

Entwicklung einer Wechselschnittstelle für Tools in Nanofabrikationsmaschinen mit hochreproduzierbarer Lagedefinition

Development of a changing interface for tools in nanofabrication machines with a highly reproducible position definition

Florian Weigert, Technische Universität Ilmenau, Institut für Maschinen und Gerätekonstruktion, 98693 Ilmenau, Deutschland, florian.weigert@tu-ilmenau.de

René Theska, Technische Universität Ilmenau, Institut für Maschinen und Gerätekonstruktion, 98693 Ilmenau, Deutschland, rene.theska@tu-ilmenau.de

Kurzfassung

Im Stand der Forschung sind Wechselschnittstellen für Sensoren und Werkzeuge bereits in unterschiedlichen Maschinenklassen zu finden. Diese erfüllen jedoch nicht die geforderten höchsten Ansprüche an die Reproduzierbarkeit der Position für den Einsatz in Nanofabrikationsmaschinen. Kinematische Kopplungen zeigen aufgrund ihrer eindeutigen, kinematisch bestimmten Lagedefinition und einer hohen Reproduzierbarkeit eine gute Eignung für den Einsatz als Wechselschnittstelle in Nanofabrikationsmaschinen. Anhand von analytischen Berechnungen werden die wirkenden Kräfte und Verformungen der Koppelpunkte ermittelt. Für die Integration einer Justierung werden neue Anordnungen einer solchen kinematischen Kopplung untersucht. Da analytische und numerische Modelle die Reproduzierbarkeit nicht ausreichend genau abbilden können, wird ein geeigneter Messaufbau entwickelt. Dessen Eignung wird anhand einer dreidimensionalen, vektorbasierten Unsicherheitsanalyse nachgewiesen. Anschließend wird mittels der Ergebnisse der untersuchten Prototypen ein Modell zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Konstruktionsmerkmalen und Reproduzierbarkeit entwickelt.

Abstract

In the state of research, changing interfaces for sensors and tools can already be found in different machine classes. However, these do not meet the highest requirements regarding the reproducibility of the position for use in nanofabrication machines. Kinematic couplings, due to their clear, kinematically determined position definition and high reproducibility, are well suited for use as changing interfaces in nanofabrication machines. On the basis of analytical calculations, the effective forces and deformations at the coupling points are determined. For the integration of an adjustment, new arrangements of such a kinematic coupling are investigated. Since analytical and numerical models cannot describe the reproducibility with sufficient accuracy, a suitable measurement setup is developed. Its suitability is proven by a three-dimensional, vector-based uncertainty analysis. Subsequently, the results of the examined prototypes will be used to develop a model for the description of the correlation between design features and reproducibility.

1 Einleitung

Dieser Beitrag befasst sich mit der Entwicklung von konstruktionswissenschaftlich fundierten Grundlagen für Wechselschnittstellen von Sensoren und Werkzeugen in Nanofabrikationsmaschinen (nachfolgend als Tools bezeichnet). Dabei ist die grundlegende Forderung eine kinematisch eindeutige Lagedefinition zwischen Tool und Maschine. Die in Ilmenau entwickelten Nanopositionier- und Nanomessmaschinen erfüllen bereits Anforderungen an eine subnanometergenaue Messung und Positionierung (NMM-1 und NPMM-200). In aktuellen Forschungsarbeiten werden diese Maschinen für die Nanofabrikation erweitert. Dadurch entsteht vermehrt die Forderung nach einer hochreproduzierbaren Toolwechselschnittstelle. Der in diesem Beitrag vorgestellte Ansatz, basierend auf einer kinematischen Kopplung, verspricht eine erzielbare Reproduzierbarkeit der Position von weniger als 100 nm.

2 Stand der Forschung

Im Stand der Forschung sind Wechselschnittstellen in unterschiedlichen Maschinenklassen zu finden. Die in Werkzeugmaschinen vertretenen Wechselschnittstellen werden in diesem Beitrag nicht näher betrachtet, da diese überwiegend für rotierende oder rotationssymmetrische Tools zum Einsatz kommen und dort keine Definition der Drehlage um die Toolachse erforderlich ist. In Koordinatenmessmaschinen kommen häufig Wechselschnittstellen zum Einsatz, die als kinematische Kopplung ausgeführt sind. Diese Wechselschnittstelle dient dazu, die Tasteranordnung über die Tasteraufnahme bezüglich Geometrie und räumlicher Ausrichtung messaufgabenspezifisch einzuwechseln. In einigen Fällen ist auch eine Informationsübertragung über elektrische Kontakte vorgesehen, wobei die Wirkung der auftretenden parasitären Kräfte als vernachlässigbar angenommen wird.

Für die NMM-1 existiert aus vorangegangenen For-

schungsprojekten bereits ein erster Ansatz eines Toolwechselsystems. Bei diesem Prinzip wird ein konventioneller Objektivrevolver aus einem Mikroskop verwendet, mit dem jedoch keine ausreichend hohe Reproduzierbarkeit erzielt werden konnte [4]. Kompensationsmöglichkeiten, die auf der Messung von Marken auf dem Messtisch beruhen sind für die Nanofabrikation ungeeignet, da die Fabrikationstools nicht immer ein eigenes Messsystem besitzen und die Anbringung solcher Marken nicht generell möglich ist. Kinematische Kopplungen zeichnen sich theoretisch durch eine Lagedefinition frei von Überbestimmtheiten aus. Die Umsetzung der kinematischen Kopplung geht in der Realität mit unvermeidbaren Gestaltabweichungen einher, die sich in Form von Abweichungen in der Reproduzierbarkeit der Position zeigen. Ein weiterer Einfluss ist durch die Kontaktreibung gegeben. Die bekanntesten Ausführungsformen kinematischer Kopplungen werden als Kelvin-Anordnung und Maxwell-Anordnung bezeichnet. Die Kelvin-Anordnung besteht aus drei Kugeln die jeweils mit einem Tetraeder, einer V-Nut und einer Ebene gekoppelt sind. Bei der Maxwell-Anordnung sind die drei Kugeln hingegen mit drei V-Nuten im Winkel von 120° gekoppelt (vgl. Abbildung 1).

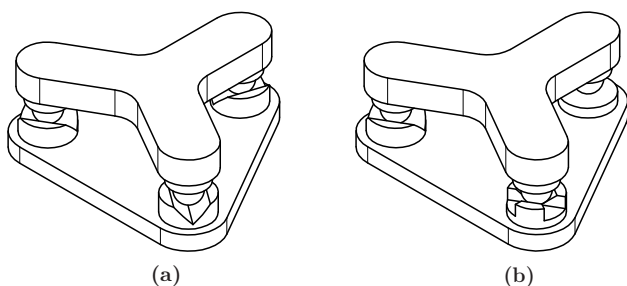


Bild 1 Kinematische Kopplungen: (a) Maxwell-Anordnung, (b) Kelvin-Anordnung

Ende der 90er Jahre wurden durch die Forschergruppe um Prof. Slocum am Massachusetts Institute of Technology Grundlagenuntersuchungen zu kinematischen Kopplungen nach der Maxwell-Anordnung durchgeführt [5, 6]. Mit Kugeln aus Siliziumnitrid und V-Nuten aus gehärtetem Stahl konnte nach einer Einlaufphase von 50 Zyklen unter Verwendung eines Schmierstoffs eine Reproduzierbarkeit von $0.33 \mu\text{m}$ in radialer und $0.30 \mu\text{m}$ in axialer Richtung erzielt werden. Als Verkippungen ergaben sich $1.6 \mu\text{rad}$ um die x-Achse und $2.8 \mu\text{rad}$ um die y-Achse.

In Erweiterung klassischer Wechselschnittstellen in Werkzeugmaschinen wurde in [3] eine hochreproduzierbare Wechselschnittstelle inklusive Energie- und Informationsübertragung für kleine Werkzeugmaschinen entwickelt. Die entwickelte Kopplung besitzt Abmessungen von $45 \text{ mm} \times 45 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ und basiert ebenfalls auf einer kinematischen Kopplung mit der Maxwell-Anordnung. Die damit erreichte Reproduzierbarkeit liegt im Bereich von $0.18 \mu\text{m}$ in Translation und $9.50 \mu\text{rad}$ in Rotation. Der Fokus der zitierten Arbeit liegt auf der Entwicklung eines schaltbaren Magnetsystems zur Realisierung einer einstellbaren Vorspannkraft und einer Energie- und Informationsübertragung inklusive Messdatenverarbeitung. Eine aus-

föhrliche Betrachtung der konstruktiven Gestaltung, der Langzeitstabilität und weiterer Einflussfaktoren fehlt.

Anhand der Analyse des Forschungsstandes wird deutlich, dass besonders im Bereich der hochreproduzierbaren Wechselsysteme noch erheblicher Forschungsbedarf besteht. Die bisher erreichte Reproduzierbarkeit ist nicht ausreichend für die Nanofabrikation und in keiner der vorausgegangenen Arbeiten wurden Langzeitstabilität und Kriecheffekte untersucht. Eine ausreichende Langzeitstabilität ist schon für den Einsatz in der Nanopositionier- und Nanomessmaschine entscheidend und wird durch deren Einsatz für die Nanofabrikation vermehrt gefordert.

3 Gestaltung und Aufbau der Wechselschnittstelle

Analog zum Stand der Technik orientiert sich die Gestaltung der Wechselschnittstelle an kinematischen Kopplungen. In Ergänzung der bereits gut beschriebenen Maxwell-Anordnung wird die Kelvin-Anordnung einer genaueren Betrachtung unterzogen. Sie besitzt die vorteilhafte Eigenschaft eines definierten Drehpunktes in Form der durch einen Tetraeder und eine Kugel gebildete Koppelstelle (vgl. Abbildung 1 (b)). Nachteilig hingegen ist ein unsymmetrisches Verhalten der Wechselschnittstelle bei thermischen Einflüssen. Bei der Maxwell-Anordnung kompensieren sich globale thermische Einflüsse aufgrund des symmetrischen Aufbaus.

Für die Implementierung der Wechselschnittstelle in die Nanofabrikationsmaschine muss der Arbeitspunkt des verwendeten Tools im Abbe-Punkt der Nanofabrikationsmaschine liegen. Die Längenmessung in der Maschine erfolgt unter Einhaltung des Abbeschen Komparatorprinzips in allen Raumachsen, um Fehlereinflüsse erster Ordnung zu vermeiden. Dabei treffen sich die Längenmessachsen virtuell in Toolarbeitspunkt. Aufgrund von Fertigungs- und Montageabweichungen sowie Verschleiß kann der zulässige Bereich der Lageabweichung des Toolarbeitspunkts überschritten werden. Dieser ist für die NPM-200 mit $\pm 0.05 \text{ mm}$ angegeben [1]. Dadurch kann sich die Notwendigkeit einer Justierung ergeben. Durch eine geschickte Wahl der Anordnung der Koppelpunkte wird eine unabhän-

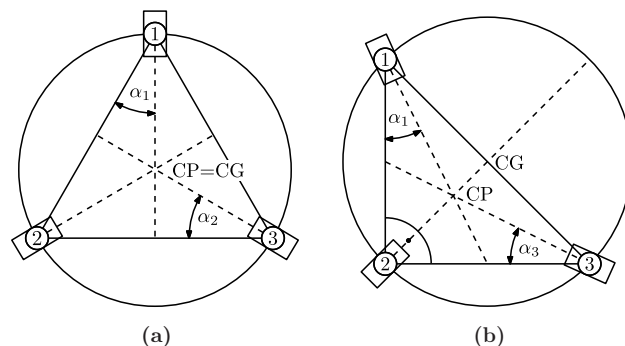


Bild 2 Unterschiedliche Anordnungsvarianten der Koppelpunkte von allgemeinen kinematischen Kopplungen mit Koppelmittelpunkt (CP), Schwerpunkt (CG) und Winkel bei Verwendung von V-Nuten (α)

gige Justierung einzelner Freiheiten und damit eine systematische Justierung möglich. Mit der in Abbildung 2 (b) dargestellten Anordnungen kann die kinematische Koppelung um eine unabhängige Justierung in drei Freiheiten erweitert werden. Anhand der Ausrichtung der richtungsabhängigen V-Nuten lässt sich weiterhin der Schwerpunkt beeinflussen, wie durch die Winkel α in Abbildung 2 dargestellt.

4 Analytische Betrachtungen der Wechselschnittstelle

In einem ersten Schritt werden analytische Berechnungen der Wechselschnittstelle durchgeführt. Dazu wurde ein Berechnungsprogramm zur Kräfteanalyse entwickelt. Eingangsgrößen sind die Größe und Richtung der eingeleiteten Kräfte, die Anordnung der Koppelpunkte und die Gestalt der Koppelstellen. Daraus werden die wirkenden Kräfte auf die Koppelpunkte und die dazugehörigen Kraftrichtungen berechnet. Anhand dieses Programms kann auch eine Bestimmung des optimalen Punkts der Krafteinleitung durchgeführt werden, um möglichst identische Kraftverhältnisse an allen sechs Koppelpunkten zu schaffen.

Anhand der ermittelten Kräfte können mittels verschiedenen Verfahren die elastischen oder möglicherweise plastischen Verformungen an den Koppelpunkten berechnet werden. Dafür eignet sich besonders die Methode der Dimensionsreduktion nach Valentin Popov. Bei diesem Verfahren wird der Kontaktbereich durch eine eindimensionale elastische Bettung bestehend aus linear elastischen Federelementen mit sehr kleinem Abstand ersetzt. Dadurch können auftretende Verformungen exakt berechnet werden. Bei dem Einsatz in der Nanofabrikationsmaschine sind Bearbeitungskräfte vernachlässigbar. Die wirkenden Kräfte auf die Koppelpunkte setzen sich aus Vorspannkraft und Massenträgheitskräften zusammen und liegen in Summe voraussichtlich unter 50 N. Die Vorspannkraft ist notwendig um mögliche Oberflächeneffekte wie Schmier- oder Flüssigkeitsfilme zu überwinden. Eine daraus resultierende Verformung am Kontaktpunkt liegt im Sub-Mikrometerbereich und ist somit vernachlässigbar. Auftretende Spannungen liegen weit unter der Fließgrenze der potenziell geeigneten Materialien. Ein direkter Zusammenhang zwischen elastischer Verformung und Reproduzierbarkeit der Position der kinematischen Kopplung ist nicht bekannt, weshalb die Größe der Verformung im weiteren Verlauf der Entwicklung keine Relevanz besitzt.

5 Entwicklung eines Messaufbaus

Die maßgeblichen Einflussgrößen auf die Reproduzierbarkeit der Position der Wechselschnittstelle wie beispielsweise Reibung lassen sich durch analytische und numerische Modelle nicht ausreichend genau abbilden. Aus diesem Grund ist hierfür ein geeigneter Aufbau zur Messung der Reproduzierbarkeit der Wechselschnittstelle in fünf Freiheiten notwendig. Für die in der NPMM-200 verwendeten messenden Tools und die sich in Entwicklung befindenden Fabrikationstools besitzen Rotationen um die z-Achse

einen vernachlässigbaren Einfluss (vgl. Abbildung 3).

Die im Stand der Technik durchgeführten Untersuchungen von Wechselschnittstellen wurden mittels linearvariabler Differentialtransformatoren (LVDT) [6] und Halbleiterinterferometern [3] durchgeführt. Beide Verfahren sind für die angestrebten Messunsicherheiten im einstelligen Nanometerbereich nicht geeignet. LVDTs als Messmittel eignen sich nicht wegen ihrer zu geringen Auflösung und einer nicht kontaktfreien Messung. Halbleiter-Interferometer wiederum erfüllen nicht die Anforderungen, um auch die Langzeitstabilität der Koppelstellen mit ausreichender Genauigkeit zu untersuchen.

Die Entwicklung des Messaufbaus basiert auf dem Entwicklungsprozess nach Ilmenauer Schule. Zunächst wurden insgesamt 25 potenziell geeigneten Längen- und Winkel-Messmittel zusammengetragen. Anhand von Eigenschaften wie unter anderem der erreichbaren Auflösung, dem maximalen Messbereich, Wiederholgenauigkeit, Kontaktfreiheit und nach absolutem oder relativem Messprinzip erfolgte ein Vergleich und eine Vorauswahl. Für die Messung der geforderten fünf Freiheiten wurden die potenziell geeigneten Messmittel kombiniert und bewertet. Dabei kann die Messung der rotatorischen Reproduzierbarkeit sowohl direkt durch Winkelmessung als auch indirekt über Triangulation bestimmt werden.

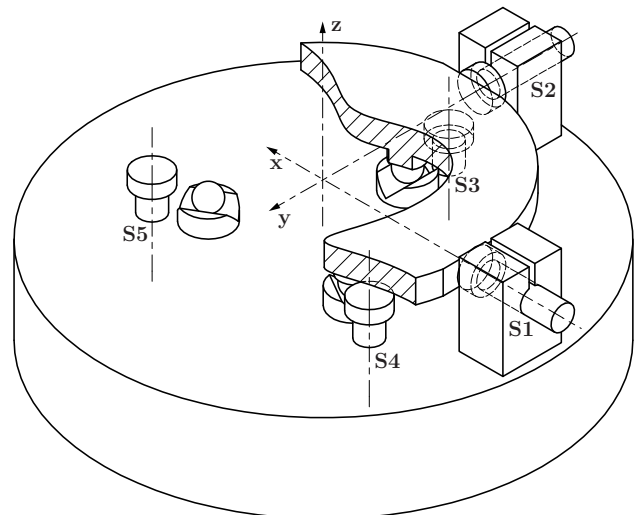


Bild 3 Technisches Prinzip des Messaufbaus mit kapazitiven Sensoren (S1-S5), Sensorbefestigungen, Oberseite und Unterseite der kinematischen Kupplung

Als Ergebnis zeigte die Kombination aus fünf kapazitiven Sensoren die beste Eignung. Diese zeichnen sich durch ein absolutes und kontaktfreies Messprinzip, Auflösungen im Subnanometerbereich und eine hochgradig lineare Kennlinie aus. Das technische Prinzip des Messaufbaus ist in Abbildung 3 dargestellt. Für eine geringe Messunsicherheit sollte der metrologische Kreis möglichst kurz geschlossen werden. Aus diesem Grund wurden die Sensoren nahe bei den Koppelpunkten angeordnet. Gleichzeitig sollte der Abstand der Sensoren S3, S4 und S5 für eine hohe Auflösung der Rotation möglichst groß sein. Um weitere störende Einflüsse auszuschließen wird der Messaufbau in einer Vakuummilieu-Kammer betrieben. Darin kann die Temperatur

mittels eines Käte-Umwälzthermostats auf $\pm 0,01\text{K}$ genau reguliert werden. Das Vakuum wird analog zur NPMM-200 auf 1 mbar eingestellt [1]. Zusätzlich ist die Kammer pneumatisch aktiv schwingungsgedämpft.

5.1 Unsicherheitsbetrachtung

Zum Nachweis der Eignung des in Abbildung 3 dargestellten Messaufbaus wurde eine Unsicherheitsbetrachtung durchgeführt. Diese basiert auf dem dreidimensionalen Vektor-Ansatz, mit dem auch die NPMM-200 beschrieben wurde. Grundlage dieses Ansatzes ist die Modellbildung mittels einfacher, erweiterbarer Untermodelle die als Vektor einzelne Einflüsse beschreiben. Diese werden am Ende zu einem geschlossenen Vektorzug addiert. Bei der Modellbildung wird die Analogie einer kinematischen Koppelung und eines Positioniersystems mit sechs Freiheiten verwendet. Zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten wird ein geschlossener Vektorzug gebildet. Die Differenz der Bezugskoordinatensysteme der beiden Vektorzüge stellt die Messunsicherheit dar.

Die Ergebnisse der Unsicherheitsbetrachtung zeigen, dass vor allem thermische Einflüsse kritisch sind. Bei der Verwendung von konventionellen Konstruktionswerkstoffen wie Aluminium oder Stahl und einer Temperaturstabilität von $\pm 0,01\text{K}$ ergeben sich bereits Unsicherheiten im einstelligen Nanometerbereich. Weiterhin sind auch Verkipfungen der Sensoren S1 und S2 besonders kritisch, da dadurch ein Abbe-Fehler erster Ordnung entsteht. Dieser besitzt einen sehr hohen Sensitivitätsfaktor und kann Unsicherheiten von bis zu 100 nm verursachen. Beide kritischen Einflussfaktoren können bei der Konstruktion berücksichtigt werden. Falls die konstruktiven Maßnahmen nicht ausreichen die Unsicherheiten zu minimieren besteht die Möglichkeit einer Korrektur der Messwerte durch Messen der Einflussfaktoren.

6 Ausblick

Vor der Durchführung der Messungen und dem Aufbau der Prototypen wird ein Toleranzmodell der Wechselschnittstelle aufgebaut. Abweichend von der idealen Betrachtung treten Form- und Lageabweichungen von idealen Geometrien aufgrund von Fertigungstoleranzen auf. Zur Beschreibung der Auswirkung dieser Toleranzen wird ein Unsicherheitsmodell erstellt. Damit können die Fehlergrenzen mittels einer Berechnung basierend auf dem Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen (GUM) bestimmt werden. Die erzielten Ergebnisse und Sensitivitäten fließen in die Konstruktion der Prototypen ein.

Anschließend werden die aufgebauten Prototypen mittels des entwickelten Messaufbaus untersucht. Bei den Prototypen werden sowohl die Materialien der Koppelstellen als auch die Anordnung der Koppelstellen variiert. Beim Einsatz im Vakuum haben insbesondere die Reibverhältnisse und der damit verbundene Einsatz von geeigneten Schmiermitteln einen erheblichen Einfluss auf die Reproduzierbarkeit. Diese wird durch auftretende Stick-Slip Effekte negativ beeinflusst. Eine Alternative Möglichkeit besteht darin gezielt hochfrequente Schwingungen zur Überwindung der

Stick-Slip Effekte einzubringen.

Anhand der erzielten Messergebnisse werden Konstruktionsrichtlinien für die Gestaltung einer Wechselschnittstelle für die NPMM-200 abgeleitet. Der Zusammenhang zwischen Reproduzierbarkeit und Konstruktionsparametern soll in einem Modell basierend auf den Messergebnissen abgebildet werden.

Für den späteren Einsatz in der NPMM-200 ist eine geeignete Einrichtung zum hochreproduzierbaren Aufbringen einer Vorspannkraft zu entwickeln und mit der Wechselschnittstelle zu kombinieren. Die Wechselschnittstelle wird in der NPMM-200 prinzipbedingt entgegen der Gewichtskraft angeordnet. Um die hohe Reproduzierbarkeit der Position der Wechselschnittstelle nicht negativ zu beeinflussen, muss auch das Aufbringen der Vorspannkraft hochreproduzierbar und zeitlich konstant erfolgen.

7 Zusammenfassung

Kinematische Kopplungen zeigen im Allgemeinen eine gute Eignung für ein Toolwechselsystem für die NPMM-200. Diese zeichnen sich in der idealisierten Betrachtung durch eine eindeutige und zwangsfreie Lagedefinition aus. Bei der Gestaltung bieten sich alternative Anordnungsmöglichkeiten, mit denen eine Justierung in drei voneinander unabhängigen Freiheiten möglich ist. Anhand von analytischen Berechnungen wurden grundlegende Eigenschaften ermittelt. Analytische und numerische Modelle bilden die Reproduzierbarkeit nicht in der geforderten Genauigkeit ab. Daher erfolgt die Entwicklung eines Messaufbaus zur hochgenauen Bestimmung der Reproduzierbarkeit der Toolwechselschnittstelle.

8 Literatur

- [1] Balzer, F.: *Entwicklung und Untersuchungen zur 3-D-Nanopositioniertechnik in großen Bewegungsbereichen*. Dissertation (2015). Technische Universität Ilmenau, Ilmenau.
- [2] Füßl, R.; Grünwald, R.; Schmidt, I.: *Messunsicherheitsanalyse von Nanopositionier- und Nanomessmaschinen mit Hilfe eines neuen vektoriiellen Modellansatzes*. Technisches Messen: tm: Plattform für Methoden, Systeme und Anwendungen der Messtechnik. (2006) 73 (9), S. 465-471.
- [3] Grimske, S.: *Multifunktionale Schnittstellen für kleine modulare Werkzeugmaschinen*. Dissertation (2014). Helmut-Schmidt-Universität, Hamburg.
- [4] Manske, E.; Jäger, G.; Hausotte, T.: *A multi-sensor approach for complex and large-area applications in micro and nanometrology*. Measure: the journal of measurement science. (2012) 7 (2), S. 44-50.
- [5] Slocum, A.H.: *Kinematic couplings for precision fixturing - Part I. Formulation of design parameters*. Precision Engineering. (1988) 10 (2), S. 85-91.
- [6] Slocum, A. H.; Donmez, A.: *Kinematic couplings for precision fixturing - Part 2. Experimental determination of repeatability and stiffness*. Precision Engineering. (1988) 10 (3), S. 115-122.

Entwicklung einer Wechselschnittstelle für Tools in Nanofabrikationsmaschinen mit hochreproduzierbarer Lagedefinition

Weigert, Florian; Theska, René

In: IFToMM D-A-CH Konferenz / Fünfte IFToMM D-A-CH Konferenz 2019

Dieser Text wird über DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt.

Die hier veröffentlichte Version der E-Publikation kann von einer eventuell ebenfalls veröffentlichten Verlagsversion abweichen.

DOI: <https://doi.org/10.17185/duepublico/48214>

URN: <urn:nbn:de:hbz:464-20190222-123754-5>

Link: <https://duepublico.uni-duisburg-essen.de:443/servlets/DocumentServlet?id=48214>

Lizenz:

Sofern nicht im Inhalt ausdrücklich anders gekennzeichnet, liegen alle Nutzungsrechte bei den Urhebern bzw. Herausgebern. Nutzung - ausgenommen anwendbare Schrankenregelungen des Urheberrechts - nur mit deren Genehmigung.