

Entwicklung, Konstruktion und Anwendung eines Prüfstands zur Ermittlung der ertragbaren Lastzyklen filigraner hochgenauer stoffschlüssiger Gelenke

David Schoenen*; Sascha Lersch*; Mathias Hüsing*; Burkhard Corves*; Fritz Klocke**; Lars Hensgen**; Andreas Klink**

* RWTH Aachen, Institut für Getriebetechnik und Maschinendynamik
schoenen@igm.rwth-aachen.de

** RWTH Aachen, Lehrstuhl für Technologie der Fertigungsverfahren
l.hensgen@wzl.rwth-aachen.de

Kurzfassung

In der Feinwerktechnik ist der Einsatz stoffschlüssiger Gelenke weit verbreitet. Dennoch sind derzeit experimentelle Untersuchungen der Lebensdauer stoffschlüssiger Gelenke kaum verfügbar. Um dieses Wissensdefizit zu schließen, wurde ein Prüfstand zur Ermittlung der ertragbaren Lastzyklen filigraner Kerbgelenke gebaut, dessen Entwicklung in diesem Beitrag vorgestellt wird. Abschließend werden erste Erkenntnisse der Lebensdaueruntersuchung vorgestellt.

Abstract

Flexure hinges are widely used in precision engineering applications. However, experimental studies of the fatigue of compliant joints are currently missing in research activities. Thus, a test bench for fatigue testing was built. Accordingly, this contribution presents the design process as well as preliminary results of life expectancy analyses.

1 Einführung

Der Einsatz von stoffschlüssigen Gelenken in der Feinwerktechnik ist weit verbreitet und hat in der Vergangenheit stetig zugenommen. Stoffschlüssige Gelenke sind reibungsfrei und spielfrei. Nachgiebige Mechanismen mit stoffschlüssigen Gelenken lassen sich zudem monolithisch gestalten, wodurch die Möglichkeit geboten wird, Gewicht einzusparen, den Montageaufwand zu reduzieren, die Größe (der Mechanismen) zu verringern und die Bewegungsgenauigkeit zu steigern. Allerdings weisen stoffschlüssige Gelenke einen eingeschränkten Bewegungsbereich und unerwünschte parasitäre Effekte auf. Zudem ist die Auslegung komplex. [1]

Raatz [2] und Howell et al. [3] geben einen umfassenden Überblick möglicher nachgiebiger Gelenktypen. Das Hauptaugenmerk in der Wissenschaft liegt aktuell auf Designoptimierungen bestehender und Untersuchungen neuer Gelenkformen. Ermüdungserscheinungen von Festkörpergelenken, z.B. aufgrund von Eigenschaftsabweichungen in der Randschicht verursacht durch das Fertigungsverfahren, sind dagegen bis jetzt kaum untersucht worden. Im Rahmen eines von der DFG geförderten Forschungsprojekts soll nun der Einfluss des Fertigungsverfahrens auf das Verhalten bzw. die Lebensdauer stoffschlüssiger Gelenke untersucht werden.

Aufgrund geringer Abmessungen und der simplen Geometrie sind Kerbgelenke mit konzentrierter Nachgiebigkeit die am häufigsten genutzten nachgiebigen Gelenke. Wie in Abb. 1 gezeigt lassen sich durch verschiedene Bearbeitungsrichtungen Kerbgelenke mit unterschiedlichen Freiheiten realisieren.

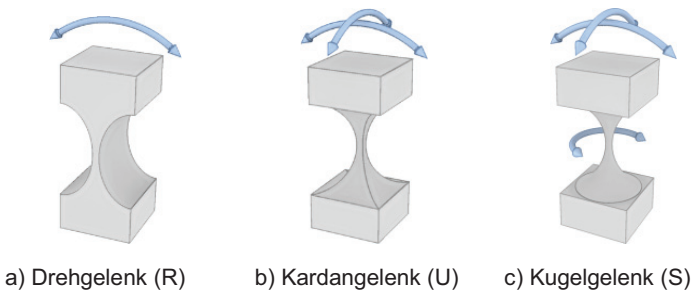


Abb. 1: Kerbgelenke mit unterschiedlichen Freiheitsgraden

Gelenkformen mit einem Freiheitsgrad größer als eins werden üblicherweise durch geeignete Kombination mehrerer orthogonal angeordneter einfacher Drehgelenke ersetzt. Kerbgelenke besitzen ausschließlich Regelflächen. Dadurch lassen sich Drehgelenke einfach und wirtschaftlich aus Rohlingen bzw. Plattenmaterial mittels Drahtfunkenerosion herstellen.

Klassische Kerbgelenkformen sind in Abb. 2 gezeigt, wobei eine kreisförmige Kerbe eine Sonderform der Ellipse darstellt. Ist der Ausschnitt durch eine vollständige Ellipse bzw. Kreis realisiert, werden diese Gelenke als rechteilptisch bzw. rechteckförmig bezeichnet. Die ursprünglichste Form der Festkörpergelenke ist der einfache Biegebalken mit konstanter Stegdicke. Das Fertigungsverfahren schränkt die Kerbform kaum ein. Daher sind abweichend von den gezeigten Kerbformen auch komplizierte Kerbformen z.B. mit Hinterschneidungen möglich.

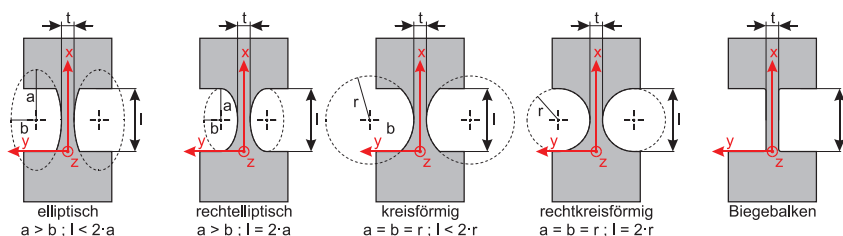


Abb. 2: klassische Kerbgelenkformen

Für die Funktion eines stoffschlüssigen Gelenks ist eine geringe Stegdicke erstrebenswert, um eine höhere Nachgiebigkeit in Bewegungsrichtung zu erzielen. Für das Gesamtverhalten eines Kerbgelenks sind dagegen sehr geringe Nachgiebigkeiten in den Einschränkungrichtungen wünschenswert. Bei stoffschlüssigen Gelenken lässt sich dies durch ein großes Kantenverhältnis des minimalen Querschnitts, auch Aspektverhältnis genannt, realisieren, dadurch wird ein günstiges Verhältnis zwischen erwünschten und unerwünschten Nachgiebigkeiten erreicht. Das derzeit gefertigte maximale Aspektverhältnis stoffschlüssiger Gelenke liegt etwa bei 200 [4]. Kerbgelenke in der Feinwerktechnik verfügen über eine verbleibende Stegdicke von wenigen hundert Mikrometern.

Die Funkenerosion beruht auf dem thermischen Abtragsprinzip. Daher geht die Funkenerosion grundsätzlich mit thermischen Belastungen der

Bauteile einher. Allerdings wirkt die Funkenerosion nur geringe mechanische Kräfte auf die Bauteile aus. Trotzdem ist davon auszugehen, dass bei filigranen Kerbgelenken die fertigungstechnischen Einflüsse eine wesentliche Auswirkung auf das Bauteilverhalten haben.

Um diese Effekte an Kerbgelenken nachzuweisen ist es notwendig, LebensdauerTEST auf einem Prüfstand durchzuführen. Die Entwicklung und Konstruktion des Prüfstands wird im folgenden Abschnitt beschrieben. Abschließend wird die Anwendung des Prüfstands und erste Ergebnisse vorgestellt.

2 Entwicklung eines Lebensdauerprüfstands

Die besondere Herausforderung besteht darin, die filigranen Strukturen reproduzierbar in den Prüfstand einsetzen zu können, um wiederkehrende Prüfbedingungen zu gewährleisten. Außerdem müssen die Testgelenke sowohl in der Handhabung als auch direkt im Prüfstand vor Fehlbelastungen geschützt werden. Darüber hinaus muss die Mechanik des Prüfstands auf die zu erwartenden hohen Lastzyklen ausgelegt und die Ermüdung der Gelenke eindeutig detektiert werden. Um den Einfluss unterschiedlicher Schwenkwinkel und Belastungsarten untersuchen zu können, müssen die entsprechenden kinematischen Parameter des Prüfstands zusätzlich variabel gestaltet werden. Ebenso muss der Prüfstand die Möglichkeit bieten mehrere Gelenke zeitgleich unter den gleichen Bedingungen zu testen und dabei die unterschiedliche Lebensdauer eindeutig zu detektieren.

Stoffschlüssige Gelenke besitzen im Gegensatz zu konventionellen Gelenken keine ortsfeste Drehachse. Da sich der Momentanpol der Bewegung mit zunehmender Verformung verlagert, darf den Testgelenken auf dem Prüfstand keine starre Drehachse aufgezwungen werden. Dies könnte zu zusätzlichen Verspannungen in den Gelenken führen und die Biegespannungen überlagern. Als Konsequenz würde dies die Messergebnisse verfälschen. Daher wird, wie in Abb. 3 dargestellt, eine einfach versetzte Schubschleife als Mechanismus gewählt, um die Gelenke mit einem zuvor eingestellten Winkel definiert zu bewegen. Die kontinuierliche Bewegung des Schubsteins 3 erfolgt durch einen vorgelagerten angetriebenen nichtversetzten Schubkurbelmechanismus.

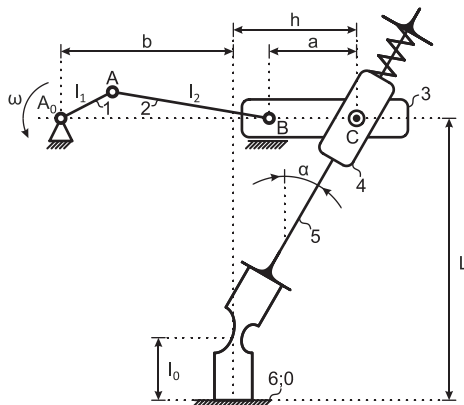


Abb. 3: Mechanismus

Die maximalen Schwenkwinkel α_{\min} und α_{\max} , unter der Annahme einer ortsfesten Drehachse ergeben sich nach Gleichung 1.

$$\alpha_{\max} = \tan^{-1} \frac{h_{\max}}{L - l_0} = \tan^{-1} \frac{l_2 + l_1 + a - b}{L - l_0}$$

$$\alpha_{\min} = \tan^{-1} \frac{h_{\min}}{L - l_0} = \tan^{-1} \frac{l_2 - l_1 + a - b}{L - l_0}$$
(1)

Betrachtet man die Parameter der Gleichung 1, dann können diese in variable und konstante Größen unterteilt werden. Die Länge l_0 ist durch die Gelenkgeometrie und die Strecke b sowie die Koppellänge l_2 der Schubkurbel sind konstruktiv durch die Gestaltung des Prüfstands vorgegeben und daher konstant. Der Versatz der Schubachse L dagegen kann durch Austausch zweier Säulen am Prüfstand verändert werden. Zusätzlich kann die Kurbellänge l_1 durch zwei in Reihe angeordnete Exzenter von null bis 24 mm stufenlos verändert werden. Die Nullstellung der beiden in Abb. 4 gezeigten Exzenter lässt sich durch einen Passstift exakt einstellen und arretieren. Somit kann das Gesamtsystem in der Nullstellung durch eine Messuhr kalibriert werden. Eine Schlüsselfläche an der zweiten Exzenterstufe ermöglicht zudem feine Einstellungen der beiden Exzenter gegeneinander. Durch die Messuhr wird der eingestellte Hub des Schlittens 3 gemessen und justiert. Eine

Klemmverbindung, realisiert durch eine geschlitzte Hebelnabe, verbindet die zwei Exzenterstufen kraftschlüssig.

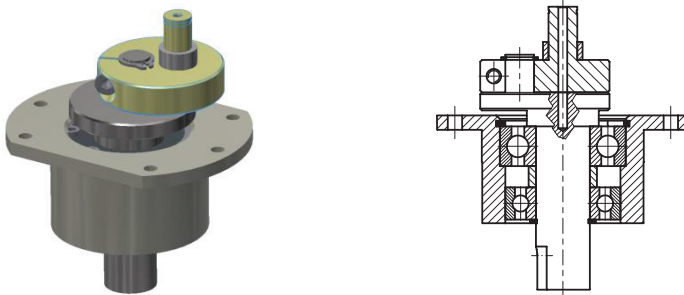


Abb. 4: Doppel-exzenter und Schnittdarstellung in der Nullstellung

Unterschiedliche Belastungsfälle der Gelenke lassen sich durch die Verschiebung des Drehschubgelenks C relativ zum Schubstein 3 einstellen. Um zwischen den Belastungsfällen wechselnd und schwellend zu variieren, muss die Strecke a in Abb. 3 nach Gleichung 2 verändert werden.

$$\underbrace{b - l_2}_{\text{rein wechselnd}} \leq a \leq \underbrace{l_1 + b - l_2}_{\text{rein schwellend}} \quad (2)$$

Auf dem Prüfstand wird die Position des Drehschubgelenks, welches mit einer zusätzlichen Platte auf dem Schlitten 3 montiert wird, durch eine gradlinige Kulissenführung (Schubelement) geführt und durch Schrauben in Langlöchern fixiert.

Eine definierte Einbaulage der Gelenke im Prüfstand wird durch Klemmringe, wie in Abb. 5 gezeigt, gewährleistet. Die Klemmringe können durch Passungen in der Grundplatte des Prüfstands reproduzierbar positioniert oder auf der gegenüberliegenden Seite an die Schwinge 5 in Abb. 3 adaptiert werden. Die Winkellage wird durch eine abgeflachte Seite am Ring und Anschlägen auf der Grundplatte des Prüfstands gewährleistet. Die Geometrie der Gelenkenden wird innerhalb des Projekts beibehalten. Daher wurden entsprechende Öffnungen in den Ringen durch Drahtrodieren hergestellt. Diese ermöglichen durch ein L-förmiges Druckstück die Gelenke im Klemmring über zwei Schrauben

zu klemmen. Eine Schraube ist in Verlängerung der Diagonalen des Gelenkendes angeordnet und gewährleistet, dass das Testgelenk exakt an beiden Referenzflächen anliegt. Durch die zweite Schraube wird das Gelenk zusätzlich in Hauptbelastungsrichtung geklemmt. Die Ausschnitte im oberen und unteren Klemmring sind spiegelverkehrt, um jeweils die gleichen Referenzflächen am Gelenk zu nutzen. Zur Montage wird zunächst der untere Ring auf einer glatten Referenzfläche positioniert und anschließend das Gelenk in den Ausschnitt eingesetzt. Eine versehentliche Verformung des Gelenks wird durch eine Montagehilfe verhindert, vgl. Abb. 5 b). Diese dient zusätzlich als Referenzmaß für den Abstand zwischen den Klemmrings.



Abb. 5: Montagerihenfolge der Gelenkeinheit

Die Gelenkeinheit ist durch die Montagehilfe sicher vor Fehlbelastungen geschützt und kann nur in einer bestimmten Position des Schlittens in den Prüfstand eingesetzt werden. Die Montagehilfe verbleibt in der Gelenkeinheit und wird vor dem Start der Lebensdaueruntersuchung entfernt.

Die Schwinge ist durch einen polierten Rundstahl mit 6 mm Durchmesser realisiert. Dieser weist eine harte Oberfläche und eine hohe Maßgenauigkeit auf. Somit kann in Kombination mit einer Passbohrung in einer aus Kupfer-Zink-Legierung hergestellten Hülse 4 ein spielfreies, geschmiertes, wartungsarmes Schubgelenk umgesetzt werden. Das Schubgelenk, wie in Abb. 6 gezeigt, ermöglicht zusätzlich zur Schubbewegung s eine Drehbewegungen um die Hochachse. Somit werden Torsionsbelastungen in den Testgelenken vermieden. Außerdem wird die Hülse durch eine orthogonale Bohrung drehend gelagert auf einem polierten Rundstahl 3 um die notwendige Funktion der Drehbewegung φ zu ermöglichen. Das Drehgelenk lässt ebenfalls eine zusätzli-

che Verschiebung in Achsrichtung zu, um Verspannungen und Fehlbelastungen auszuschließen.

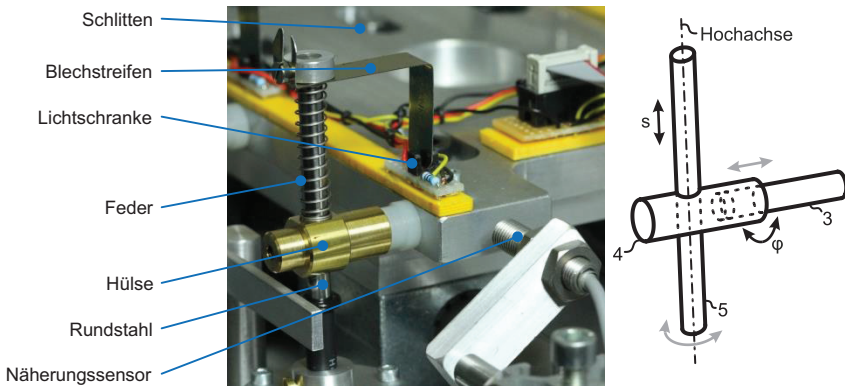


Abb. 6: Drehschubgelenk und Wirkprinzip

Die Gelenke werden auf dem Prüfstand solange hin und her bewegt, bis sie brechen. Um in diesem Fall Beschädigungen der Bruchflächen zu verhindern, sind die Gelenke über eine Feder, die sich an der Hülse des Drehschubgelenks und der Schwinge abstützt, auf Zug vorbelastet. Die Feder ist in Abb. 6 gezeigt und die Funktionsweise in Abb. 3 dargestellt. Somit wird das obere Bruchstück des Gelenks angehoben. Eine geringe Federrate wurde ausgewählt, um während der Bewegung keine gravierende Kraftänderung aufgrund der Längenänderung der Schwinge 5 ins Gelenk einzuleiten. Darüber hinaus wurde die Vorspannung so gering eingestellt, dass die Gewichtskraft des halben Gelenks sicher angehoben werden kann. Damit die obere Gelenkhälfte unmittelbar nach dem Bruch eine definierte Position einnimmt und in dieser durch die Feder gehalten wird, wurde auf dem polierten Rundstab durch eine Distanzhülse und einen O-Ring ein Endstop realisiert. Die Hubbewegung der Feder kann zusätzlich genutzt werden um den Bruch eindeutig zu detektieren. Ein Blechstreifen unterbricht im Normalbetrieb eine Lichtschranke auf dem Schlitten. Bei einem Bruch wird der Blechstreifen aus der Lichtschranke gehoben und durch einen Messaufnehmer detektiert. Die Zyklenzahl wird durch einen Näherungssensor aufgezeichnet. Dieser Sensor ist ebenfalls in Abb. 6 dargestellt.

Um bei den zu erwartenden langen Versuchszeiten einen höheren Durchsatz an Testgelenken in der gleichen Zeit zu erreichen, wurden sechs der zuvor für ein einzelnes Gelenk vorgestellten Vorrichtungen parallel am Schlitten, wie in Abb. 7 gezeigt angebracht. Diese Abbildung zeigt zudem, dass der Schubkurbelmechanismus sich entgegen der Abb. 3 in einer orthogonalen Ebene im Vergleich zu den 6 Schubschleifenmechanismen der Testgelenke bewegt.

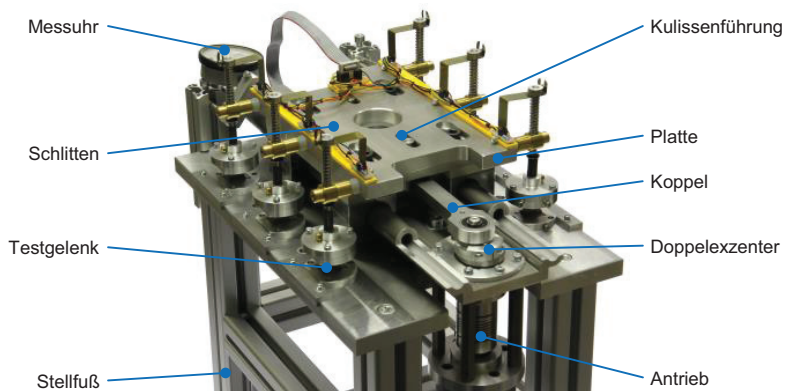


Abb. 7: Prüfstand

Als Linearführung wird eine drylin[®] Linearführung der Firma Iigus verwendet. Der Elektromotor ist von der Firma ebmpapst und ist über eine Drehmomentkupplung an die erste Exzenterstufe angeschlossen.

3 Anwendung

Um die fertigungstechnischen Einflüsse auf das Verhalten von Kerbgelenken erstmalig nachzuweisen zu können, wird eine rechteckförmige Kerbform ausgewählt. Durch den kreisförmigen Verlauf der Kontur ergibt sich im Vergleich zu anderen Kerbformen eine erhöhte Spannungskonzentration im geringsten Querschnitt. Somit wird eine mögliche Auswirkung der Randschicht maximiert.

Wie bereits erwähnt, ist für das Verhalten eines Gelenks eine möglichst kleine Stegdicke erstrebenswert. Große Kantenverhältnisse stellen bei diesen filigranen Strukturen eine technologische Herausforderung dar. In Vorversuchen konnte gezeigt werden, dass bei einer Gelenkbreite

von 15 mm eine verbleibende Stegdicke von 40 μm reproduzierbar herzustellen ist. Das in Abb. 8 gezeigte Gelenk hat ein Kantenverhältnis von 375 und liegt damit um den Faktor 1,8 über den bisher in diesem Zusammenhang veröffentlichten maximalen Aspektverhältnissen.

Zusätzlich zeigt die Abbildung die Änderung der mittleren Kristallorientierung, welche mittels Elektronenrückstreubeugungsuntersuchungen (engl. Electron Backscatter Diffraction, EBSD) detektiert wurden. In der Randschicht des Kerbgelenks ergeben sich Bereiche mit erhöhter Kristallorientierungsänderung, welche Rückschlüsse auf eine Veränderung der Randschicht zulassen.

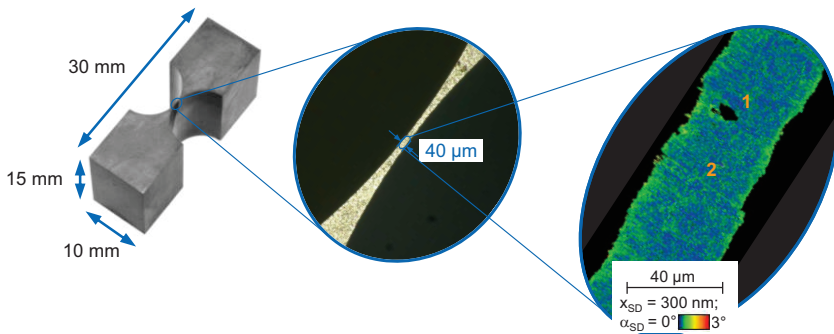


Abb. 8: Gefertigtes stoffschlüssiges Gelenk, unter dem Lichtmikroskop und die mittlere Kristallorientierungsänderung visualisiert mittels EBSD-Pattern

Es wurden 9 durch unterschiedliche Fertigungstechnologien hergestellte Gelenkgruppen getestet. Jede Gruppe wird durch 3 Testgelenke repräsentiert. Bei allen Gelenken wurden neun Nachschnitte durchgeführt. Alle gewählten Parameterkombinationen erreichten in den bisherigen Untersuchungen grundsätzlich eine gute Oberflächenqualität. Es wurden die Parameter Pausendauer (t_0) zwischen den Ladeimpulsen und Drahtvorschubgeschwindigkeit (v_f) in den Nachschnitten variiert. Ausgehend von der Standardtechnologie (\rightarrow) wurde die Pausendauer in zwei Schritten (\rightarrow , \nearrow , \uparrow) erhöht. Die Drahtvorschubgeschwindigkeit wurde vom Wert der Standardtechnologie erhöht bzw. reduziert (\rightarrow , \nearrow , \searrow). Ergänzend fand eine Untersuchung der Bearbeitungskombinationen aus diesen sechs Einzelwerten statt. Die Fertigungsreihenfolge der Testgelenke wurde willkürlich gewählt, um Einflüsse systematischer Fehler zu minimieren. Ebenso wurde die Reihenfolge der Le-

bensdaueruntersuchung auf dem Prüfstand zufällig gewählt. In Abb. 9 sind die Ergebnisse dieser ersten Lebensdaueruntersuchung dargestellt. Die waagerechten Pfeile repräsentieren die Standardtechnologie die jeweils anderen zeigen eine Erhöhung bzw. Reduktion der Technologie an. Die erzielten Lebensdauern der Gelenke, die während der Untersuchung brachen, sind als hellblaue Balken dargestellt. Gelenke, die mindesten 10^7 Lastwechsel überstanden haben, werden dunkelblau dargestellt.

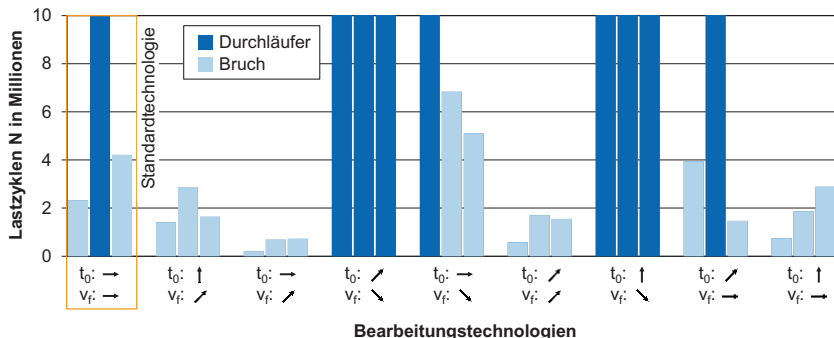


Abb. 9: Erreichte Lebensdauer der Testgelenke in Abhängigkeit von der Bearbeitungstechnologie

Wie die Abbildung zeigt, besitzt die Bearbeitungstechnologie starken Einfluss auf die Lebensdauer der stoffschlüssigen Gelenke. Obwohl die Änderungen in der Technologie insgesamt gesehen klein waren (für alle Gelenke 9 Nachschnitte), erreichten zwei Parameterkombinationen ausschließlich Durchläufer und vier Kombinationen ausschließlich Brüche. Alle Versuche, bei denen die Vorschubgeschwindigkeit reduziert und die Pausendauer erhöht wurde, resultierten in Durchläufern. Durch diese Maßnahmen konnte die thermische Schädigung des Gelenkwerkstoffs offensichtlich reduziert werden.

4 Fazit und Ausblick

Auf dem vorgestellten Prüfstand wurden über einen Zeitraum von neun Monaten Lebensdaueruntersuchungen durchgeführt. Zwischenzeitliche Wartungen haben keine Verschleißerscheinungen gezeigt. Vermeintliche Gebrauchspuren an den Gleitlagern konnten durch Polieren ent-

fernt werden. Die diagonale Fixierung der Klemmringe hat sich als sehr günstig erwiesen, um die filigranen Kerbgelenke ohne große mechanische Einwirkung exakt positionieren zu können. Ebenso haben die O-Ringe als Endlagenstopps fehlerfrei funktioniert und konnten zu Beginn der Experimente auf die notwendige Position eingestellt werden. Zudem lassen sie sich schnell entfernen, um den Rundstahl zu reinigen und erneut zu schmieren.

Mit den vorgestellten Ergebnissen der Lebensdaueruntersuchung an Kerbgelenken konnte bereits gezeigt werden, dass die Lebensdauer der Gelenke durch das Fertigungsverfahren beeinflusst wird. Weitere Untersuchungen zur besseren Beschreibung der Zusammenhänge stehen noch aus. Im Projekt werden diese Zusammenhänge an den Einzelgelenken untersucht. Die Erkenntnisse sollen langfristig dazu beitragen gesamte nachgiebige Mechanismen zu verbessern indem mögliche Imperfektionen durch das Fertigungsverfahren bei der Auslegung der Mechanismen vorab berücksichtigt werden kann. Zudem können somit Empfehlungen zur Fertigung der Gelenke gegeben werden.

Der Prüfstand ist zwar ausgelegt auf die im Projekt untersuchten Kerbgelenke. Allerdings kann dieser auch für weitere nachgiebige Mechanismen genutzt werden sofern die Geometrie der Gelenkenden beibehalten werden oder neue Klemmringe gefertigt werden. Prinzipbedingt ist der Prüfstand aktuell nicht in der Lage Rissbildung im Gelenk zu detektieren. Durch Ergänzung einer entsprechenden Optik mit zusätzlicher Software könnte der Prüfstand entsprechend modifiziert werden.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung des Projekts „Grundlegende Untersuchung zu stoffschlüssigen Gelenken mit Einsatz in hochgenauen parallelkinematischen Mikromanipulatoren“ mit den Zeichen CO282/13-2 bzw. KL500/90-2.

Literatur

- [1] Howell, L. L. Compliant Mechanisms. Wiley, 2001, isbn: 978-0-471-38478-6.

-
- [2] Raatz, A. Stoffschlüssige Gelenke aus pseudo-elastischen Formgedächtnislegierungen in Pararellrobotern, Vulkan Verlag, 2015, isbn: 978-3-8027-8691-4.
 - [3] Howell, L. L., Magleby, S. P., Olsen, B. M. Handbook of Compliant Mechanisms. Wiley, 2013, isbn: 978-1-119-95345-6.
 - [4] Bacher, J.-P., Joseph, C., Clavel, R. "Flexures for high precision robotics" In: Industrial Robot: An International Journal, Vol. 29 (2002), Iss: 4, S. 349-353.