

doi.org/10.37544/1436-4980-2026-05-105
Datum der Einreichung: 18.02.2026
Datum der Annahme: 27.03.2026
Datum der Veröffentlichung: 24.06.2026

Untersuchung des Krieeffektes an piezoaktuerten Strukturen

Genauigkeitslimitierung in der Fehlerkompensation

E. Uhlmann, M. Polte, T. Pache, F. Triebel, N. Bergström

ZUSAMMENFASSUNG Die Arbeitsgenauigkeit von Werkzeugmaschinen wird durch Prozesskraft-induzierte Verlagerungen des tool center points limitiert. Eine aktive Kompensation kann die resultierenden geometrischen Abweichungen am Bauteil reduzieren. In diesem Beitrag wird das Kriechverhalten einer zweiachsigen piezoaktuerten Kompensationseinheit experimentell bestimmt und mathematisch modelliert. Ein analytischer Kriechoperator beschreibt den nichtlinearen Zusammenhang mit einem RMSE $\leq 0,152 \mu\text{m}$ und bildet die Grundlage für eine genauigkeitssteigernde Vorkompensation.

STICHWÖRTER

Mechatronik, Messen/Steuern/Regeln, Werkzeugmaschinen

Investigation of the creep effect on piezo-actuated structures – Accuracy limitation in error compensation

ABSTRACT The operational precision of machine tools is constrained by the process force-induced displacements of the tool center point. Active compensation is capable of reducing the resulting geometric deviations on the workpiece. In this article, the creep behavior of a two-axis piezo-actuated compensation unit is determined empirically and modeled mathematically. An analytical creep operator delineates the nonlinear nature of the relationship, exhibiting an RMSE of $\leq 0.152 \mu\text{m}$. Thus, it establishes the foundation for implementing accuracy-enhancing compensation measures.

1 Einleitung

Hochpräzise Werkzeugmaschinen (WZM)-basierte Fertigungsprozesse werden von der europäischen Kommission als eine Schlüsselkompetenz für eine hohe Wirtschaftskraft sowie strategische Resilienz eingestuft [1]. Genauigkeitslimitierende Störeinflüsse, wie beispielsweise Prozesskraft-induzierte Verlagerungen δ_{TCP} des tool center points (TCP), stellen bei der Fertigung hochpräziser Bauteile eine besondere Herausforderung dar. Uhlmann et al. [2] und Kianinejad et al. [3] haben gezeigt, dass durch den Einsatz eines zweiachsigen piezoaktuerten Kompensationstisches Positionierfehler, insbesondere von inaktuellen WZM, kompensiert werden können. Der Terminus „inaktuell“ meint dabei den Umstand, dass für die betreffende WZM ein umfassendes Retrofit notwendig wäre, um sie gemäß dem Stand der Technik und den korrespondierenden Genauigkeitsanforderungen weiterbetreiben zu können [3]. Bei dem eingesetzten Kompensationstisch handelt es sich um ein mechatronisches System, welches in Anlehnung an den von Dürkop et al. [4] beschriebenen plug-and-produce-Ansatz (PuP) die x- und y-Achse des Maschinentisches einer WZM mit redundanter Sensorik und Aktorik versieht – nachfolgend „Add-on“ genannt. Dem PuP-Ansatz wird dabei insofern Rechnung getragen, als dass das Add-on zum einen keinen Rückgriff auf die native Maschinensteuerung benötigt, sondern lediglich die aktuelle Position des TCP der WZM ausliest und zum anderen nach einmaligem Einmessen und Parametrieren auf der WZM nach wechselndem Bedarf zum Einsatz gebracht werden kann. Es wird beabsichtigt, das von Uhlmann et al. [2] und Kianinejad et al. [3] beschriebene Konzept dahingehend zu

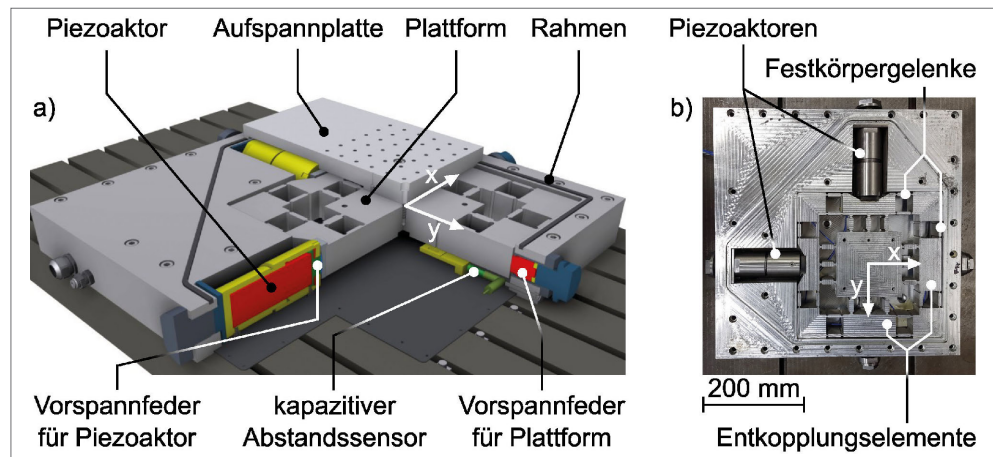
erweitern, das durch den Einsatz von Piezoaktoren und das Werkstoffverhalten bedingte nichtlineare Verhalten des Add-on vorzukompensieren.

Prozesskraft-induzierte Verlagerungen δ_{TCP} des TCP können unter anderem aufgrund sensorischer Limitierung oder ortsveränderlicher Maschinensteifigkeiten von der nativen WZM Steuerung nicht erfasst und daher nicht von dieser ausgeglichen werden. Das Add-on soll den Maschinenbediener in die Lage versetzen, diese systemischen Unwägbarkeiten zu überbrücken und Prozesskraft-induzierte Verlagerungen δ_{TCP} des TCP während der Bearbeitung zu kompensieren.

Bei nativen Retrofits werden zumeist viele WZM-Komponenten oder ganze Subsysteme ausgetauscht, was mit unproduktiven Umbau- und somit Stillstandszeiten einhergeht. Demgegenüber wird mit dem PuP-Ansatz des Add-ons eine wesentlich niederschwelligere Strategie verfolgt, um die Arbeitsgenauigkeit inaktueller WZM zu steigern und so deren wirtschaftlichen Weiterbetrieb zu ermöglichen. Dabei kommen Piezoaktoren im Add-on zum Einsatz, für deren externe Regelung lediglich eine unidirektionale Schnittstelle zur WZM erforderlich ist. Über diese wird die jeweils aktuelle Position p_{TCP} des TCP bereitgestellt, wie Uhlmann et al. [5] beschreiben.

Im Rahmen eines aktuellen Forschungsvorhabens am Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb IWF der Technischen Universität Berlin wird außerdem untersucht, inwiefern sich der Anwendungsbereich des Add-on prozesssicher auf modulare Werkzeugmaschinen erweitern lässt. Elmaraghy [6] und Koren [7] haben das wirtschaftliche Potenzial modularer WZM-Konzepte hinsichtlich bedarfsgerechter Rekonfigurierbarkeit und erhöhter

Bild 1 Zweiachsiger Kompensationstisch (Add on) [5];
a) gerendertes CAD-Modell in Schnittdarstellung;
b) Draufsicht ohne Aufspannplatte.
Grafik und Foto: IWF [5]



Flexibilität in der Produktion herausgestellt. Modularität in der Gestalt von WZM geht jedoch mit Einbußen hinsichtlich ihres dynamischen Verhaltens einher, wie unter anderem *Landers et al.* [8] und *Hung et al.* [9] darlegen. Diesen Einbußen muss durch kompensatorische Maßnahmen begegnet werden, um ein für fertige Unternehmen attraktives Gesamtkonzept zu begründen.

Liseli et al. [10] und *Rakotondrabe et al.* [11] beschreiben die Möglichkeit, Piezoaktoren auf Basis ihrer ferroelektrischen Eigenschaften zusätzlich zur bloßen Realisierung einer Stellbewegung auch zur Schätzung äußerer Kräfte F_{ext} einzusetzen, beispielsweise der wirkenden Prozesskräfte F_p zwischen Werkzeug und Werkstück. Ebenso erklären sie, dass sich hierbei das für Piezoaktoren charakteristische Hysterese- und Kriechverhalten limitierend auf die Genauigkeit der Kraftschätzung auswirken. Darin besteht somit die größte Herausforderung zur Realisierung der Kompensation Prozesskraft-induzierter Verlagerungen δ_{TCP} des TCP mithilfe des Add-ons.

In den folgenden Kapiteln wird insbesondere auf das Phänomen des Kriechens näher eingegangen, welches sich direkt aus dem Aufbau des Add-ons ergibt. Es wird dargelegt, wie daraus die titelgebende Genauigkeitslimitierung resultiert, wie sie quantifiziert und kompensiert wird.

2 Versuchsaufbau und theoretische Vorbetrachtung

2.1 Der zweiachsige Kompensationstisch

In **Bild 1** ist das am IWF entwickelte Add-on gezeigt. Die beiden wesentlichen Komponenten des Add-ons stellen die zwei senkrecht zueinander positionierten Piezoaktoren vom Typ „PSt 1000/25/125 VS35“ der Firma Piezosystem Jena GmbH, Jena, sowie die mittels Festkörpergelenken gelagerte Plattform dar. Auf Letztere üben die Piezoaktoren bei Anliegen der Piezoaktorspannung U_A eine proportionale Piezoaktorkraft F_A aus und realisieren so eine Auslenkung $d \leq 60 \mu m$ der Plattform in der jeweiligen Raumrichtung, abhängig von der über die Vorspannfedern eingestellte Vorspannung. Die Auslenkung d wird mittels kapazitiver Abstandssensoren des Typs „CS1“ der Firma Micro-Epsilon Messtechnik GmbH, Ortenburg, in x- und y-Richtung erfasst. Das Add-on selbst ist aus der hochfesten Aluminiumlegierung EN AW 7075 gefertigt. Dies gewährleistet eine hohe Belastbarkeit insbesondere im Bereich der Festkörpergelenke. Die gesamte Datenakquise sowie die Positionsregelung des Add-ons erfolgen über

ein Echtzeitsystem vom Typ „Adwin Gold III“ der Firma Jäger Computergesteuerte Messtechnik GmbH aus Lorsch.

2.2 Ursachen und Modellierung des nichtlinearen Verhaltens

Aus dem beschriebenen Aufbau lässt sich bereits die grundlegende Neigung des betrachteten Systems zu nichtlinearem Verhalten antizipieren. Beispielhaft sind hier die Hysterese und das Kriechen im Übertragungsverhalten von der Piezoaktorspannung U_A auf die Auslenkung d zu nennen [12]. Beide Effekte sind in unterschiedlichen zeitlichen Größenordnungen dominant, von Sekundäreinflüssen abhängig, zum Beispiel Temperatur ϑ und Änderungsrate der Piezoaktorspannung $\dot{U}_A$, und beeinflussen sich im Allgemeinen gegenseitig [12]. In diesem Beitrag soll das Kriechverhalten näher betrachtet werden. Dieses ist zurückzuführen auf die zeitlich veränderliche Nachpolarisation der ferroelektrischen Kristalle im Piezoaktor bei konstanter Piezoaktorspannung U_A . Dadurch unterliegt die Beziehung zwischen Piezoaktorspannung U_A und der Auslenkung d einer ausgeprägten nichtlinearen Drift, welche erst mit erheblicher Zeitverzögerung ein quasistationäres Gleichgewicht¹ erreicht. Zur Beschreibung dieses Verhaltens existieren zahlreiche analytische, numerische und KI basierte Ansätze [13–15]. *Jung und Gweon* [16] schlagen ein logarithmisches Kriechmodell vor, welches dem in Formel 1 dargestellten Zusammenhang genügt. Dieser Modellierungsansatz wurde auch im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendet, da er sparsam in den Parametern und in einer Echtzeit-Kompensationsroutine leicht zu implementieren ist. Im Unterschied zur Arbeit von *Jung und Gweon* [16] soll allein die überlagernde langsame Systemdynamik erfasst werden, das heißt ohne die oben genannten Wechselwirkungen mit dem hysteretischen Verhalten. Des Weiteren soll damit nicht allein das Kriechverhalten der Piezoaktoren modelliert werden, sondern das der gesamten mechanischen Wirkungskette von den Piezoaktoren über die Entkopplungselemente und Festkörpergelenke sowie über die Plattform und die Vorspannfedern. Dies stellt die effektive Größe dar, welche die kapazitiven Abstandssensoren erfassen und welche im Sinne der Kompensation der Verlagerungen δ_{TCP} des (TCP) und der Kraftschätzung von Interesse ist.

¹ Dieses kann dann als erreicht betrachtet werden, sobald keine Unterscheidung vom überlagernden Messrauschen mehr möglich ist.

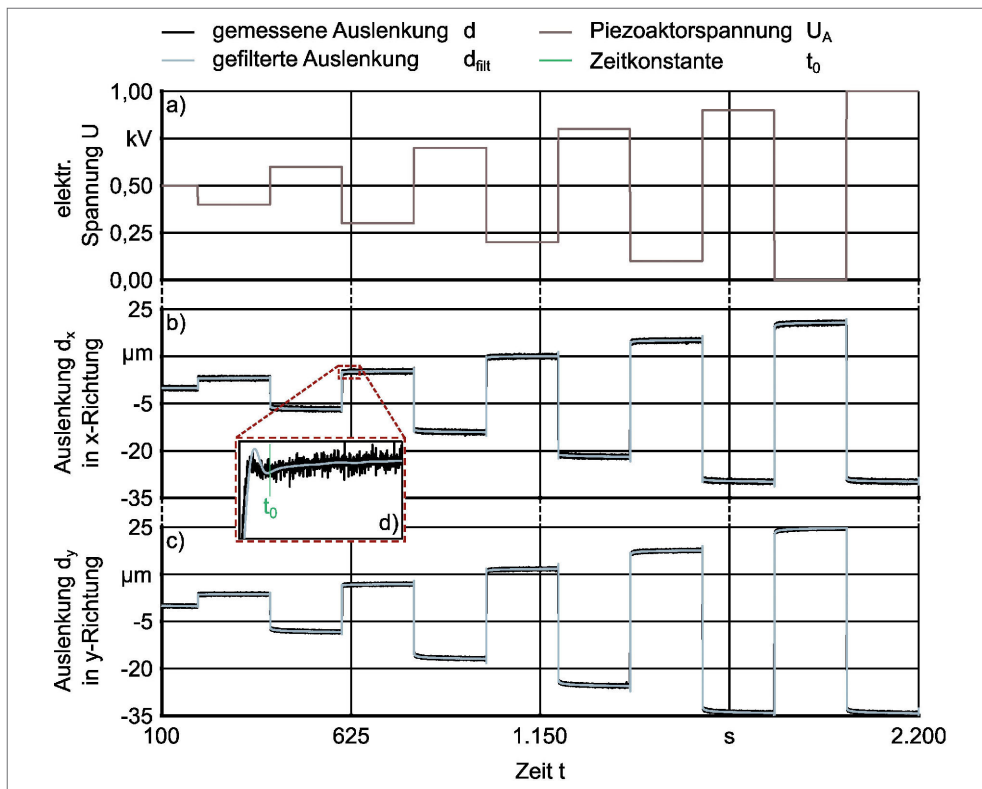


Bild 2 Ergebnisse der experimentellen Messungen; a) Sprungsequenz der Piezoaktorspannung U_A ; b) Auslenkung d_x in x-Richtung; c) Auslenkung d_y in y-Richtung; d) Übergang zwischen transientem und Kriechbereich.

Grafik: IWF

$$\hat{d}(t) = d_0 \left[1 + \gamma \log_{10} \left(\frac{t}{t_0} \right) \right] \quad (1)$$

Die durch das Modell beschriebene zeitlich veränderliche Auslenkung $\hat{d}(t)$ hängt demnach von der nominellen Anfangsauslenkung d_0 , dem Kriechfaktor γ sowie der charakteristischen Zeitkonstanten t_0 ab. Die nominelle Anfangsauslenkung d_0 stellt sich unmittelbar nach einer Änderung der Piezoaktorspannung U_A zum Zeitpunkt $t = t_0$ ein und stellt in diesem Modell somit den Startpunkt des Kriechens dar. Dieser Zusammenhang ist in Kapitel 3.1 näher ausgeführt. Wie in Kapitel 3.2 gezeigt wird, liegt die Nichtlinearität nicht allein im logarithmischen Verlauf der Auslenkung d begründet, sondern auch in den nicht konstanten Parametern d_0 , γ und t_0 . Es wird angemerkt, dass mit Kriechfaktor $\gamma = 0$ die Gleichung eine zeitlich invariante Sprungantwort beschreibt.

2.3 Experimentelle Untersuchung des Kriechverhaltens

Damit das Kriechen trotz der evidenten Wechselwirkung mit dem hysteretischen Verhalten isoliert betrachtet werden kann, muss der zeitliche Verlauf der Piezoaktorspannung $U_{A(t)}$ eine geeignete Anregung der Piezoaktoren gewährleisten. Daher wurde, anders als durch Jung und Gweon [16], hierfür eine Sprungsequenz mit langen Haltezeiten $t_H = 200$ s gewählt. Ausgehend von einer Piezoaktorspannung $U_A = 500$ V wird gemäß Formel 2 eine alternierende Folge ($U_{A,i}$) von $N_U = 10$ Spannungsniveaus realisiert, siehe auch Kapitel 3.1.

$$\frac{U_A}{V} = (-1)^i 100i \Big|_{i=1}^{N_U} \quad (2)$$

Beide Piezoaktoren wurden unabhängig voneinander mit dieser Sprungsequenz über eine Gesamtzeit von $t_{ges} = 2200$ s beaufschlagt. Simultan wurde die jeweilige Auslenkung $d_{x/y}$ der Platt-

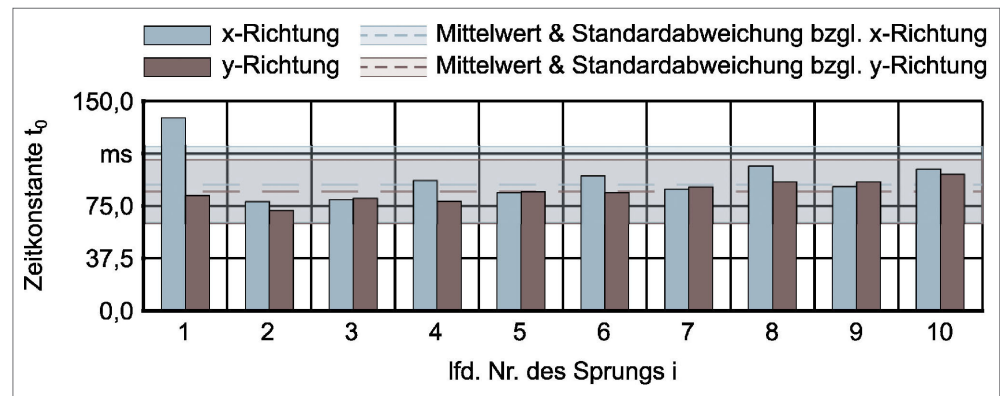
form gemessen. Beide Größen wurden mit einer konstanten Abtastfrequenz $f_s = 4000$ Hz aufgezeichnet. Sowohl in x- als auch in y-Richtung wurden zur Herstellung vergleichbarer Randbedingungen die Vorspannfedern mit einem Drehmoment $T = 20$ Nm vorgespannt.

3 Ergebnisse

3.1 Ergebnisse der Messung

Das Bild 2 zeigt die Ergebnisse der experimentellen Untersuchung des Kriechverhaltens. Bild 2 a) stellt den Zeitschrieb der in Formel 2 definierten Sprungsequenz mit einer Haltezeit $t_H = 200$ s dar. Davon abhängig sind in Bild 2 b) und Bild 2 c) die gemessene Auslenkung $d_{x/y}$ in x- beziehungsweise y-Richtung dargestellt. Die unter Wirkung der Piezoaktorspannung U_A messbare maximal und minimal realisierbare Auslenkung unterscheiden sich um $\Delta d_{x/y,max} \approx 4,04 \mu\text{m}$ beziehungsweise um $\Delta d_{x/y,min} \approx 4,49 \mu\text{m}$. Die ebenfalls in Bild 2 b) und Bild 2 c) dargestellte gefilterte Auslenkung $d_{x/y,filter}$ ist für die Anpassung des logarithmischen Kriechmodells insofern notwendig, als dass sich damit die Zeitkonstante t_0 und die korrespondierende nominelle Anfangsauslenkung d_0 bestimmen lassen. Die Filterung erfolgte mithilfe eines Savitzky-Golay-Filters, welches nach Schmid et al. [17] ausgelegt wurde. In der späteren Anwendung des Add-ons ist mit Anregungsfrequenzen in der Größenordnung von etwa $f_A \sim 10^1$ Hz zu rechnen. Die Festlegung der Filtereckfrequenz erfolgte daher auf $f_E = 25$ Hz, um einerseits durch das Stromnetz bedingte Signalstörungen im Frequenzband von etwa $50 \text{ Hz} \leq f_N \leq 60 \text{ Hz}$ zuverlässig zu filtern, andererseits um „aliasing“ im aufgezeichneten Messsignal zu vermeiden. In Bild 2 d) ist exemplarisch ein Ausschnitt aus dem Zeitschrieb der gemessenen Auslenkung d_x in x-Richtung beim Sprung $i = 3$ der Piezoaktorspannung von $U_{A,2} = 600$ V auf $U_{A,3} = 300$ V gezeigt.

Bild 3 Anhand der gefilterten Auslenkung $d_{x/y, \text{filt}}$ ermittelte Zeitkonstanten t_0 . Grafik: IWF



Aufgrund der vorgenommenen Filterung ist nach zweimaligem Überschwingen im Bereich $t < t_0$ der Übergang vom transienten Teil der Sprungantwort zum Kriechen ab dem Zeitpunkt $t \geq t_0$ zu identifizieren. In **Bild 3** sind für jeden Sprung der Piezoaktorspannung U_A die ermittelten Zeitkonstanten t_0 sowie deren Mittelwerte bzgl. der x- und y-Richtung dargestellt.

Ersichtlich ist, dass die Zeitkonstanten $t_{0,x}$ der Sprünge in x-Richtung im Mittel um $\Delta = 4,95$ ms höher liegen als die Zeitkonstanten $t_{0,y}$ der Sprünge in y-Richtung. Dabei ist bereits berücksichtigt, dass der Sprung $i = 1$ in x-Richtung mittels der sogenannten „leave-one-out“-Methode als Ausreißer klassifiziert und bei der Berechnung der Mittelwerte nicht berücksichtigt wurde. Die so ermittelten Mittelwerte der Zeitkonstanten betragen $\bar{t}_{0,x} \approx 90,3$ ms in x-Richtung beziehungsweise $\bar{t}_{0,y} \approx 85,3$ ms in y-Richtung und werden, wie nachfolgend beschrieben, zur Modellanpassung herangezogen.

3.2 Anpassung des logarithmischen Kriechmodells

Der Zusammenhang zwischen der Zeitkonstanten t_0 und der nominellen Anfangsauslenkung d_0 im logarithmischen Kriechmodell wurde bereits in Kapitel 2.2 erläutert. Auf Basis der Mittelwerte der Zeitkonstanten $\bar{t}_{0,x}$ lässt sich somit der korrespondierende Wert der nominellen Anfangsauslenkung d_0 nach Formel 3 bestimmen, also abschnittsweise für jeden Sprung im Zeitschrieb der Auslenkung $d_{x/y}$ der jeweilige Wert zum Zeitpunkt $t = t_0$.

$$d_{0,j,i} = d_{j,i}(t = t_0) \Big|_{i=1}^{10}, \quad j \in \{x, y\} \quad (3)$$

Für die Modellanpassung verbleibt damit lediglich ein freier Parameter, der Kriechfaktor γ . Dieser wird ebenfalls abschnittsweise für jeden Sprung im Zeitschrieb der Auslenkung $d_{x/y}$ mittels eines nichtlinearen least-squares-Verfahrens bestimmt. Dabei wird das durch Formel 4 gegebene Funktional F minimiert.

$$e_M = d(t)_i - \hat{d}(t)_i \quad (4)$$

Bild 4 zeigt die Ergebnisse dieser Modellanpassung. In **Bild 4 a)** ist die nominelle Anfangsauslenkung $d_{0,x/y}$ in x- und y-Richtung über der Amplitude der Piezoaktorspannung ΔU_A beim jeweiligen Sprung aufgetragen. Anhand der Lage der Datenpunkte lässt sich ein starker linearer Zusammenhang zwischen beiden Größen vermuten. Die jeweils ermittelten Regressionsgeraden für den Zusammenhang $f = d_{0,x/y}(\Delta U_A)$ wurden daher ebenfalls dargestellt. Für die angestrebte Kompensation des Kriechverhaltens kann die Inverse f^{-1} dieses linearen Zusammenhangs auch aufgrund ihrer

hohen Anpassungsgüte mit einem $\text{RMSE}_{d_{0,x}} = 3,03 \mu\text{m}$ beziehungsweise $\text{RMSE}_{d_{0,y}} = 3,01 \mu\text{m}$ direkt im geschlossenen Regelkreis verwendet werden.

In **Bild 4 b)** sind die mittels least-squares-Verfahren ermittelten Kriechfaktoren γ in Abhängigkeit von der nominellen Anfangsauslenkung d_0 sowie das jeweilige 95 % Konfidenzintervall dargestellt. Es offenbart sich ein deutlich nichtlinearer Zusammenhang beider Größen. Hinsichtlich der Kompensation des Kriechverhaltens ist hierfür ohne Weiteres kein naheliegender, geschlossen funktionaler Zusammenhang zu postulieren, insbesondere kein invertierbarer. Verallgemeinernd kann gesagt werden, dass das Kriechverhalten umso schwächer ausgeprägt ist, je größer der Absolutwert der nominellen Anfangsauslenkung $|d_0|$, also der Amplitude der Piezoaktorspannung ΔU_A ist. Der globale Maximalwert des 95 % Konfidenzintervalls der Kriechfaktoren $\gamma_{95} = \pm 4,9 \cdot 10^{-6}$ deutet auf eine hohe Anpassungsgüte des Modells hin.

3.3 Evaluierung des Modellfehlers

Mit den im vorherigen Kapitel gezeigten Ergebnissen liegt ein stückweise parametrisiertes Kriechmodell auf Basis des in Formel 1 definierten Zusammenhangs vor. Damit erfolgt nun eine Bewertung, das heißt eine Bestimmung des Modellfehlers e_M . Dieser ist gemäß Formel 5 definiert und gibt die Abweichung des logarithmischen Kriechmodells $\hat{d}(t)$ zur experimentell ermittelten Auslenkung $d(t)$ an.

$$F(\gamma) = \left(\hat{d}(t, \gamma) \Big|_{t_0, d_0} - d(t) \right)^2 \quad (5)$$

Zusätzlich wird eine Bewertung des Kriechfehlers e_0 für den Fall konstanter Kriechfaktoren $\gamma = 0$ vorgenommen, vgl. Kapitel 2.2. Dies entspricht dem Zusammenhang in Formel 6, also der Annahme, nach Erreichen der nominellen Anfangsauslenkung d_0 gäbe es kein Kriechen. Dies ist insofern interessant, als dass sich damit der Regleraufwand abschätzen lässt, mit welchem ein Regler im geschlossenen Regelkreis ohne Vorkompensation die Regelabweichung $e(t) = d_{\text{soll}} - d(t)_{\text{ist}}$ ausgleichen müsste.

$$e_0 = d_{0,i} - \hat{d}(t)_i \quad (6)$$

Bild 5 und **Bild 6** zeigen die Ergebnisse der Modellierung im Zeitraum $100 \text{ s} \leq t \leq 2200 \text{ s}$ während der Beaufschlagung der Piezoaktoren mit der Piezoaktorspannung U_A , vgl. **Bild 2 a)**. In **Bild 5 a)** und **Bild 6 a)** ist das stückweise parametrisierte Kriechmodell zusammen mit der Auslenkung $d_{x/y}$ in x- beziehungsweise

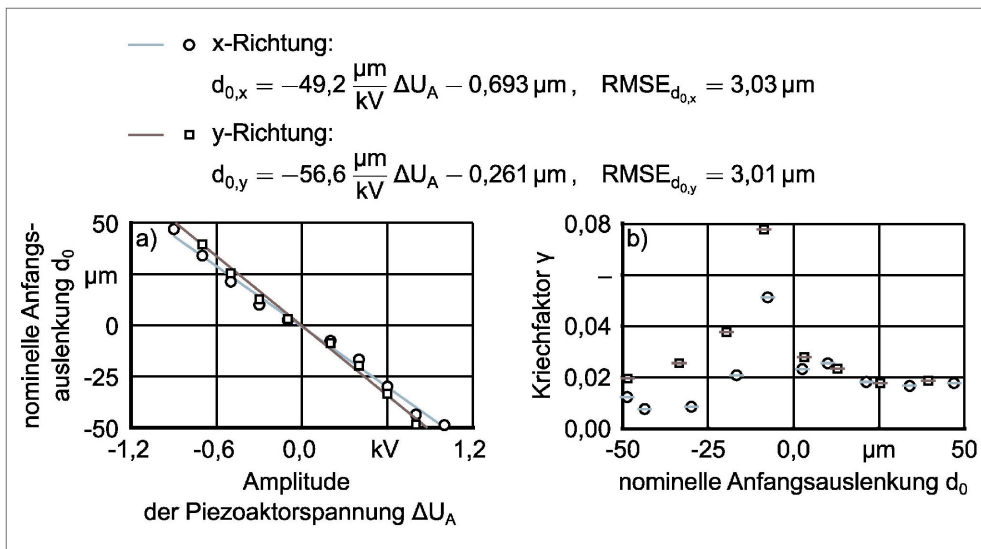


Bild 4 Parameter des logarithmischen Kriechmodells nach Anpassung an die experimentell ermittelte Auslenkung $d_{x/y}$; a) nominelle Anfangsauslenkung d_0 in Abhängigkeit von der Amplitude der Piezoaktorspannung ΔU_A ; b) Kriechfaktor γ in Abhängigkeit von der nominellen Anfangsauslenkung d_0 und jeweilige 95%Konfidenzintervalle gemäß der „least-squares“-Anpassung. Grafik: IWF

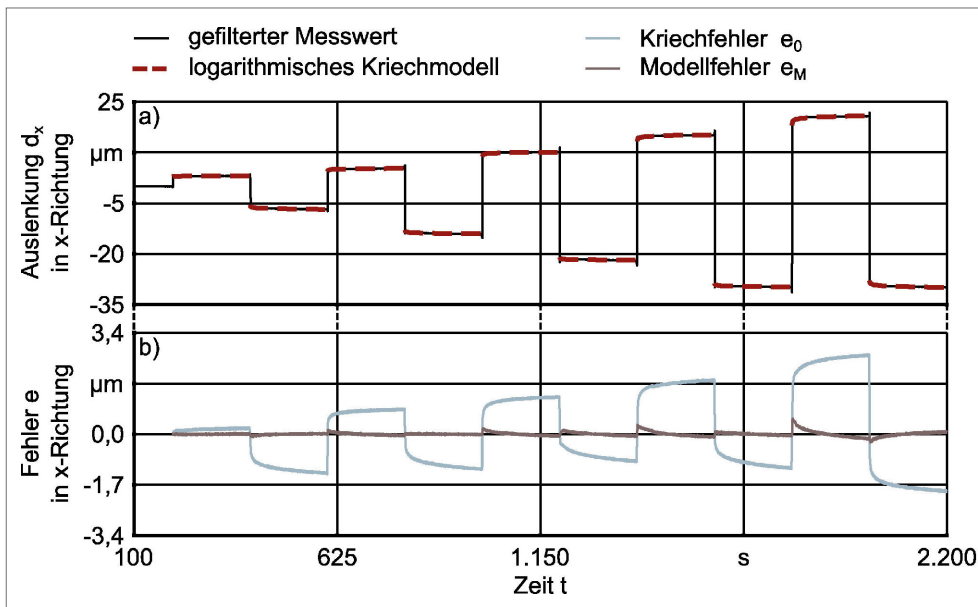


Bild 5 Ergebnisse der Anpassung des logarithmischen Kriechmodells an die experimentell ermittelten Messdaten der Auslenkung d_x ; a) Auslenkung d_x und stückweise parametrisiertes logarithmisches Kriechmodell; b) Modellfehler $e_{M,x}$ und Kriechfehler $e_{0,x}$. Grafik: IWF

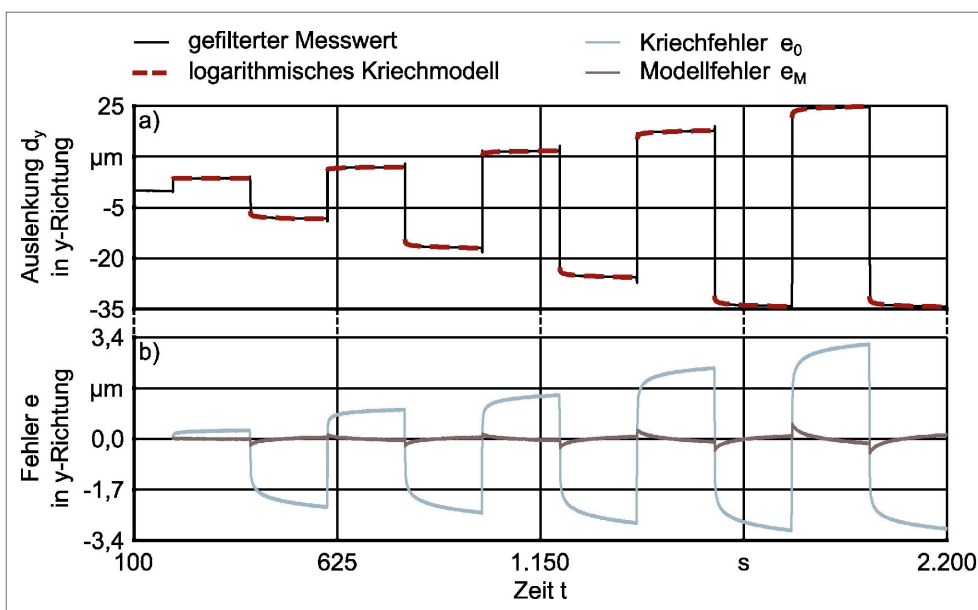
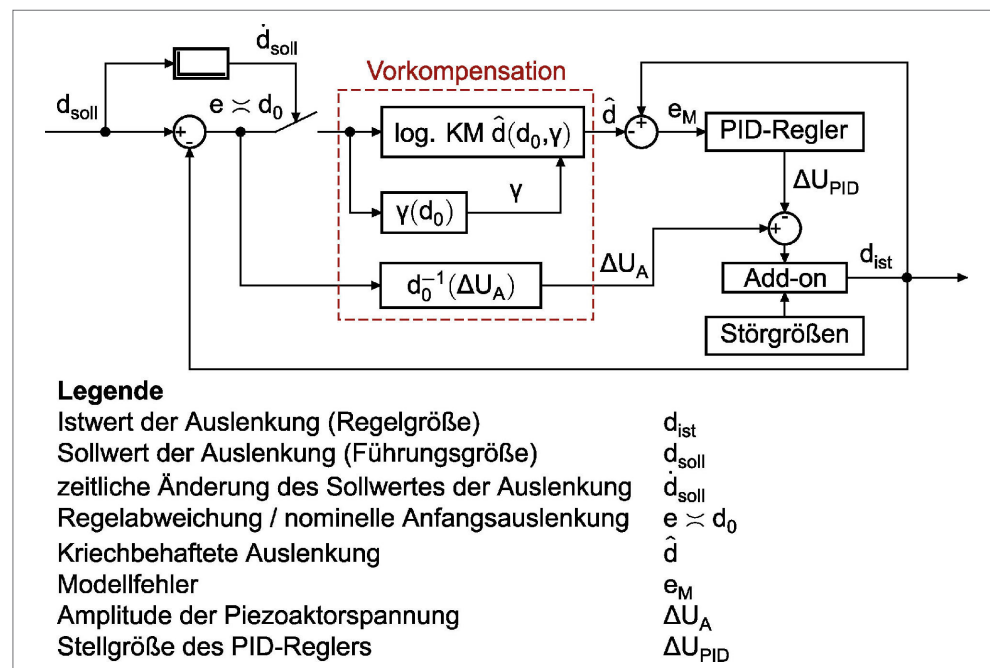


Bild 6 Ergebnisse der Anpassung des logarithmischen Kriechmodells an die experimentell ermittelten Messdaten der Auslenkung d_y ; a) Auslenkung d_y und stückweise parametrisiertes logarithmisches Kriechmodell; b) Modellfehler $e_{M,y}$ und Kriechfehler $e_{0,y}$. Grafik: IWF

Bild 7 Struktur einer möglichen Vorkompensation des Kriechfehlers e_0 bestehend aus einer Vorsteuerung mittels der inversen linearen Abbildung (ΔU_A) sowie einem nichtlinearen Vorfilter durch das logarithmische Kriechmodell (log. KM). Grafik: IWF



y-Richtung dargestellt. Bild 5 b) und Bild 6 b) verzeichnen die korrespondierenden Modellfehler e_M und Kriechfehler e_0 gemäß Formel 5 beziehungsweise Formel 6. Die in Rot dargestellten Kurvenverläufe des angepassten logarithmischen Kriechmodells bestätigen die in Bild 4 präsentierten Ergebnisse hinsichtlich der Parameter.

Für die x-Richtung beträgt der entsprechende $RMSE_x \leq 0,152 \mu m$, für die y-Richtung $RMSE_y \leq 0,147 \mu m$, jeweils bezogen auf den gesamten Zeitbereich $100 s \leq t \leq 2200 s$. Deutlicher wird die hohe Anpassungsgüte noch einmal anhand des zeitlichen Verlaufs von Modell- und Kriechfehler e_M beziehungsweise e_0 . Sowohl in x- als auch in y-Richtung ist der Modellfehler e_M zu allen Zeitpunkten t kleiner als der Kriechfehler e_0 . Dies gilt selbst unmittelbar nach einem initiierten Sprung der Piezoaktorspannung U_A , das heißt beim Übergang vom transienten in den Kriechbereich, wo der Modellfehler e_M jeweils seine Extremstellen aufweist. Für die x-Richtung kann das logarithmische Kriechmodell damit etwa bis zu 16-fach, für die y-Richtung bis zu 35-fach genauer die Messwerte approximieren. Im Mittel ergibt sich eine Verringerung des Fehlers um circa 98,6 %. Dies lässt sich mit einer ebenso großen mittleren Verringerung des Regelaufwands gleichsetzen.

3.4 Kompensation des Kriechverhaltens

Auf Basis der Erkenntnisse aus Kapitel 3.1 – 3.3 soll im Folgenden die Struktur einer möglichen Kompensationsroutine im geschlossenen Regelkreis des Add-ons vorgestellt werden. In Bild 7 ist diese in Form eines erweiterten Regelkreises gezeigt.

Die Kompensationsroutine besteht zum einen aus einer Vorsteuerung mittels der inversen linearen Abbildung $d_0^{-1}(\Delta U_A)$. Diese beaufschlagt die Piezoaktoren im Add-on bei einer Änderung der Führungsgröße direkt mit einer der nominellen Anfangsauslenkung d_0 entsprechenden Piezoaktorspannung U_A . Das logarithmische Kriechmodell sowie ein „lookup-table“ zur Bestimmung der Kriechfaktoren γ fungieren als Vorfilter zwischen der Regelabweichung und dem PID-Regler. Durch die

zusätzliche Rückführung der Regelgröße zwischen Vorkompensation und PID-Regler muss dieser lediglich den Modellfehler e_M sowie etwaige Störgrößen ausregeln. Durch die Differentialschaltung in Abhängigkeit von der zeitlichen Änderung des Sollwertes der Auslenkung $\dot{d}_{soll}$ wird gewährleistet, dass das logarithmische Kriechmodell nur bei einer Änderung der Führungsgröße aktualisiert wird.

4 Diskussion

4.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

In der hier präsentierten Arbeit wurde das effektive Kriechverhalten einer zweiachsigen piezoaktuierten Kompensationseinheit, genannt Add-on, zur Kompensation der Verlagerungen δ_{TCP} des TCP während Bearbeitungsprozessen in WZM untersucht und modelliert. Hierbei wurde die gesamte Wirkungskette zwischen Piezoaktorspannung U_A und gemessener Auslenkung d der mittels Festkörpergelenken gelagerten Plattform betrachtet. Zur Modellierung wurde ein stückweise definiertes und parametrisiertes logarithmisches Kriechmodell nach Jung und Gweon [16] eingesetzt. Dieses konnte mit einem $RMSE_{logKM} \leq 0,152 \mu m$ an die experimentell ermittelten Messdaten angepasst werden. Die ermittelte Abweichung des Modells wurde weiterhin in Form des Modellfehlers e_M und des Kriechfehlers e_0 quantifiziert. Es konnte gezeigt werden, dass eine Kompensation des Kriechens mit dem logarithmischen Kriechmodell den Regleraufwand bzgl. der Auslenkung d und der Ausregelung des Modellfehler e_M im Mittel um 98,6 % reduziert. Dies kann zum einen als reine Energiesparnis aufgrund der deutlich niedrigeren Stellgröße des PID-Reglers ΔU_{PID} gedeutet werden, zum anderen ermöglicht es trotz des insgesamt nichtlinearen Systemverhaltens die Anwendung einer linearen Reglerstruktur, da sich die vom Modellfehler e_M quantifizierten Residuen in einem deutlich größeren Zeitbereich als linear annähern lassen. Im Hinblick auf die angestrebte Schätzung äußerer Kräfte F_{ext} ermöglicht die Kompensation des Kriechens eine zum $RMSE_{logKM}$ des logarithmischen Kriechmodells proportionale Verbesserung der Auflösung $\hat{\Delta F}_{ext}$.

Im Zuge der Anpassung des Modells mittels nichtlinearem „least-squares-Verfahren“ wurden invertierbare funktionale Zusammenhänge der Modellparameter zur Systemeingangsgröße, der Piezoaktorspannung U_A , für eine Kompensation des Kriechverhaltens gesucht. Für die nominelle Anfangsauslenkung d_0 ist dies mit der Identifikation linearer Regressionsgeraden gelungen. Die Kriechfaktoren γ wurden mit hoher Signifikanz bestimmt und in explizite Beziehung zur nominellen Anfangsauslenkung d_0 sowie implizite Beziehung zur Piezoaktorspannung U_A gesetzt. Hierfür ließ sich kein invertierbarer funktionaler Zusammenhang zur Piezoaktorspannung U_A herstellen. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse wurde ein Kompensationsalgorithmus für den geschlossenen Regelkreis vorgeschlagen, welcher die Invertierbarkeit der Beziehungen $d_0(\Delta U_A)$ beziehungsweise Nichtinvertierbarkeit der Beziehung $\gamma(d_0)$ berücksichtigt.

4.2 Fazit und Ausblick

Die hohe Anpassungsgüte sowohl des logarithmischen Kriechmodells an die Auslenkung d als auch seiner Parameter an die Piezoaktorspannung U_A zeigt, dass eine darauf aufbauende Vorkompensation des Kriechverhaltens des Add-ons sinnvoll ist. Da jedoch keine vollständige Invertierbarkeit der funktionalen Zusammenhänge gegeben ist, ist eine rein auf einer Vorsteuerung basierende Kompensation nicht möglich. Ein hybrider Ansatz bestehend aus linearer Vorsteuerung und nichtlinearem Vorfilter wurde vorgeschlagen und sollte in weiteren Arbeiten auf seine Performanz untersucht werden.

Insbesondere im positionsgeregelten Betrieb des Add-ons mit Fokus auf der Ausregelung von Störgrößen ist mit kleineren Sprüngen in der nominellen Anfangsauslenkung d_0 zu rechnen. Insbesondere in diesem Bereich unterliegen die Kriechfaktoren $\gamma(d_0)$ jedoch großen Änderungen. Um mittels lookup-table eine hinreichend genaue Abbildung dieses Zusammenhangs zu gewährleisten, ist hier eine feinere Auflösung anzustreben. Des Weiteren sollte für Haltezeiten $t_H \ll 200$ s beziehungsweise hochfrequente Anregungssignale der Piezoaktorspannung U_A in der Größenordnung $f_A \sim 10^1$ Hz die Wechselwirkung des Kriechens mit dem hysteretischen Verhalten, insbesondere in den Modellparametern untersucht werden.

FÖRDERHINWEIS

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) - 515938129.

Literatur

- [1] European Commission JRC
- [2] : Strategic insights into the EU's advanced manufacturing industry: trends and comparative Analysis. LU: Publications Office 2024
- [3] Uhlmann, E.; Thom, S.; Kianinejad, K. et al.: Entwicklung eines aktiven Kompensationstisches. *wt Werkstatttechnik online* 105 (2015) 07–08, S. 457–463
- [4] Kianinejad, K.; Thom, S.; Kushwaha, S. et al.: Add-on Error Compensation Unit as Sustainable Solution for Outdated Milling Machines. *Procedia CIRP* 40 (2016), S. 174–178
- [5] Dürkop, L.; Jasperneite, J.: „Plug & Produce“ als Anwendungsfall von Industrie 4.0. In: Ten Hompel, M.; Vogel-Heuser, B.; Bauernhansl, T. (Hrsg.): *Handbuch Industrie 4.0*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2020, S. 1–13
- [6] Uhlmann, E.; Polte, M.; Triebel, F. et al.: Accuracy in Force Estimation Applied on a Piezoelectric Fine Positioning System for Machine Tools. *Journal of Machine Engineering* (2021), S. 24–34
- [7] ElMaraghy, H. A. (Hrsg.): *Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems*. London: Springer London 2009
- [8] Koren, Y.: *Reconfigurable Manufacturing and Beyond*. CIRP 3rd International conference on Reconfigurable Manufacturing, Ann Arbor, USA, 2005
- [9] Landers, R. G.; Min, B.-K.; Koren, Y.: Reconfigurable Machine Tools. *CIRP Annals* 50 (2001) 1, S. 269–274
- [10] Hung, J.-P.; Lin, W.-Z.; Chen, Y.-J. et al.: Investigation of the Machining Stability of a Milling Machine with Hybrid Guideway Systems. *Applied Sciences* 6 (2016) 3, S. 76–88
- [11] Liseli, J. B.; Agnus, J.; Lutz, P. et al.: An Overview of Piezoelectric Self-Sensing Actuation for Nanopositioning Applications: Electrical Circuits, Displacement, and Force Estimation. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 69 (2020) 1, S. 2–14
- [12] Rakotondrabe, M.; Ivan, I. A.; Khadraoui, S. et al.: Simultaneous Displacement/Force Self-Sensing in Piezoelectric Actuators and Applications to Robust Control. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 20 (2015) 2, S. 519–531
- [13] Dai, Y.; Li, D.; Wang, D.: Review on the Nonlinear Modeling of Hysteresis in Piezoelectric Ceramic Actuators. *Actuators* 12 (2023), S. 442–474
- [14] Gaul, L.; Becker, J.: Model-based piezoelectric hysteresis and creep compensation for highly-dynamic feedforward rest-to-rest motion control of piezoelectrically actuated flexible structures. *International Journal of Engineering Science* 47 (2009) 11–12, S. 1193–1207
- [15] Tashakori, S.; San-Millan, A.; Vaziri, V. et al.: Fast Parameter Identification of the Fractional-Order Creep Model. *Actuators* 13 (2024) 12, S. 534–550
- [16] Soares Barbosa, M. P.; Rakotondrabe, M.; Hultmann Ayala, H. V.: Deep Learning Applied to Data-driven Dynamic Characterization of Hysteretic Piezoelectric Micromanipulators. *IFAC-PapersOnLine* 53 (2020) 2, S. 8559–8564
- [17] Jung, H.; Gweon, D.-G.: Creep characteristics of piezoelectric actuators. *Review of Scientific Instruments* 71 (2000) 4, S. 1896–1900
- [18] Schmid, M.; Rath, D.; Diebold, U.: Why and How Savitzky–Golay Filters Should Be Replaced. *ACS Measurement Science Au* 2 (2022) 2, S. 185–196

Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann

Dr. Mitchel Polte

Thomas Pache 
pache@iwf.tu-berlin.de

Florian Triebel

Nils Bergström 

Technische Universität Berlin
Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb IWF
Pascalstr. 8-9, 10587 Berlin
www.tu.berlin/iwf

Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann

Dr. Mitchel Polte

Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen
und Konstruktionstechnik IPK
Pascalstr. 8-9, 10587 Berlin
www.ipk.fraunhofer.de

LIZENZ



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

