des Rohmaterialwerkstoffes
2. Bestimmung des Rohmaterialausgangszustandes
3. Bestimmung der notwendigen Rohteildimension
4. Bestimmung geeigneter Fertigungsvarianten und Ableitung Arbeitsplan
5. Erarbeitung der notwendigen zeitlichen Auflösung der zu erwartenden Verbräuche
6. Fertigung und parallele Messung des Energieverbrauchs jedes Arbeitsgangs sowie der Maschinenzeiten
7. Materialbezogene und energetische Auswertung
8. Bewertung der erarbeiteten Parameter zur Festlegung einer Vorzugsvariante
9. Festlegung der Vorzugsvariante

10. Erarbeitung eines Arbeitsplans mit energetischen Daten in Abhängigkeit der spezifizierten Fertigungsvarianten für jedes Produkt

11. Dokumentation und Visualisierung mithilfe einer Ressourcenwertstromanalyse

Tabelle 1: Übersicht Fertigungsvariante [17]

Arbeitsgangnummer	Fertigungsvariante 1 (Halbzeug: Hülse 265/ 219 x 100)	Fertigungsvariante 2 (Halbzeug: Hülse 265/ 219 x 100)	Fertigungsvariante 3 (Halbzeug: Hülse 265/ 219 x 100)
10	Sägen	Drehen CNC Abstechen von Büchse	Drehen CNC Abstechen von Büchse
20	Drehen CNC 1.Seite	Drehen CNC	Drehen CNC
30	Drehen CNC 2.Seite	Schleifen Plan vor weich	Fräsen und Anfasen Keilnut
40	Schleifen Plan vor weich	Fräsen und Anfasen Keilnut	
50	Fräsen und Anfasen Keilnut		

4. Fazit und Zusammenfassung

Die technologische Planung als Teil des betrieblichen Auftragsabwicklungsprozesses hat wesentlichen Einfluss auf das Ressourceneinsparpotential eines Unternehmens. Damit leistet der Inhalt dieses Beitrags einen positiven Effekt zur CO₂-Reduzierung und somit auch zum Klimaschutz. Weiterhin ergaben die bisherigen Forschungsarbeiten, dass innerhalb der technologischen Planung auch weitere Aufgaben, wie die Fertigungsmittelplanung oder die Operationsplanung erheblichen Einfluss auf den Reduzierung des Energie- und Materialverbrauchs haben können. Durch die Versuche wurde auch deutlich, dass grundsätzlich zwei Handlungsebenen zur Reduzierung von Ressourcenverbräuchen existieren: die technische Handlungsebene (z. B. Veränderung von Anlagen sowie von Prozessen) und die Verhaltensebene (z. B. Sensibilisierung und Qualifizierung von Mitarbeitern). Darüber hinaus bilden die aufgezeigten Erkenntnisse die Grundlage für die weitere Entwicklungsarbeit im Forschungsprojekt TechPlan. Beispielsweise sollen technologische Planungsalgorithmen erarbeitet werden, welche die ressourceneffiziente technologische Planung mittels eines ERP-Systems realisieren sollen. Darüber hinaus werden die erarbeiteten Erkenntnisse an ausgewählten Referenzprodukten verifiziert. Weiterhin bilden die Erkenntnisse die Basis für die zu entwickelnde integrierte Handlungsempfehlung, welche die anwendenden Unternehmen mittels spezifizierter Leitfragen bei der Ressourcenreduzierung anleiten kann.

Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die finanzielle Unterstützung sowie dem Projektträger im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., für die Betreuung des Forschungsprojektes „Entwicklung technologischer Planungsalgorithmen für ERP-Systeme in der metallverarbeitenden Industrie“. Das Projekt wird vom Zentrum für innovative Arbeitsplanung und Arbeitswissenschaft der Hochschule Mittweida, der CIMPCS GmbH, sowie der Loll Feinmechanik GmbH, bearbeitet.

Literaturverzeichnis

[1] H. Loebe, E. Severing, Material- und Energieeffizienz in KMU steigern- Praxis, Bielefeld, (2012), S. 17.

[2] C. Schmid, Energieeffizienz in Unternehmen – Eine wissenschaftliche Analyse von Einflussfaktoren und Instrumenten. vdf-Hochschulverlag, Zürich, (2004)

[3] Bundesregierung: Die nationale Nachhaltigkeitsstrategie. URL: < http://www.bundesregierung.de/Webs/Breg/DE/Themen/Nachhaltigkeitsstrategie/1-die-nationale-nachhaltigkeitsstrategie/nachhaltigkeitsstrategie/_node.html >, (2015)

[4] Statistikportal, Industriestrompreise* (inklusive Stromsteuer) in Deutschland in den Jahren 1998 bis 2015. URL: < <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/252029/umfrage/industriestrompreise-inkl-stromsteuer-in-deutschland/> >, (2015).

[5] M. Weber, C. Oberender, Ressourceneffizienz im Fokus der betrieblichen Kostenrechnung. Berlin, (2014).

[6] N.N, Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovation in der Produktionstechnik. URL: < <http://www.eniprod.tu-chemnitz.de/motivation.php> >, (07. April 2010).

[7] L. Goldhahn, R. Eckardt, Potentiale der Arbeitsvorbereitung zur Steigerung der Ressourceneffizienz produzierender Unternehmen. Wissenschaftliche Schriftenreihe des Institutes für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme ISSN (0947-2495) Sonderheft 20, 2014. Chemnitz TU Chemnitz, S.237-247

[8] E. Westkämper, H.-J. Warnecke, Einführung in die Fertigungstechnik, Wiesbaden, (2006), S. 40.

[9] E. Abele, S. Schrems, P. Schraml, Energieeffizienz in der Fabrikplanung. Werkstatttechnik online, (2012).

[10] L. Goldhahn, Gestaltung des arbeitsteiligen Prozesses zwischen zentraler Arbeitsplanung und Werkstattpersonal. 137. Chemnitz: iBf. (2000)

[11] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. FAQ – Häufig gestellte Fragen. URL: < http://www.innovation-beratung-foerderung.de/INNO/Redaktion/DE/Standardartikel/go-effizient_faq.html#doc56486bodyText1 >. (30. Juli 2014).

[12] E. Müller, J. Engelmann, T. Löffler, J. Strauch, Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben. Heidelberg: Springer. (2009).

[13] J. Fresner, T. Bürki, H. Sittel, Ressourceneffizienz in der Produktion. Düsseldorf: Publishing GmbH. (2009).

[14] L. Goldhahn, D. Bock, R. Eckardt, Verfahren zur Entwicklung energetischer Planungsalgorithmen für ERP-Systeme -EnPlan-. Scientific Reports Wissenschaftliche Zeitschrift, Hochschule Mittweida, (2013).

[15] L. Goldhahn, D. Bock, R. Eckardt, ERP-Systembasierte energetische Planungsalgorithmen zur Disposition energieintensiver Fertigungsprozesse. (R. Neugebauer, & W.-G. Drossel) Innovations of Sustainable Production for Green Mobility, Proceedings Part 1, Verlag Wissenschaftliche Scripten, 647-666, (2014).

[16] R. Larek, Ressourceneffiziente Auslegung fertigungstechnischer Prozessketten durch Simulation und numerische Optimierung. Aachen, Shaker Verlag, (2012)

[17] M. Zäbe, T. Werner, T. Stephan. Erstellung eines energie- und materialeffizienten multimedialen Arbeitsplanes in der spanenden Fertigung. Mittweida. (2014)

IMPORTANCE OF GEOMETRICAL PRODUCT SPECIFICATION FOR MODERN INDUSTRY

Paweł Rosner

University of Bielsko-Biala, Willowa 2, PL43-309 Bielsko-Biala

Summary

The ISO standards for the Geometrical Product Specification (GPS) are subject to continuous development and improvement. One of the reasons is the need to keep up with the development of technology, because modern machine building industry places new demands for accuracy performance and measurement uncertainty of machine parts. The paper on a few examples illustrates the possibilities of unambiguous requirements specification.

1. Introduction

The ISO standards for the Geometrical Product Specification (GPS) among others define an language, that allows expressing requirements for the geometry of a product. The language also allows specifying in technical drawings, the requirements for the inspection process [1-4]. This allows minimising problems during the manufacturing and inspection processes.

In industrial practice, the design documentation prepared before publication new standards or new versions of GPS standards exists and is used. The owners of this documentation, i.e. construction departments, should try to update the documentation applying to existing drawings, information about the technology used to manufacture and inspect. In the drawings there should more often be used geometrical tolerances (form, orientation, location and runout). Particularly toleranced dimensions previously used should be replaced with theoretically exact dimensions and tolerance of position. In reasonable cases, to reduce manufacturing costs, there should be used maximum/least material requirement complemented by reciprocity requirement. The modifiers that can help unambiguously define measurement strategy should be widely used.

2. Tolerance of position

The use of toleranced dimension is unambiguous only for the case of feature of size [5] (Fig. 1, 2).

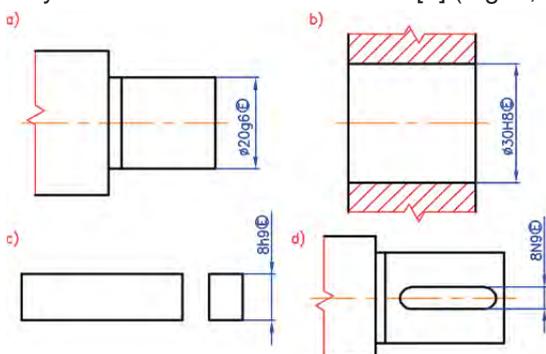


Fig. 1: Examples feature of size: a) shaft, b) hole, c) key, d) keyway

For features other than feature of size it is recommended to specify in drawing datum or datum system using theoretically exact dimension and use tolerance of position [6, 7]. With regard to the

element in Fig. 2a there are several possibilities for the unambiguous dimensioning.

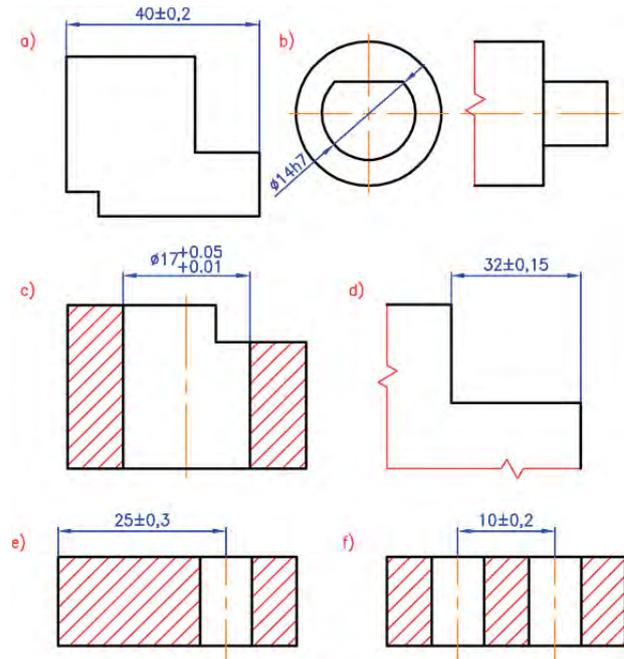


Fig. 2. Examples of dimensioning non feature of size elements: a) distance between opposite planes, b) diameter incomplete/chamfered shaft, c) diameter of incomplete hole, d) linear step dimension, e) distance between an integral and a derived feature, f) distance between two derived features

Fig. 3 and Fig. 4 present a way of geometry specification for cases where use of height meter is foreseen for inspection. In the figures as datums different surfaces are indicated.

In both cases the measurement was performed on measuring table and the dial indicator with base and gauge block stack with a length equal to the theoretically exact dimension is used. As a result of position deviation measurement the doubled highest absolute value indicated by the dial indicator should be assumed.

Another example of possibility for specification of geometry is shown in Fig. 5. In this case verification is possible by CMM. After probing it is necessary to find a pair of parallel planes, distant by the value theoretically exact dimension, best-fitted to measured points. As a criterion of the best fit the minimum value of the maximum distance of a point from the plane should be used. As the value of the position deviation the doubled distance is assumed.

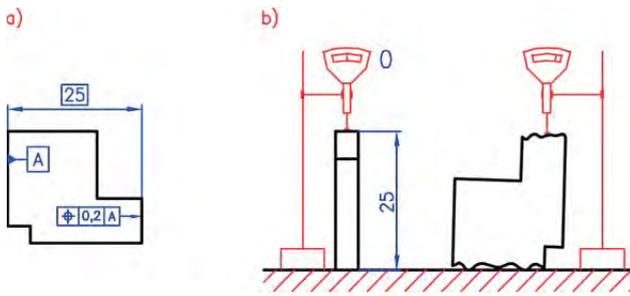


Fig. 3: Example of unambiguous specification of geometry by tolerance of position for the case where the datum is longer plane: a) specification, b) measurement scheme

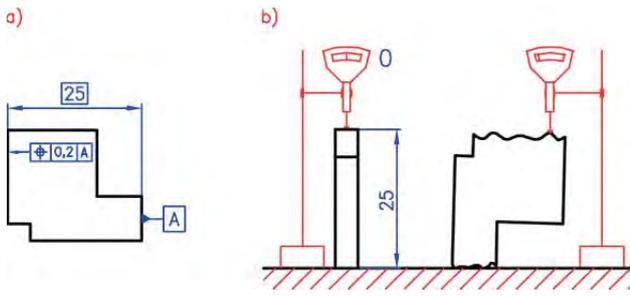


Fig. 4: Example of unambiguous specification of geometry by tolerance of position for the case where the datum is shorter plane: a) specification, b) measurement scheme

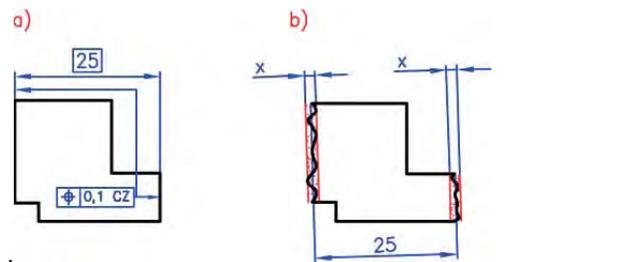


Fig. 5: Example of unambiguous specification of geometry by tolerance of position without indicating the datum: a) specification, b) way of measurement

3. Problem of orientation of tolerance zone

Example of a task that could create a problem of interpretation is tolerance of parallelism of axes (Fig. 6, 7). In the interpretation given in ISO 1101 it is shown that the planes defining the tolerance zone are "horizontal" or "vertical" depending on the orientation of the dimension line of diameter of the hole. However, one can have doubts as to whether "horizontally" ("vertically") means parallel (perpendicular) to the upper or lower base, or perpendicular (parallel) to the left or right wall or maybe perpendicular (parallel) to the common plane of holes' axes. From the viewpoint of accuracy there is practically no importance, but operator performing measurement on CMMs must make a decision and choose one of possibilities. Without a clear statement of the standard the operator's decision can be questioned.

To avoid these types of problems the ISO 1101 suggests indicating secondary datum. Fig. 8 shows a more explicit version of the requirement of Fig. 6. In this example, "horizontal" means parallel to the axis and also oriented according to a plane indicated as datum B.

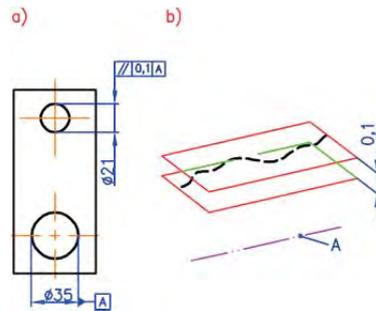


Fig. 6: Example of specification of parallelism of axes tolerance in regard to the common plane, which could rise doubts of interpretation: a) specification, b) interpretation

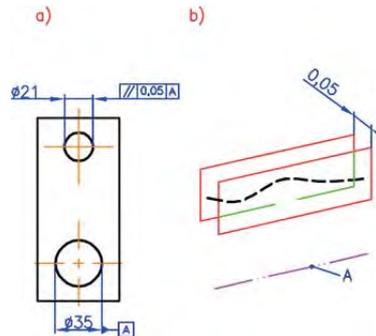


Fig. 7: Example of specification of axes parallelism tolerance in regard to the normal plane, which could rise doubts of interpretation: a) specification, b) interpretation

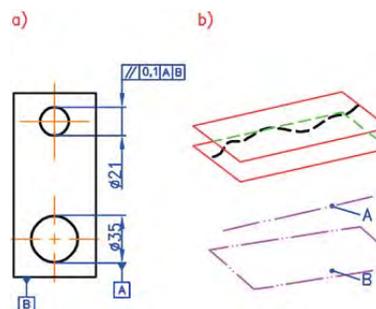


Fig. 8: Examples of unambiguous tolerance of axes' parallelism by addition a secondary datum: a) specification, b) interpretation

It is also worth to note that in addition to the cases shown in Fig. 6 and 7 there are two other cases to tolerance parallelism of axes (Fig. 9), in which the tolerance zone may define cuboid (as composition of above two cases) or cylinder.

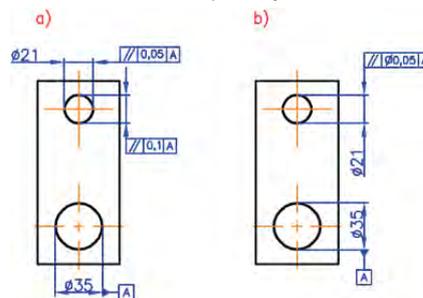


Fig. 9: Examples of ambiguous tolerance of axes' parallelism: a) cuboidal tolerance zone, b) cylindrical tolerance zone

The disadvantage of using additional datum is the fact that indicating second datum is not justified from

the point of view of functionality. Solution to the problem of ambiguity can be found in the latest edition of ISO 1101. The standard introduces the concept of indicators of auxiliary features:

- intersection plane (plane, established from an extracted feature of the workpiece, identifying a line on an extracted surface (integral or median) or a point on an extracted line),
- orientation plane (plane, established from an extracted feature of the workpiece, identifying the orientation of the tolerance zone),
- direction feature (feature, established from an extracted feature of the workpiece, identifying the direction of the width of the tolerance zone),
- collection plane (plane, established from a nominal feature on the workpiece, defining a closed compound continuous feature); compound continuous feature means feature composed of several single features joined together without gaps.

Using indicators of auxiliary features allows not to pay attention to the orientation of dimension lines (Fig. 10).

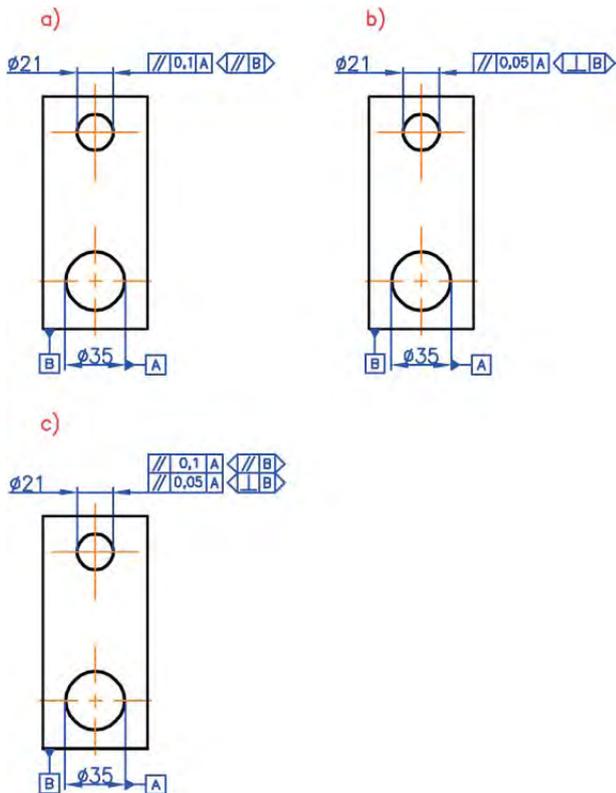


Fig. 10: Examples of use of indicators of auxiliary features – equivalent specifications: a) from Fig.6a, b) from Fig. 7a, c) from Fig. 9a

Conclusions

The publication pointed out the possibility of unambiguous specifying of geometry of products resulting from the tools available in GPS standards. This issue is important for modern industry in connection with the growing demands for accuracy performance and measurement uncertainty [8, 9]. The existing and still being in use design documentation needs to

be updated, and the staff needs training in new and updated GPS standards.

Acknowledgements

This publication was created in the project „Geometrical Product Specification and Verification as toolbox to meet up-to-date technical requirements” implemented within the program Erasmus+, KA2 - Cooperation for Innovation and the Exchange of Good Practices, Strategic Partnerships for vocational education and training.

Literature

- [1] G. Henzold, Geometrical Dimensioning and Tolerancing for Design, Manufacturing and Inspection: A Handbook for Geometrical Product Specification Using ISO and ASME Standards. Butterworth-Heinemann (2006).
- [2] Z. Humienny, P. Turek, Animated visualization of the maximum material requirement. Measurement, 45 (2012) 10, 2283-2287.
- [3] W. Płowucha, W. Jakubiec, Z. Humienny, T. Hausotte, E. Savio, M. Dragomir, P. Bills, M. Marxer, N. Wisła, L. Mathieu, Geometrical Product Specification and Verification as toolbox to meet up-to-date technical requirements. The 11th International Scientific Conference “COORDINATE MEASURING TECHNIQUE” CMT2014, Bielsko-Biała
- [4] H. Wiesner, ISO 199:2014 and ISO 492:2014 standards – complexity versus unambiguity. evolution.skf.com Nr. 1 (2015)
- [5] ISO 14405-1:2010 Geometrical product specifications (GPS). Dimensional tolerancing. Part 1. Linear sizes
- [6] ISO 14405-2:2010 Geometrical product specifications (GPS). Dimensional tolerancing. Part 2. Dimensions other than linear sizes
- [7] ISO 1101:2012 Geometrical product specifications (GPS). Geometrical tolerancing. Tolerances of form, orientation, location and run-out
- [8] W. Jakubiec, W. Płowucha, Analytical estimation of uncertainty of coordinate measurements of geometric deviations. Models based on distance between point and plane. Advances in Manufacturing Science and Technology, 37 (2013) 3, 5-16.
- [9] W. Jakubiec, W. Płowucha, First coordinate measurements uncertainty evaluation software fully consistent with the GPS philosophy. Procedia CIRP, 10 (2013), 317-322.
- [10] W. Jakubiec, Analytical estimation of uncertainty of coordinate measurements of geometric deviations. Models based on distance between point and straight line Advances in manufacturing science and technology, 33 (2009) 2, 31-38.
- [11] W. Jakubiec, W. Płowucha, M. Starczak, Analytical estimation of coordinate measurement uncertainty. Measurement, 45 (2012), 2299-2308.

SIMULATION OF A TENDON DRIVEN UNDERACTUATED FINGER

Eduard Krylov¹, Pavel Potapov²

¹Kalashnikov Izhevsk State technical University, Studencheskaya7, 426069 Izhevsk, Russia

²Moscow State Automobile and Road Technical University, Leningradsky prosp. 64, 125319Moscow, Russia

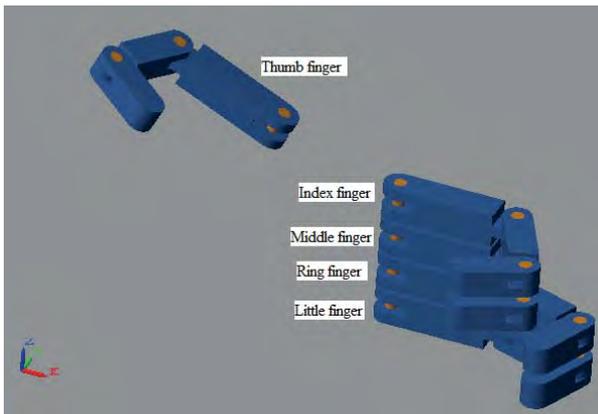
The paper presents the modelling technique of an underactuated finger of the Federico Hand in Matlab Simulink. The hand is a type of a tendon driven anthropomorphic arm. The technique suggests simulation of the tendon action on the phalanxes including special hard stop option. On the base of the model created it was shown the effect of the change in parameters on the kinematics of the phalanxes during grasping action.

1. Introduction

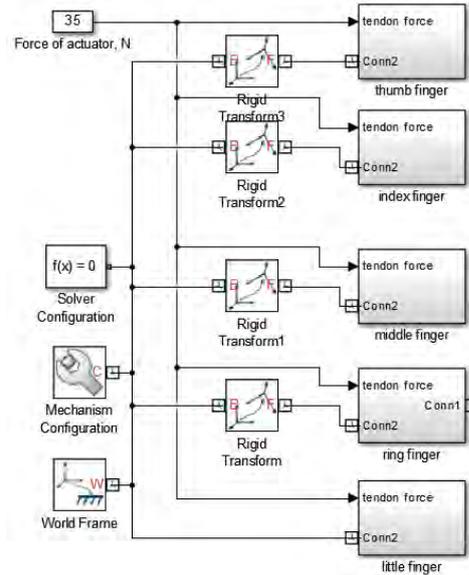
Underactuated grasping devices are of great interest because of their special properties for adaptability to the grasping object shape and variety of possible applications. Anthropomorphic tendon driven robotic hand belongs to this class of devices. Anthropomorphic Federico Hand is considered as a tendon driven robotic hand, different aspects of its operation are under consideration [1, 2, 3, 4]. The paper concerns simulation of interaction between tendon and phalanxes; the investigation was performed partially in the University of Naples Federico II, Italy.

2. Model

The 3D model of a 5-fingered hand and its Simulink scheme are presented in Fig.1. The tendons passing inside fingers are modelled by distributed forces. Force of actuator (F_a) is automatically distributed for 5 fingers: thumb, index, and middle fingers get $F_a/4$ each; ring and little finger – $F_a/8$ each. For closing up all fingers it is required the minimal actuation force of 3 N. The model runs with the following assumptions: no friction, constant distribution of tendon forces between fingers.



a) 3-D model of hand



b) Simulink scheme of hand

Fig.1: Federico Hand model

The mechanical model of a finger is illustrated in Fig. 2. The tendon goes through points A, B, C, and D and is shown by a dashed line. Tendon force acting at point A of the distal phalanx has F_x and F_{y2} components, depending on force F and constant angle δ_i of the tendon inclination with respect to the phalanx body. Here F means force acting on the phalanx after distribution of input force between all fingers. Angle δ_i measures the inclination of tendon with respect to frames attached to the phalanx at the contact points (Fig. 2). In particular, at points A and B frame axes are parallel to phalanx line $C_{i+1}C_{i+2}$, but can be situated at different distances from it. Changing the distance from points A and B to the line $C_{i+1}C_{i+2}$ one should change the projections of tendon forces acting on phalanx.

Since friction is beyond of scope, point B is acted on by F_{y1} – one of two projections of force F , depending on direction of tendon, measured by angle α .

Forces acting on the distal phalanx are found as:

$$\alpha = \beta - \delta_i$$

$$F_{y1} = F \sin(-\alpha)$$

$$F_{y2} = F \sin(-\delta_i)$$

$$F_x = F \cos(-\delta_i)$$

The projection F_y is affected by angle β which tendon (dashed line) makes with coordinate frame $x_i y_i$ at the point where the force acts. Note that the angle of tendon direction at $X_2 Y_2$ (at point B in the direction towards point C) is not equal to one at $X_3 Y_3$ (at point C in the direction towards point B). Both angles can be equal each other in the case of symmetrical location of points B and C with respect to C_{i+1} . These angles are independent on δ_1 and δ_2 .

Varying location of points B and C one can change tendon angles at these points and, hence, projections F_y , acting on phalanxes. This makes possible to affect a finger kinematics, and the order of closing of phalanxes.

A Simulink phalanx model (Fig. 3) includes the parameters of length L , width W , thickness T , peg-hole radius R and mass density. The scheme of each finger consists of main subsystems: "proximal", "medial", "distal", three "hard stops" and main blocks: three "revolute joints" and blocks for output angles and torque values.

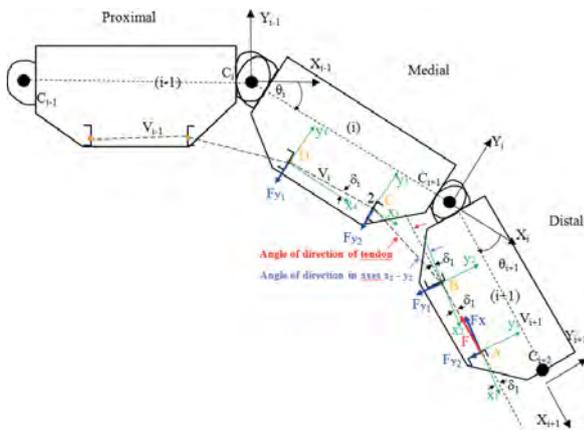


Fig. 2: Mechanical model of a finger

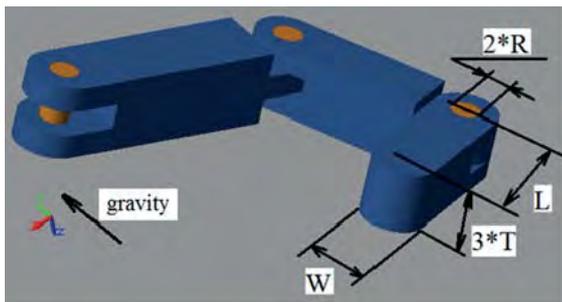


Fig. 3: Simulink phalanx model

The model includes "Rigid Transform" and "Revolute Joint" blocks. For simulation of the force of interaction between phalanxes a special subsystem "Hard stop" is used, located under each "Revolute Joint" block, which operates with input torque and angular velocity (Fig. 4). When distal phalanx reach "lower bound", "Hard stop" block applies a torque in revolute joint of distal phalanx for stopping rotation, but also an opposite torque in medial phalanx should be applied. In the real prototype, the torque generated by "Hard stop" and opposite torque (to medial phalanx) corresponds to the force of contact

acting to the distal ($F_{c,d}$) phalanx and opposite of the contact force ($F_{c,m}$), acting on the medial phalanx (Fig. 4).

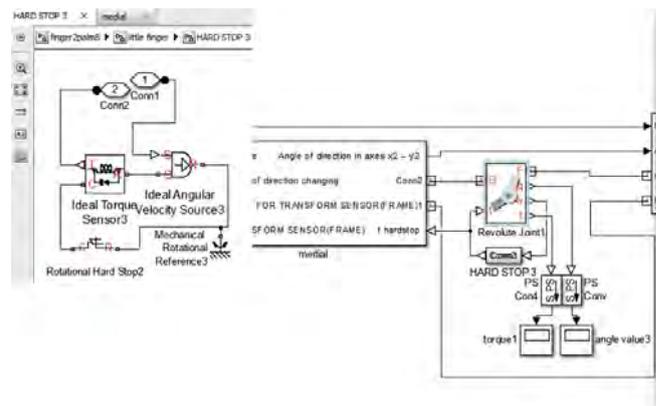


Fig.4: Hard Stop subsystem

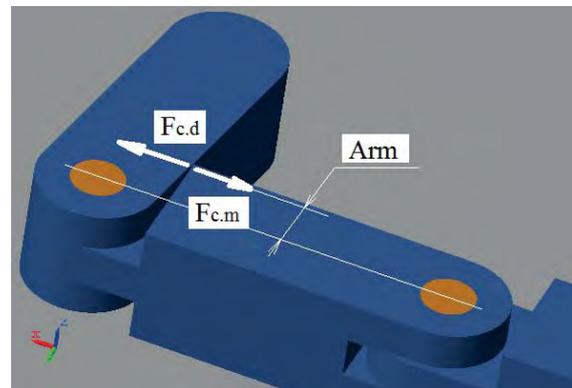


Fig. 5: Opposite forces, acting on 2 different phalanxes

3. Test

The aim of the tests was to discover the kinematic behavior of one finger depending on position of application of tendon forces. In Fig. 6 one of these points is denoted as "for force1" and marked by blue color. Points of the tendon acting on the phalanxes (called "for force" points) are located by distance d , which takes different values for different points "for force". Distance d is expressed in terms of width W . Besides, there is a tendon point in metacarpal (in Fig. 6 axes $X_7 - Y_7$ are shown left of the finger, near to "XYZ" directions of "World Frame") for calculating the angle of the tendon direction in proximal rotational joint. When the finger is in the initial position (Fig. 6), the tendon is along a straight line and parallel to the body's centerline.

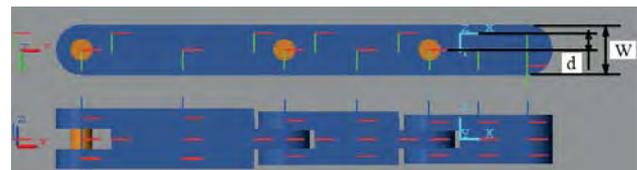
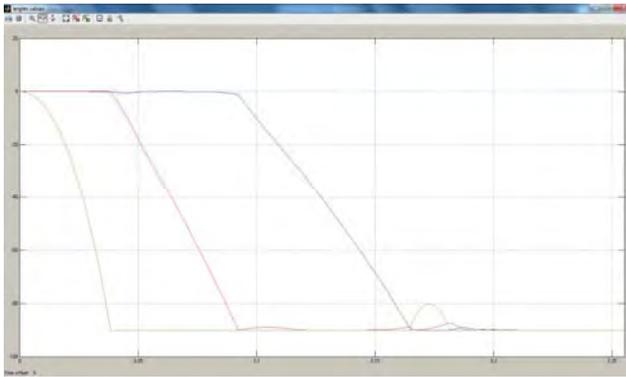


Fig. 6: Location of axis "for force"

For the first test it was adopted distance $d = 0.85 \times (W/2)$. The results of simulation in terms of "angle value" of each "Revolution Joint" is shown in Fig. 7. It is seen that phalanxes close one by one.



Green line – distal phalanx
 Red line – medial phalanx
 Blue line – proximal phalanx

Fig. 7: Results of test 1 – closure one by one

To get the results more suitable for finger’s grasping motion it was adopted a new configuration of the finger in Fig. 8, where “for force” points are indicated by yellow dots. Initial position is specified by: proximal phalanx – 5 degrees, medial phalanx – 5 degrees, distal phalanx – 0 degrees. Actuation force applied to finger is $F = 1 \text{ N}$.

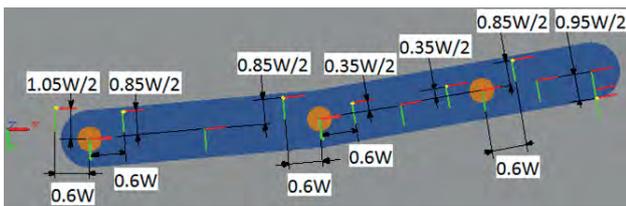


Fig. 8: Location of axis “for force”, test 2

Now the medial and proximal phalanges are closing together. The medial (red line) and the proximal (blue line) phalanges begin to move before distal one stops (see Fig.9, about 0.045 s). After the distal is closed (about 0.052 s), the medial and proximal move together (fig. 23, after 0.052 s).

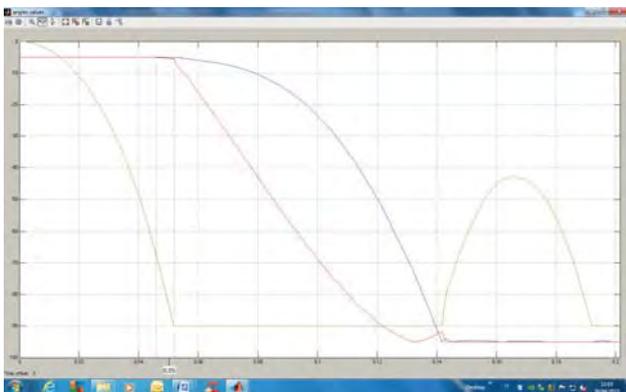


Fig. 9: Results of test 2 – closure in the designed order

In Fig. 9 the finger closes (time 0.0875 s.), the distal is already closed, the medial and proximal are closing. Fig. 10 illustrates all forces and torques acting on the finger at 0.0875s.

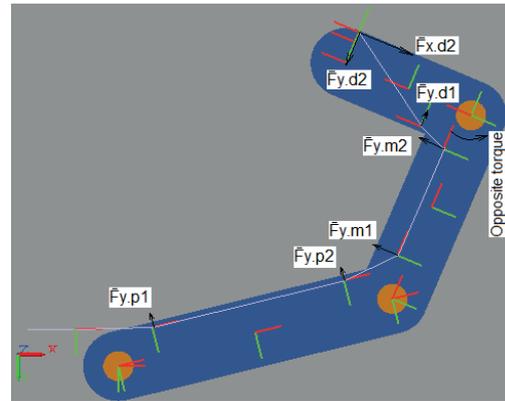


Fig. 10 Test 2: Model in action at time 0.0875 s.

The opposite torque acts towards the medial, because the torque of the “Hard Stop” block already acts towards the distal; another revolute joint will have a “Hard Stop” torque to the medial and opposite torque towards the proximal, when the medial phalanx will reach 90 degrees (Hard Stop), with respect to the proximal. The results of Test 4, are more suitable for grasping objects because the tendon force is optimally distributed between phalanges in this configuration. Besides, the obtained order of phalanges motion contributes to a better adaptation to the grasping object.

5. Conclusion

Behavior of the finger model is identical to real tendon prototype’s behavior and depends on locations of the tendon’s “sliding” points inside each phalanx. X and Y components of acting forces in all “sliding” points change during time of grasping and are calculated on the base of direction angles.

The necessary future subject of investigation should be, in authors opinion, simulation of contact forces between phalanges and grasping object.

Acknowledgements

Special thanks to Professor Cesare Rossi and Doctor Sergio Savino (UNINA, Naples) for coordination and kind support of the investigation.

References

- [1] Fiore P., Niola V., Pisani G., Rossi C., Savino S., Troncone S., “A model of a robotic hand based on a tendon driven mechanism”, Proc. of 22th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region, Portorož, Slovenia, September 11-13, 2013.
- [2] Rossi C., Savino S., “An underactuated multi-finger grasping device”, International Journal of Advanced Robotic Systems, Volume 11, Issue 1, 17 February 2014, Article number 20.
- [3] V. Niola, C. Rossi, S. Savino, S. Troncone “An Underactuated Mechanical Hand” Proceedings of the RAAD 2014 23rd International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region September 3-5, 2014, Smolenice Castle, Slovakia
- [4] Niola V., Rossi C., Savino S., Potapov P. “ Dynamic Behaviour of an Underactuated Finger”, Proc. of RAAD 2015: The International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube, Bucharest, Romania, May 27-29, 2015.

SCIENTIFIC REPORTS

WISSENSCHAFTLICHE BERICHTE

The main aspect of the Scientific Reports is to promote the discussion of modern developments in research and production and to stimulate the interdisciplinary cooperation by information about conferences, workshops, promotion of partnerships and statistical information on annual work of the Hochschule Mittweida (FH) University of Applied Sciences. This issue will be published sporadically. Contributors are requested to present results of current research, transfer activities in the field of technology and applied modern techniques to support the discussion among engineers, mathematicians, experts in material science and technology, business and economy and social work.

Journal of the University of Applied Sciences Mittweida
Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule Mittweida

Hochschule Mittweida
University of Applied Sciences
Referat Forschung
PF 1457
D-09644 Mittweida

Tel: +49 (0) 3727 / 58 1264
Fax +49 (0) 3727 / 58 21264

© Hochschule Mittweida
University of Applied Sciences
Technikumplatz 17
D-09648 Mittweida