

## Klassifikation von Abweichungen an Prüfwerkstücken und Optimierung von Regelparametern

# Assistenzsystem für effiziente Maschinenabnahme

M. Frisch, R. Ströbel, A. Puchta, J. Fleischer

**ZUSAMMENFASSUNG** Bei der Abnahme von Werkzeugmaschinen und der Einstellung von Regelparametern wird aktuell sehr viel Fachwissen des Maschinenbedieners benötigt. Um den Prozess zu beschleunigen und die Abhängigkeit von diesem Wissen zu reduzieren, wird ein Assistenzsystem, das den Bediener unterstützt und von ihm lernen kann, benötigt. In diesem Beitrag wird ein Konzept für ein System, das die Maschinenabnahme und Parametereinstellung kombiniert vorgestellt.

### STICHWÖRTER

Messen/Steuern/Regeln, Automatisierung, NC-Technik

## Classifying deviations in test workpieces and optimizing control parameters – Worker Assistance for Machine Acceptance

**ABSTRACT** A great deal of expertise on the part of the machine operator is currently required for the acceptance of machine tools and the setting of control parameters. In order to accelerate the process and reduce dependence on this knowledge, an assistance system is needed that supports the operator and can learn from him. This article presents a concept for a system that combines machine acceptance and parameter setting.

## 1 Einleitung

Bei Werkzeugmaschinen (WZM) dient die Maschinenabnahme als Überprüfung und Sicherstellung ihrer Funktionsfähigkeit und Qualität [1]. Bei Einzeckmaschinen, die ein bestimmtes Teil produzieren sollen, kommen dabei statistische Methoden zum Einsatz, die die Prozessfähigkeit und -beherrschung überprüfen sollen [2]. Bei Universalmaschinen, deren Anwendungszwecke zum Herstellungszeitpunkt noch nicht oder nur eingeschränkt absehbar sind, bieten sich standardisierte Prüfwerkstücke zur Überprüfung der Maschineneigenschaften an. Im Gegensatz zur direkten Messung der Maschineneigenschaften ermöglichen diese Aussagen über die Fertigungsgenauigkeit unter Realbedingungen auch ohne den Einsatz von aufwendiger Messtechnik in der Maschine [3]. Von diesen müssen jedoch mehrere gefertigt werden, um systematische und zufällige Einflüsse differenzieren und quantifizieren zu können [4]. Verschiedene Normen beschreiben unterschiedliche Prüfteile und Prüfregele, die sowohl auf die Prüfung direkt qualitätsrelevanter Eigenschaften wie geometrischem und thermischem Verhalten aber auch auf sekundäre Eigenschaften wie Geräuschemissionen abzielen können [5].

Allen Prüfteilen gemein ist, dass sie nur Aussagen über die aktuelle Ist-Qualität von Bauteilen, die auf einer Maschine gefertigt werden können, liefern. Die nachgelagerte Transferleistung, wie diese Qualität verbessert werden kann, muss der Maschinenbediener selbst treffen [6]. Dies wird zusätzlich dadurch erschwert, dass die Abnahmeteile nicht für die Parameteroptimierung ausgelegt wurden und dadurch die Zusammenhänge nicht einfach ersichtlich sind. Daher wird eine große Menge an Prozessverständnis und Erfahrung benötigt, die im Zuge des

Fachkräftemangels immer weniger vorhanden ist. So berichteten 2022 etwa 87 % der Maschinenbauunternehmen, dass Stellen für Fachkräfte offen sind [7]. Im Zuge dessen ist die Sicherung des vorhandenen Wissens und das Einlernen und Befähigen von unerfahrenen Bedienern durch technische Assistenzsysteme von zunehmender Relevanz.

Ein weiterer Aspekt der Befähigung von WZM, die viel Erfahrung, Wissen und Prozessverständnis erfordert, ist die optimale Einstellung der Parameter der Vorschubachsenregelung. Aufgrund der Vielzahl an Anforderungen bezüglich Dynamik, Genauigkeit, Energieeffizienz und weiteren Aspekten ist eine pauschale Antwort, wie genau die Parameter einzustellen sind, nicht möglich [8]. Hersteller von Maschinensteuerungen wie zum Beispiel Siemens bieten zwar eine automatisierte Einstellung der Regelung an [9], diese kann jedoch keine optimalen Ergebnisse garantieren. So wird zum Beispiel nur eine beschränkte Auswahl der einstellbaren Parameter optimiert. Maschinenhersteller stellen deshalb die Parameter im Zuge der Abnahme oft händisch nach, was viel Zeit erfordert. Zuletzt stellt auch der erfahrene Maschinenbediener die Parameter nach, um zum Beispiel die Bearbeitungszeit zu reduzieren [10].

In diesem Beitrag wird ein Ansatz vorgestellt, der die zwei Felder Ableitung von Handlungsmaßnahmen aus der Maschinenabnahme und optimale Einstellung der Regelparameter kombiniert und mittels eines Assistenzsystems den Maschinenbediener bei beidem unterstützt. Dafür sollen Abweichungen von der Sollgeometrie am gefertigten Prüfstück erkannt und nach ihrem Ursprung an der Maschine klassifiziert werden. Anschließend werden Handlungsempfehlungen vorgeschlagen, um die Parameter zu optimieren und das Fertigungsergebnis zu verbessern.

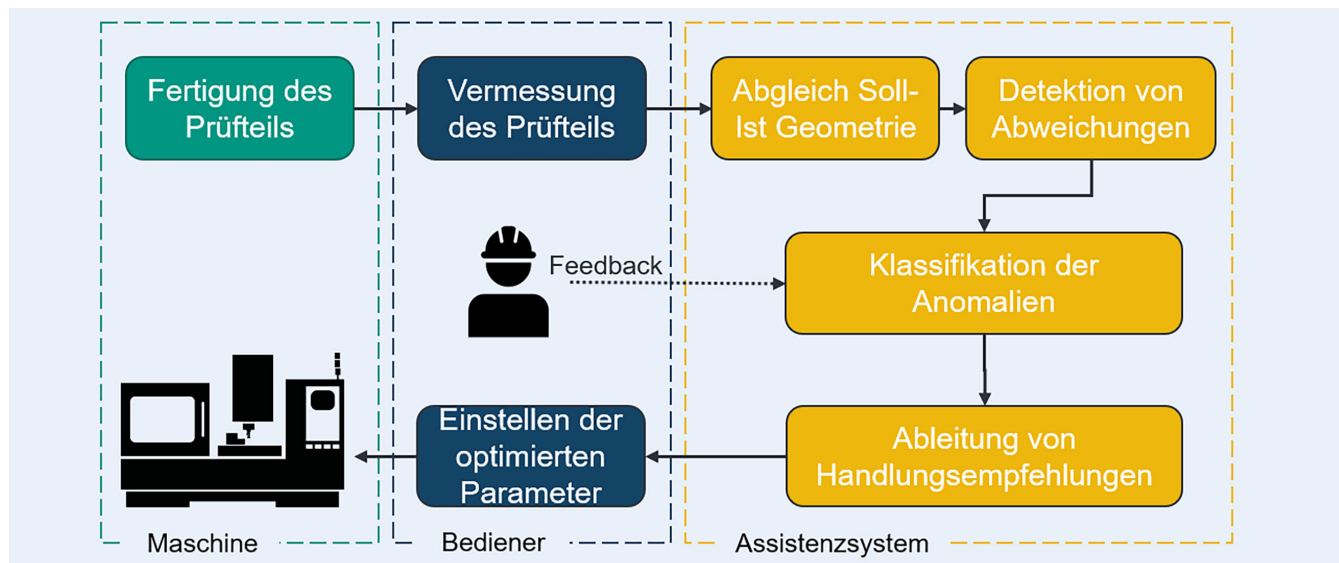


Bild 1. Ablaufdiagramm für die Parametereinstellung mit dem Assistenzsystem. Grafik: Eigene Abbildung

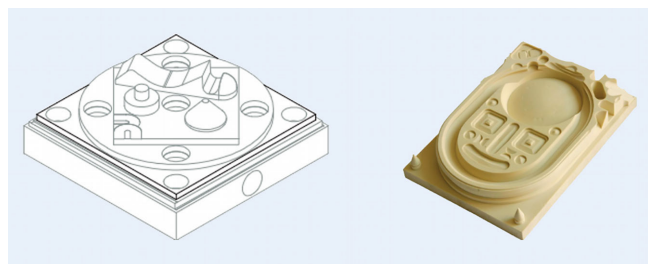


Bild 2. Prüfwerkstück nach VDI 5211 Blatt 1 (links) und nach Blatt 2 (rechts). Grafik: [11] bzw. [12]

Der Bediener kann anschließend Feedback geben, ob die empfohlenen Strategien erfolgreich waren und seiner Ansicht nach das Verbesserungspotenzial korrekt identifiziert wurde. Der Ablauf ist in **Bild 1** exemplarisch dargestellt. Durch diese Kombination der Parametereinstellung und der Abnahme wird der Personalaufwand reduziert und die Qualität der Maschineneinstellung sichergestellt.

## 2 Stand der Technik

Der für den vorgestellten Ansatz relevante Stand der Technik umfasst einerseits verschiedene Prüfstücke, die für die Abnahme von WZM genutzt werden können, und andererseits aktuell verwendete und alternative Strategien zur Einstellung der Regelung. Beides wird im Folgenden kurz behandelt.

### 2.1 Abnahmestücke

Allgemeine Vorteile der Maschinenabnahme mittels Bearbeitungstests sind die erreichbare Genauigkeit der Beurteilung, ohne dabei genauere Messgeräte in der Maschine zu erfordern, und der sehr anschauliche Nachweis der Bearbeitungsfähigkeiten. Bisher war die Zuordnung von Werkstückgenauigkeiten zu Maschineneigenschaften jedoch häufig nicht möglich [6], was eine aufwendige Fehlersuche erforderlich macht – an dieser Stelle soll das vorgeschlagene System zum Einsatz kommen.

Die genaue Gestaltung der eingesetzten Prüfwerkstücke variiert je nachdem, welche Aspekte der Maschine geprüft werden sollen. Eines, das sehr viele Aspekte in einem einzelnen Teil vereint, ist in **Bild 2** (links) dargestellt [11]. Die gut optisch differenzierbaren, einzelnen Elemente wie Bohrungen, Kegel, Platten und weitere bieten die Möglichkeit, die verschiedenen Bestandteile der Genauigkeit separat zu überprüfen. So soll die oben erwähnte Einschränkung von allgemeinen Prüfwerkstücken, dass die Maschineneigenschaften daraus nur schwer ablesbar sind, umgangen werden. Während dadurch ein guter Überblick über die Maschine ermöglicht wird, benötigt dieses Prüfwerkstück durch die vielen Einzelelemente eine eher lange Bearbeitungszeit, weswegen es sich nicht für eine iterative Operation eignet.

In **Bild 2** (rechts) dargestellt ist ein Prüfstück, das die 5-Achs-Simultan-Bearbeitung überprüfen soll [12]. Auch hier sind durch die einzelnen Elemente die Aspekte der Maschine gut voneinander trennbar, im Gegensatz zum links dargestellten Teil, das auf die Überprüfung von 3-Achs-Maschinen abzielt, ist hier der Fokus auf simultanen Änderungen von translatorischen und rotatorischen Achsen.

Ein für den vorliegenden Zweck besonders interessantes Prüfwerkstück ist in **Bild 3** [13] dargestellt. Auch dieses ist primär für die Evaluierung von 5-Achs-Maschinen besonders im Bereich der Luftfahrt konzipiert. Durch die geringe Anzahl an zu fertigenden Elementen ist es außerdem auch für wiederholte Fertigung gut geeignet. Nachteilig daran ist allerdings, dass nicht sichergestellt ist, dass die Vielzahl von verschiedenen Einflussparametern auf das Fertigungsergebnis anhand dieses optisch recht einfachen Bauteils erfolgreich differenziert werden kann. Es hat sich jedoch aufgrund seiner Umsetzung von 5-Achs-Freiformflächen, die durch ihre Komplexität Aussagen über die Eignung aller Achsen treffen können, als Standard etabliert.

### 2.2 Parametrisierung der Regelung

Die Regelung einer WZM ist in Form einer Kaskade aufgebaut: Der oberste Regelkreis ist die Positionsregelung, die nächste Stufe ist die Geschwindigkeitsregelung und der innerste Kreis die Stromregelung. Dadurch ergeben sich drei ineinander verschach-

telte Regelkreise, die sich gegenseitig beeinflussen und deren Parameter für optimale Ergebnisse zueinander passend eingestellt sein müssen. Allgemein werden kaskadierte Regler „von innen nach außen“ eingestellt [14], wodurch Wechselwirkungen der Kreise jedoch nur beschränkt beurteilt werden können.

Die erste Einstellung der Regelparameter findet häufig über Einstellregeln statt. Für allgemeine PID-Regler sind primär die Einstellregeln nach Ziegler-Nichols (beispielhaft in [15] beschrieben) relevant. Dabei wird die Strecke als ein PT1-Glied mit Totzeit angenommen, dessen Verzugszeit, Ausgleichszeit und stationäre Verstärkung aus der Sprungantwort bestimmt werden können. Für den Einsatz in WZM sind die Regeln nicht ideal, da sie instabiles Verhalten während des Einstellens nicht ausschließen, was zu dauerhaftem Maschinenschaden führen kann [16].

Um insbesondere die Problematik der Robustheit gegen Instabilität zu umgehen, bieten sich alternative Einstellverfahren basierend auf vorgegebenen Amplituden- und Phasenreserven an [17]. Auch diese eignen sich nur für simple Systeme mit nur einem Regler, da sie die Wechselwirkungen zwischen Kaskadenkreisen nicht betrachten.

Eine Möglichkeit, die Regler nicht getrennt, sondern als Einheit einzustellen, sind Metaheuristiken wie zum Beispiel genetische Algorithmen. Sowohl für PID-Regler [18] als auch für Kaskadenregelung [19] zeigen sie gute Ergebnisse, die die der klassischen Verfahren deutlich übertreffen. Um die Suchzeit einzuschränken und die Stabilität zu verbessern, können letztere dennoch genutzt werden, um einen Ausgangspunkt festzulegen. Nachteilig ist die Notwendigkeit für ein sehr gutes Maschinenmodell, um die nötige Anzahl an Parametersätzen zu testen. Verzichtet man auf dieses Modell und erprobt jeden einzelnen Satz auf der realen Maschine, steigt die benötigte Zeit stark an. Zusätzlich müsste zumindest die Stabilität der vorgeschlagenen Parameter im Vorhinein sichergestellt werden, um Maschinenschaden zu verhindern.

Ein neuer Ansatz, der die Regelstruktur grundsätzlich in Frage stellt, ist die Model Predictive Control [20]. Dabei wird ein Prozessmodell genutzt, um das zukünftige Verhalten der Strecke vorherzusagen und die Regelparameter entsprechend anzupassen. Dadurch wird ein Großteil des Auslegungsaufwands von der Reglerauslegung auf die Erstellung des Modells verschoben. Bisherige Untersuchungen im Kontext der WZM nutzen diese Methodik, um beispielsweise die Vorschubrate ideal einzustellen [21]. Sie eignet sich nach bisherigen Untersuchungen vor allem für übergeordnete Prozessregelungen oder grobe Anpassungen, die Achsregelungen können damit Stand jetzt noch nicht ersetzt werden.

Der Ansatz, an dem sich der hier vorgestellte am nächsten orientiert, ist die Iterative Learning Control. Dabei wird eine sich wiederholende Bewegung genutzt, um in einem iterativen Prozess die Parameter der Regelung so einzustellen, dass die Abweichung mit jeder Iteration abnimmt. Für einen PID-Regler wurde dies bereits erfolgreich umgesetzt [22] und auch für eine Kaskadenregelung zeigten sich bereits vielversprechende Ergebnisse [23]. Die Parameter konvergieren in letzterem Fall nach etwa 5 – 10 Iterationen. Jedoch werden umständliche Kostenfunktionen benötigt, deren genaue Gewichtung wieder einen Experten benötigt. Zusammenfassend ist die Optimierung von Regelparametern im Kontext der WZM ein weiterhin relevantes Themengebiet, auf dem bereits viele Ansätze erprobt wurden und werden. Der Einstellungsaufwand ist aktuell sehr hoch und erfordert viel Erfahrung. Die Einbindung des Einstellprozesses in die Maschinen-

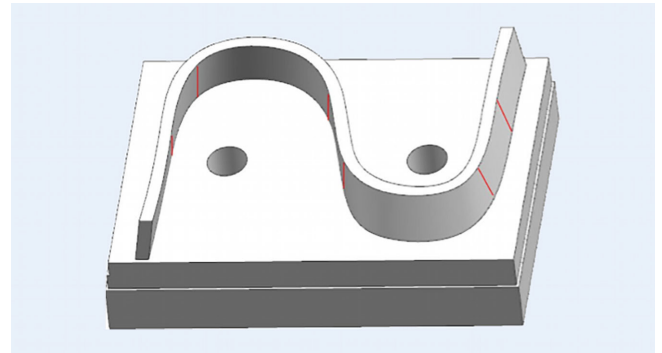


Bild 3. S-förmiges Prüfwerkstück. Grafik: [13]

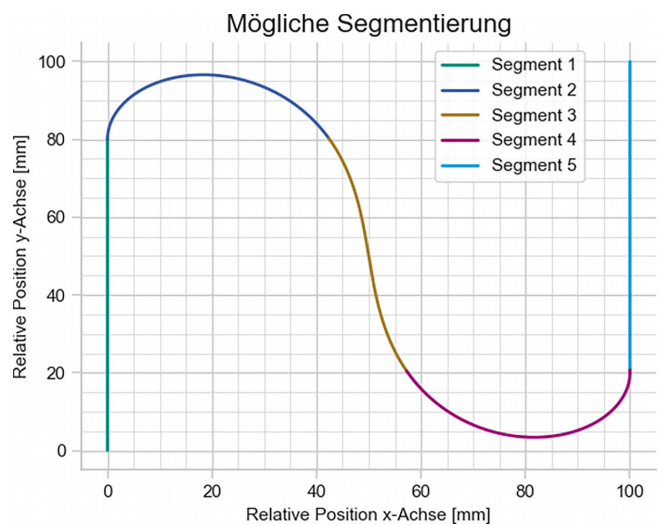


Bild 4. Mögliche Segmentierung einer Prüfgeometrie. Grafik: Eigene Abbildung

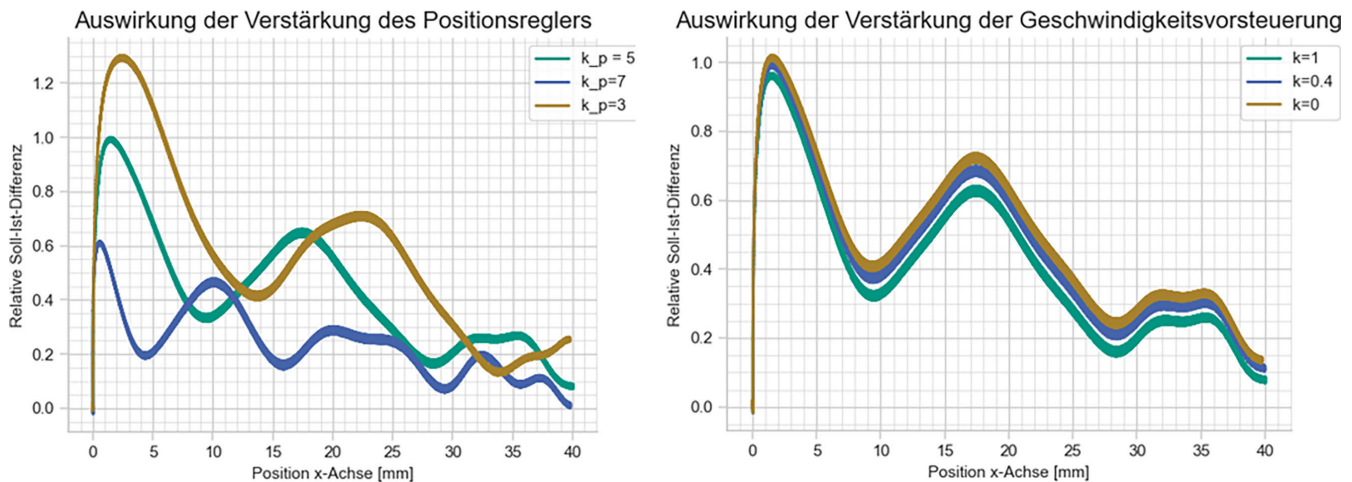
abnahme verspricht, die Komplexität zu reduzieren und den Fertigungsprozess als Ganzes zu optimieren.

### 3 Beschreibung des Ansatzes

Der Ansatz teilt sich nach dem Soll-Ist-Vergleich und der Detektion von Abweichungen in drei Teilschritte auf: die Klassifikation der Abweichungen, die Optimierung der entsprechenden Parameter und das Weiterlernen des Systems basierend auf Feedback. Um möglichst genaue Ergebnisse zu erzielen, wird die gefahrene Trajektorie vorher in Abschnitte unterteilt, die zunächst getrennt voneinander betrachtet werden. Dies ist beispielhaft in Bild 4 dargestellt. Die genaue Segmentierungsmethodik wird anhand von charakteristischen Verhaltensweisen und den entworfenen Klassifikatoren und Regressoren so gestaltet, dass sie maximalen Erkenntnisgewinn liefert.

#### 3.1 Klassifikation der Geometrieabweichungen

Im ersten Schritt werden die Abweichungen nach ihrer Ursache an der Maschine klassifiziert. Aufgrund des Einsatzes des Assistenzsystems in der Maschinenabnahme liegt der Fokus dabei auf den Maschinenparametern und insbesondere den einstellbaren Parametern der Regelung und weniger auf den „Programmparametern“ wie Vorschubgeschwindigkeit oder Spindeldrehzahl.



**Bild 5.** Auswirkung der Verstärkung des Positionsreglers (links) und der Geschwindigkeitsvorsteuerung (rechts) auf die Soll-Ist-Differenz der x-Achse. Grafik: Eigene Abbildung

Aufgrund der nichtlinearen Zusammenhänge der Maschinendynamik und auch des Regelkreises können letztere allerdings nicht auf einen konstanten Wert gesetzt und anschließend ignoriert werden. Folglich gilt es bei der Gestaltung des Prüfstückes, die Einflüsse zu beachten und alle relevanten Bereiche der Programmparameter abzudecken. Je nach Natur der Zusammenhänge werden dabei verschiedene Faktorstufen und -kombinationen betrachtet. Dies ist analog zu gängigen Methoden des Design of Experiments zu verstehen.

Bei der Klassifikation kommen mehrere Verfahren zum Einsatz. Um die Komplexität des Problems zu reduzieren, wird eine Klassifikationskaskade angestrebt: Anstelle also alle möglichen Klassen von Abweichungsursprüngen in einem einzelnen Schritt und Verfahren zu unterscheiden, wird die Differenzierung in mehrere Teilunterscheidungen aufgeteilt. Erster Ausgangspunkt bei jedem Klassifikationsschritt ist dabei das Wissen und Verständnis des Maschinenherstellers, um möglichst klar verständliche und begründbare Regeln zu formulieren. In den vielen Fällen, in denen dies nicht ohne weiteres und allgemeingültig möglich ist, kommen Verfahren des maschinellen Lernens zum Einsatz. Diese eignen sich besonders für hochkomplexe Probleme mit vielen Einflussgrößen. Da dafür große Mengen an Daten von Nöten sind, werden zusätzlich zu Versuchen an realen Maschinen auch Simulationen der Achsen betrachtet. Dadurch lassen sich besonders relativ kleine Veränderungen an Parametern deutlich schneller und einfacher untersuchen, als wenn jede Permutation einen realen Fertigungsverfahren erfordert. Der grundlegende Ansatz, die Segmentierung zunächst an simulierten Daten zu entwerfen und anschließend an realen Daten zu testen, wurde bereits vielversprechend erprobt [24] und nun ausgeweitet.

Indikatoren für die Machbarkeit der Klassifikation sind in **Bild 5** dargestellt. In qualitativen Simulationsdurchläufen wurden die Proportionalverstärkung des Positionsreglers (links) beziehungsweise die Verstärkung der Geschwindigkeitsvorsteuerung (rechts) variiert. Die Kurven wurden für die bessere optische Vergleichbarkeit auf den Maximalwert des jeweils mittleren Werts normiert. Es sind optisch klare Unterschiede erkennbar: Die Verstärkung des Positionsreglers beeinflusst nicht nur den Betrag der Positionsabweichung, sondern verschiebt auch Maxima oder fügt bei steigendem Wert auch neue lokale Maxima hinzu. Die Geschwindigkeitsvorsteuerung beeinflusst lediglich den Betrag

der Abweichung. In diesem Fall wäre die Klassifikation des zu geringen Wertes für zum Beispiel anhand der Höhe des ersten Maximums relativ zum zweiten Maximum möglich. Ähnliche Untersuchungen werden auch für die anderen Einflussparameter wie Verstärkungen des Geschwindigkeitsreglers, Integrations- und sonstige Zeitkonstanten oder Filterparameter durchgeführt.

### 3.2 Optimierung der Parameter

Nachdem im vorangegangenen Teilschritt die Ursache der Geometrieabweichungen des Prüfstückes identifiziert wurden, werden nun Handlungsempfehlungen abgeleitet, um die Abweichungen zu verringern. Dadurch wird am Ende des Optimierungsprozesses ein freigegebenes Prüfstück und somit eine abgenommene Maschine erzielt. Dabei wird iterativ vorgegangen, bei wiederholten Prüffertigungen werden also die vorangegangenen Durchläufe ebenfalls betrachtet, um die Auswirkung von weiteren Parameteränderungen abzuschätzen und sich an Optima und Sättigungsgrenzen der Parameter anzunähern. Dabei gilt es insbesondere, Schäden an der Maschine zu vermeiden. Demnach werden bei Unklarheiten zunächst weniger kritische Parameter geändert, und Parameter höherer Kritikalität im ersten Schritt eher konservativ angepasst und der iterative Charakter des Vorgehens genutzt. Dadurch können auch Wechselwirkungen zwischen den nicht unabhängig betrachteten Parametern abgeschätzt und kompensiert werden. Um den Aufwand der zusätzlichen Durchläufe gering zu halten, werden verstärkt maschineninterne Daten für die ersten Anpassungen verwendet. Dadurch werden die Umspannvorgänge zwischen Maschine und Koordinatenmesssystem verringert.

Als zusätzliche Sicherheitsmaßnahme spricht das System im ersten Entwicklungsstatus nur Handlungsempfehlungen aus, die der Maschinenbediener noch kontrollieren und gegebenenfalls ignorieren kann. Langfristiges Ziel ist die komplette autarke Funktion, dazu sind jedoch ausgiebige Testläufe nötig.

### 3.3 Weiterlernen des Assistenzsystems

Um die kontinuierliche Funktionalität zu sichern und auch langfristig zu verbessern, wird Feedback des Maschinenbedieners eingesetzt, um Fehlfunktionen zu korrigieren und neuartige



Zustände einzuordnen. Dabei kommen Aspekte des Incremental Learning [25] zum Einsatz: Das Assistenzsystem erkennt demnach unbekannte Zustände und bittet aktiv um Hilfestellung, diese zu klassifizieren und optimieren zu können. Die dann vom Bediener getroffenen Maßnahmen werden verarbeitet und in einer langfristigen Wissensbasis abgespeichert. Dadurch kann der Zustand beim nächsten Auftreten korrekt erkannt und die erworbenen Fähigkeiten zu Verbesserung eingesetzt werden.

Neben unbekannten und neuen Zuständen wird das Weiterlernen auch bei vorher eintrainierten und bekannten Szenarien eingesetzt. Da der Maschinenbediener letztlich die Entscheidung trifft, ob und wenn ja welche der vorgeschlagenen Änderungen er umsetzt, kann die Wissensbasis des Systems mit dieser Entscheidung erweitert werden. Dadurch werden „unsinnige“ Vorschläge, die zum Beispiel die Produktivität der Maschine um ein nicht akzeptables Maß senken, langfristig eliminiert. Aus der Literatur sind verschiedene Ansätze von Incremental und Active Learning bekannt, die für den Anwendungszweck des Assistenzsystems erprobt und kombiniert werden. Dadurch wird das System von einer puren Checkliste zu einer echten Unterstützung des Bedieners bei der Maschinenabnahme und -befähigung.

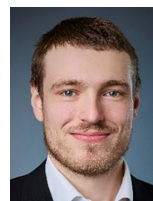
## 4 Ausblick

Nach der anfänglichen Betrachtung des Konzepts gilt es nun, die Methoden vertieft umzusetzen und dadurch die reale Nutzbarkeit herzustellen. In zukünftigen Arbeiten werden die aktuell verwendeten Simulationsmodelle anhand realer Maschinendaten verbessert und validiert. Abhängig davon werden weitere Regeln und Klassifikatoren entworfen, um die Einschätzung und Optimierung des Maschinenzustands erfolgreich umsetzen zu können. Die bisher als Ansätze formulierten Konzepte für das Assistenzsystem, die Segmentierung und die Klassifikationen werden praktisch umgesetzt und an realen Maschinen erprobt.

Außerdem werden die erwähnten Verfahren des Incremental Learning umgesetzt und für die Anwendung im Assistenzsystem optimiert. Dazu muss auch eine geeignete Kommunikationsschnittstelle mit dem Bediener entwickelt werden, die dessen Wissen zur Verbesserung des Systems nutzbar macht ohne ihn bei der Arbeit zu behindern oder übermäßig zu beanspruchen. Dazu werden iterative Verbesserungen in der Entwicklung umgesetzt, um das Ziel der Unterstützung des Bedieners effektiv umsetzen zu können.

## LITERATUR

- [1] Hirsch, A.; Regel, J.: Werkzeugmaschinen und Vorrichtungen: Anforderungen, Auslegung, Ausführungsbeispiele. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2022
- [2] Conrad, S.; Dietrich, E.: Abnahme von Maschinen und Fertigungseinrichtungen. 4. aktl. Auflage. München: Hanser 2020
- [3] Brecher, C.; Weck, M.: Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme. Berlin, Heidelberg: Springer 2017
- [4] VDI/DQG-Richtlinie 3441: Statistische Prüfung der Arbeits- und Positioniergenauigkeit von Werkzeugmaschinen - Grundlagen. VDI/DQG 1971
- [5] DIN ISO 230: Prüfregeln für Werkzeugmaschinen. DIN ISO 2012
- [6] Weck, M.; Brecher, C.: Werkzeugmaschinen 5: Messtechnische Untersuchung und Beurteilung, dynamische Stabilität. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2006
- [7] VDMA: Anteil der Maschinenbauunternehmen mit offenen Stellen in Deutschland nach Berufen in den Jahren 2019 und 2022. Statista. 18. November 2022
- [8] Loose, T.: Angewandte Regelungs- und Automatisierungstechnik: Ingenieurwissenschaftliche Grundlagen mit Beispielen und industriepraktischen Anwendungen. Berlin, Heidelberg: Springer 2022
- [9] Siemens AG: Sinumerik 840D Inbetriebnahmehandbuch. Siemens 2006
- [10] Brecher, C. (Hrsg.): Realisierung effizienter Zerspanprozesse: Ergebnisbericht des BMBF Verbundprojekts Reffiz. Aachen: Shaker Verl 2015
- [11] VDI/NCG 5211: Prüfrichtlinien und Prüfwerkstücke für hochdynamische Bearbeitungen (HSC) - Blatt 1 2013
- [12] VDI/NCG 5211: Prüfrichtlinien und Prüfwerkstücke für hochdynamische Bearbeitungen (HSC) - Blatt 2 2013
- [13] Shi, W. et al.: Comprehensive analysis and evaluation of the geometric errors of the rotating axis of five-axis double-pendulum machine tools based on S-shaped samples. Int J Adv Manuf Technol. (2023), S. 5135–5148
- [14] Huang, H.P. et al.: A simple method for tuning cascade control systems. Chemical Engineering Communications (1998), S. 89–121
- [15] Patel, V.V.: Ziegler-Nichols Tuning Method: Understanding the PID Controller. Reson (2020), S. 1385–1397
- [16] Garpinger, O.; Hägglund, T.; Åström, K.J.: Performance and robustness trade-offs in PID control. Journal of Process Control (2014), S. 568–577
- [17] Åström, K.J.; Hägglund, T.: Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins. Automatica (1984), S. 645–651
- [18] Meena, D.C.; Devanshu, A.: Genetic algorithm tuned PID controller for process control. International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC) (2017), S. 1–6
- [19] Ivanova, D.; Valov, N.; Deyanov, M.: Application of the genetic algorithm for cascade control of a HVAC system. In: Mastorakis, N.; Mladenov, V.; Bulucea, A. (Hrsg.): MATEC Web Conf. (2019)
- [20] Schwenzer, M. et al.: Review on model predictive control: an engineering perspective. Int J Adv Manuf Technol. (2021), S. 1327–1349
- [21] Stemmler, S. et al.: Model Predictive Feed Rate Control for a Milling Machine. IFAC-PapersOnLine (2016), S. 6–11
- [22] Kim, Dong-Il; Kim, Sungkwun: An iterative learning control method with application for CNC machine tools. IEEE Trans on Ind Applicat. (1996), S.66–72
- [23] Jung, H. et al.: Iterative Feedback Tuning of Cascade Control of Two-Inertia System. IEEE Control Syst Lett. (2021), S.785–790
- [24] Song, Z. et al.: Analysis for mapping relationship among CNC machine dynamic performance and S-shaped specimen contour errors. China Mechanical Engineering Magazine Office (2016)
- [25] Van De Ven, G.M.; Tuytelaars, T.; Tolias, A.S.: Three types of incremental learning. Nat Mach Intell. (2022), S.1185–1197




**Marvin Frisch, M.Sc.** 

marvin.frisch@kit.edu

Foto: KIT wbk

**Robin Ströbel, M.Sc.** 

**Alexander Puchta, M.Sc.** 

**Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer** 

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

wbk Institut für Produktionstechnik

Rintheimer Querallee 2, 76131 Karlsruhe

www.wbk.kit.edu

## LIZENZ



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