

Titel

Piezobasierte aktive Stößelführung mit integrierter Regelung

IGF-Nr.: 20683 BR

Forschungseinrichtung

Forschungseinrichtung: Fraunhofer Gesellschaft e.V., Fraunhofer-Institut für
Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU)



Ansprechpartner beim Institut: Dr.-Ing. Wolfgang Zorn

0351 / 4772 2789

wolfgang.zorn@iwu.fraunhofer.de

Danksagung

Das IGF-Vorhaben 20683 BR der Forschungsvereinigung Forschungsgemeinschaft
Werkzeuge und Werkstoffe e.V. – FGW, Papenberger Straße 49, 42859 Remscheid
wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen
Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und
Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Förderung des Forschungsprojektes.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Ausgangssituation

Neue Materialien und Kostendruck zwingen die Hersteller, ihre Maschinen und Prozesse an der Auslastungsgrenze und damit mit maximalen Standzeiten zu betreiben. Maschinenausfälle infolge von planmäßigen Wartungen führen zwangsweise dazu, dass Stillstandszeiten entstehen. Derartige Eingriffe dienen dazu, Verschleißteile in Maschinen zu überprüfen und ggf. zu ersetzen.

Insbesondere Antriebssystemen von Werkzeugmaschinen kommt eine hohe Bedeutung in der Fertigungspräzision zu. Damit diese auch bei hoher Dynamik und Wärmeentwicklung gewährleistet ist, werden zur Führung meist Profilschienenführungen eingesetzt, da diese mit entsprechender Vorspannung eine spielfreie Relativbewegung ermöglichen. Demgegenüber stellt die Vorspannung eine wesentliche Einflussgröße auf die Lebensdauer der beteiligten Komponenten dar, da damit die mittlere Last vergrößert wird. Entscheidend dabei ist, dass diese Last auch in den Arbeitsphasen der Maschine wirkt, in denen die Fertigungsgenauigkeit nicht relevant ist. Beispiele sind z.B. Werkzeugwechsel und Zustellbewegungen in Werkzeugmaschinen oder die rückwärtige Stößelbewegung in Umformmaschinen beim Öffnen des Werkzeugs. Integrierte Mechanismen zur adaptiven Anpassung der Vorspannkraft je nach Situation könnten somit die Lebensdauer von Komponenten verlängern.

Forschungsziel

Im Rahmen des Projektes sollte eine aktive Profilschienenführung entwickelt werden. Die Basis dafür stellt eine reale, kommerziell verfügbare Komponente, welche durch einen Industriepartner eingebracht wird. Integrierte Piezoaktoren sollen dafür sorgen, dass die Komponente zwischen zwei Vorspannklassen wechseln kann. Üblicherweise bestimmen die Kunden bereits beim Kauf über die gewünschte Vorspannklasse – eine nachträgliche Anpassung ist nur durch den Austausch der Wälzkörper möglich und daher sowohl zeit- als auch kostenaufwändig. Ein flexibles Umschalten ermöglicht den Anwendern damit, den Kompromiss aus Präzision und Lebensdauer zumindest teilweise umgehen zu können. Die adressierten Vorspannklassen bestimmen hierbei die Zielvorgaben für die zu realisierende Stellperformance bzw. Effektstärke durch die Aktorik.

Vorgehensweise

Ausgangspunkt der Entwicklung ist die Ermittlung und Zusammenfassung der erforderlichen Spezifikationen, welche die zu realisierende Komponente erfüllen soll. Diese sind in Tabelle 1 kurz zusammengefasst. Das Erreichen der erforderlichen Effektstärke unter Berücksichtigung der verfügbaren Bauräume (normierte Außenabmessung, Kugelrückführungen) stellt die wesentliche Herausforderung des Projektes dar, welche Kompetenzen aus dem Bereich Konstruktion, Simulation und FE-gestützter Optimierung erfordert. Der mechatronische Systementwurf basiert auf einer möglichst exakten Nachbildung der strukturmechanischen und nichtlinearen Eigenschaften der Profilschienenführungs-Komponente. Diese werden maßgeblich durch die Wälzkörper und die damit eingebrachte Systemvorspannung bestimmt. Mit dem Modell ist es möglich, die Auswirkung von konstruktiven Anpassungen am Führungswagen zu berechnen und die damit verbundenen Parameter mittels einer FE-Optimierung so einzustellen, dass die Zielvorgaben erreicht werden. Unter Mitwirkung der PA-Mitglieder erfolgt im Anschluss daran die Anpassung der Realkomponente. Für den Betrieb der Aktorik ist die Entwicklung einer geeigneten Leistungselektronik erforderlich, welche sowohl die erforderliche Aktorspannung als auch die notwendige Schaltdynamik realisieren kann. Die aufgebaute Komponente soll schließlich in eine reale Umformmaschine eingebaut werden, um die Wirkung der schaltbaren Vorspannung auch auf den Prozess zu erproben.

Tabelle 1: Zusammenfassung der zu realisierenden Spezifikationen

Parameter	Wert
Basis-Komponente	KUVE-35B (Fa. Schaeffler AG)
Stellperformance (Ziel)	0,04C (V1) ↔ 0,1C (V2) (C: dynamische Tragzahl)
Dynamik (Ziel)	f > 10Hz
Betriebsspannung	24V
Aktorspannung	150V

Forschungsergebnisse

Vorbereitend zur Modellbildung wurden ausgehend von Grobkonzepten zunächst verschiedene Detailkonzepte entworfen, um die grundsätzliche Anordnung von Piezoaktorik im Hinblick auf ihre Effektstärke bewerten zu können. Es zeigte sich dabei, dass Konzept 3 (vgl. Abbildung 1) im Umschaltverhalten die höchsten Potentiale aufwies. Charakteristisch für dieses Konzept ist dabei eine seitliche Anordnung der Piezoaktorik sowie eine Schlitzung oberhalb der Wälzkörperbahn, was problemlos mittels mechanischer Nacharbeit realisierbar ist. Das zugrundeliegende Modell berücksichtige hierbei ein volumetrisches Teilstück mit vollvernetzter Kugel. Diese Art der Modellierung war vergleichsweise rechenintensiv und bedurfte entsprechender Anpassungen für die weitere Verwendung.

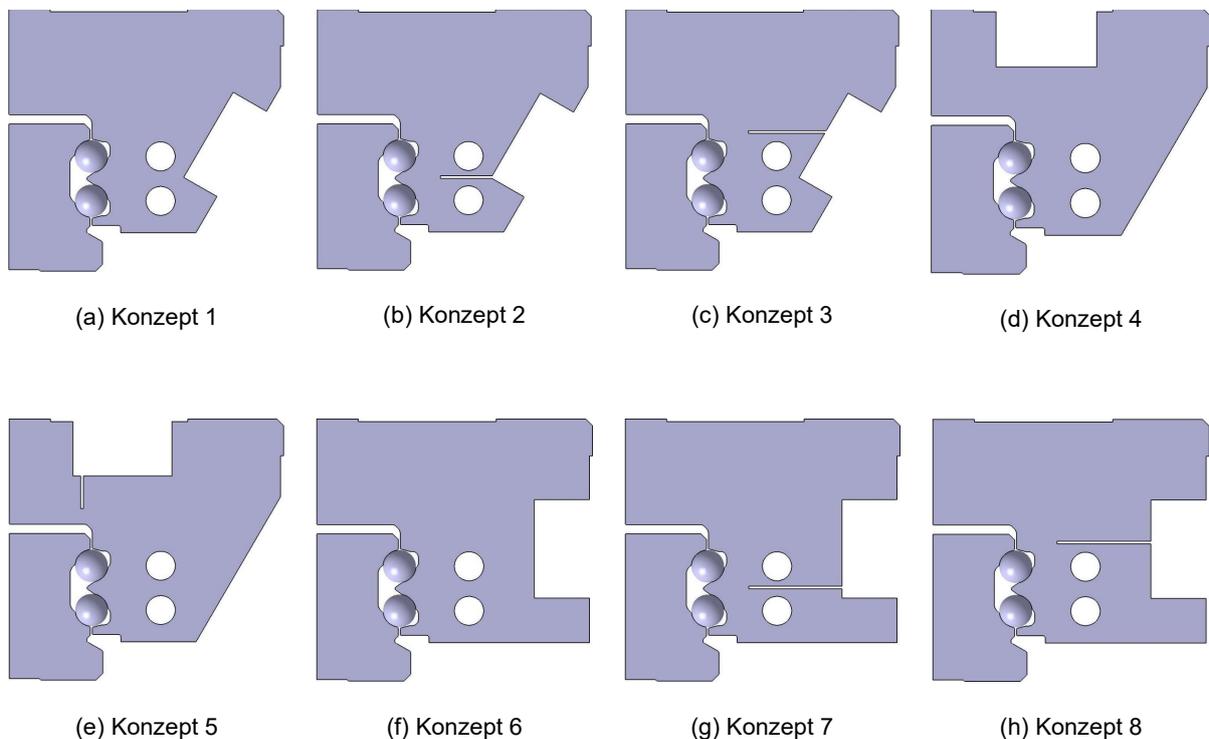


Abbildung 1: Detailkonzepte für die Struktursimulationen

In Vorbereitung auf die darauffolgende Optimierung wurde das Modell entsprechend parametrisiert. Zu den Designparameter zählen insbesondere der Integrationswinkel des Aktors, die Integrationshöhe sowie die Ausprägung und Lage des Schlitzes (siehe Abbildung 2a). Zur Reduktion des Simulationsaufwandes wurden Symmetrieeffekte ausgenutzt und die Kugeln durch nichtlineare Federkennlinien substituiert (siehe Abbildung 2b).

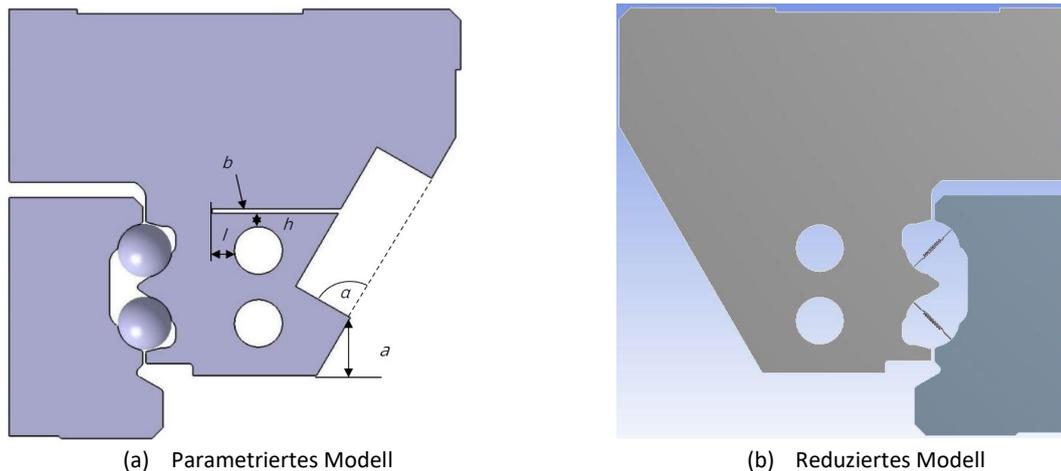


Abbildung 2: Modellvorbereitung für die Optimierungsanalyse

In weiterführenden Arbeiten wurde das Modell noch verfeinert. Dies umfasste neben einer Überarbeitung der Kugelmodellierung auch die erforderlichen Modellabgleiche anhand der Angaben des Herstellers.

Zwar zeigte sich für Konzept 3 das größte Variationspotential, allerdings wurde noch nicht der Zielwert von $X_{pr}=0,1$ der Vorspannungsklasse V2 erreicht. Aufgrund der größeren Nachgiebigkeit des Piezoaktors werden zudem bei allen Varianten nicht der initiale Vorspannungsklassenfaktor von $X_{pr}=0,04$ erreicht. Allerdings kann dies durch eine Anpassung der Aktorvorspannung kompensiert bzw. konstruktiv gelöst werden.

Der vorgeschlagene Aufbau von Konzept 3 lässt sich über verschiedene Größen parametrieren. Grundsätzlich stellt der Piezoaktor mit seinen geometrischen Eigenschaften eine gesonderte Möglichkeit dar, das Adaptionverhalten zu beeinflussen. Je größer der Aktorquerschnitt, die verwendete elektrische Spannung und die verfügbare Aktorlänge ist, desto mehr Verformungsenergie kann in die Führungskomponente eingekoppelt werden; die Zusammenhänge sind somit vergleichsweise offensichtlich. Deutlich komplexer ist das Wirken weiterer geometrischer Parameter (Schlitzbreite, -tiefe, -position, Aussparungen). Aufgrund dieser Komplexität wird zunächst ausschließlich mit diesen Parametern eine numerisch gesteuerte Optimierung mittels ANSYS umgesetzt. Als Ziel der Optimierung wird die Maximierung der Kugelbelastung nach Aktivierung der Aktorik festgelegt.

Mittels der mit dieser Methode ermittelten Werte wurde das CAD-Modell final dimensioniert werden. Hierfür können wiederum die Vorspannungsklassen-Faktoren für den nichtaktivierten ($X_{pr}=0,029$) und für den aktivierten Fall ($X_{pr}=0,084$) ermittelt werden. Es ist zu erkennen, dass durch die Optimierung die Effektstärke im eingeschalteten Fall um ca. 13,5% gesteigert werden kann. Wird darüber hinaus ein statt dem Niedervolt-Aktor ein Hochvoltaktor mit einer Blockierkraft von ca. 30 N/mm² und einer freien Längenänderung von 0,13% (freier Hub: 23,4 μ m) genutzt, ergäbe sich aus der Simulation ein erreichbarer Vorspannungsklassenfaktor von $X_{pr}=0,11$ und damit auch die nächsthöhere Vorspannungsklasse.

Die bisherigen Ausführungen bezogen sich ausschließlich auf das minimalisierte Scheibenmodell des Führungswagens. Im Hinblick auf einen Realaufbau sind darüber hinaus noch weitere Aspekte zu beachten. Der wesentliche Unterschied besteht hierbei im verfügbaren Integrations- und Wirkungsbereich der Piezoaktoren. Aufgrund der vorhandenen Bohrungen des Führungswagens kann nicht die vollständige Seite mit Piezoaktoren ausgestattet werden. Dies lässt erwarten, dass die Effektstärke für die vollständige Komponente gegenüber dem Scheibenmodell reduziert wird. Daneben ist für die Piezoaktorik eine entsprechende Vorspannungseinrichtung erforderlich, welche mittels Schrauben realisiert werden kann.

Auch dieses Modell lässt sich mittels der zuvor durchgeführten Teilmodellierung der Wälzkörper als Gesamtmodell simulieren, um die resultierende Effektstärke im Hinblick auf die Vorspannungsänderung abschätzen zu können. Mit den zuvor angepassten Piezoaktoreigenschaften und der zusätzlichen Berücksichtigung der Kalottenaufnahme zur Querkraftentkopplung ergibt sich ein erreichbarer Vorspannungsklassen-Faktor von $X_{pr}=0,094$. Dieser Wert ist wie zu erwarten geringer als die Auslegung basierend auf dem Scheibenmodell und auch geringer als der Zielwert von $X_{pr}=0,1$.

Im Rahmen der grundsätzlichen Erprobung der einzelnen Aktoren ebenso wie der Komponente wurde anfangs mit einer kommerziell verfügbaren Piezoendstufe gearbeitet, welche durch ein Mitglied des projektbegleitenden Ausschusses zur Verfügung gestellt wurde. Für den Betrieb der piezoaktiven Profilschienenführung sollte hingegen eine geeignete Betriebselektronik entwickelt werden, direkt an der Komponente integriert werden kann und verschiedenen Anforderungen genügt. Im Hinblick auf den späteren Einsatz in einer produktionstechnischen Anlage musste eine Versorgung mit Schutzkleinspannung (typischerweise 24V DC) sichergestellt werden. Um die mit den Piezoaktoren realisierbare Performance auszunutzen, muss zudem eine geeignete Betriebsdynamik gewährleistet sein. Durch eine entsprechende Auswahl der elektronischen Komponenten konnte ein Zeitkonstante von 40ms ermöglicht werden, was für die ausgewählten Piezoaktoren eine Betriebsdynamik (Aktivierung + Deaktivierung) von über 10Hz ermöglichte und für die adressierte Anwendung als ausreichend erachtet wurde. Die verwendeten Piezoaktoren sind in Abbildung 3 dargestellt.

Zur konstruktiven Auslegung des Demonstrators zählt auch, dass auf Basis der Optimierungen aus AP2 Maßnahmen geschaffen werden, welche einen robusten Betrieb der Gesamtkomponente zulassen. Ein wesentliches konstruktives Merkmal stellt die Schlitzung der Komponente dar. Diese wurde für den Realaufbau dahingehend erweitert, dass eine schädigende Kerbwirkung mit einhergehenden Spannungsspitzen ausgeschlossen werden kann.

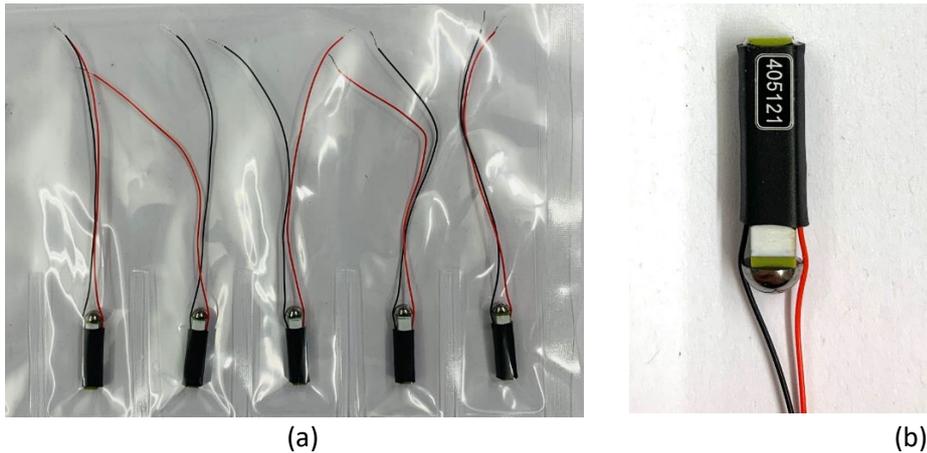


Abbildung 3: Verwendete Piezoaktoren (Originalverpackt (a), Detailbild (b))

Ein weiterer Aspekt betrifft das Zusammenwirken von Aktoren und Führungswagen. Durch die Anpassung der Komponente entsteht sinngemäß ein leichtes Kippen des unteren Teiles des Führungswagens, was einer Verschiebung der Neigung der Kontaktflächen zwischen Aktorik und Führungswagen zueinander bewirkt. Dies führt ohne weitere Maßnahmen zu einer Einkopplung von Querkräften in die Piezoaktorik, welche wiederum äußerst empfindlich auf diese Form von Kräften führt und mittelfristig zu irreparablen Schäden am Aktor führen kann.

Zur Vermeidung dieser Querkräfte wurde ein Kugel-Kalotten-Kontakt realisiert. Dieser sorgt dafür, dass der Piezo stets in axialer Richtung belastet wird. Herstellerseitig wurden entsprechende Kontaktkörper auf die Piezoaktorik appliziert. Die Kalotte selbst konnte nicht direkt in den Führungswagen eingebracht werden. Dafür wurde ein separates Zwischenstück vorbereitet, welches zusammen mit dem Aktor eingebracht und montiert werden muss.

Ein weiterer Aspekt betrifft die Vorspannung des Gesamtsystems. Aufgrund der Schwächung der Gesamtstruktur ist zu erwarten, dass die Ausgangsvorspannung geringer als die V1-Vorspannungsklasse sein wird. Da auch nach der Optimierung die Effektstärke noch nicht ausreichend ist, um die V2 zu erreichen, könnte über eine Anpassung der Vorspannung eine Verschiebung des Gesamteffektes erreicht werden. Auf diese Weise würde zum einen im nicht aktivierten Fall eine Vorspannung auf V1-Niveau erreicht werden, während im aktivierten Fall eine Vorspannung auf V2-Niveau realistisch wäre. Zur Einbringung der Vorspannung wurde der Einsatz von mehreren Gewindestiften gewählt, welche unabhängig voneinander gegen den Adapter verspannt werden können.

Für den Demonstrator wurde der Schlitten mit der schlussendlich aufgebauten Elektronik bestückt, welche mit einem separaten Schalter aktiviert werden konnte. Die Aktivierung der Piezoaktorik führte beim manuellen Verschieben des Schlittens zu einem spürbaren Ansteigen der Reibungskräfte infolge der größeren Wälzkörperpressung. Der Demonstrator ist in Abbildung 4 dargestellt.

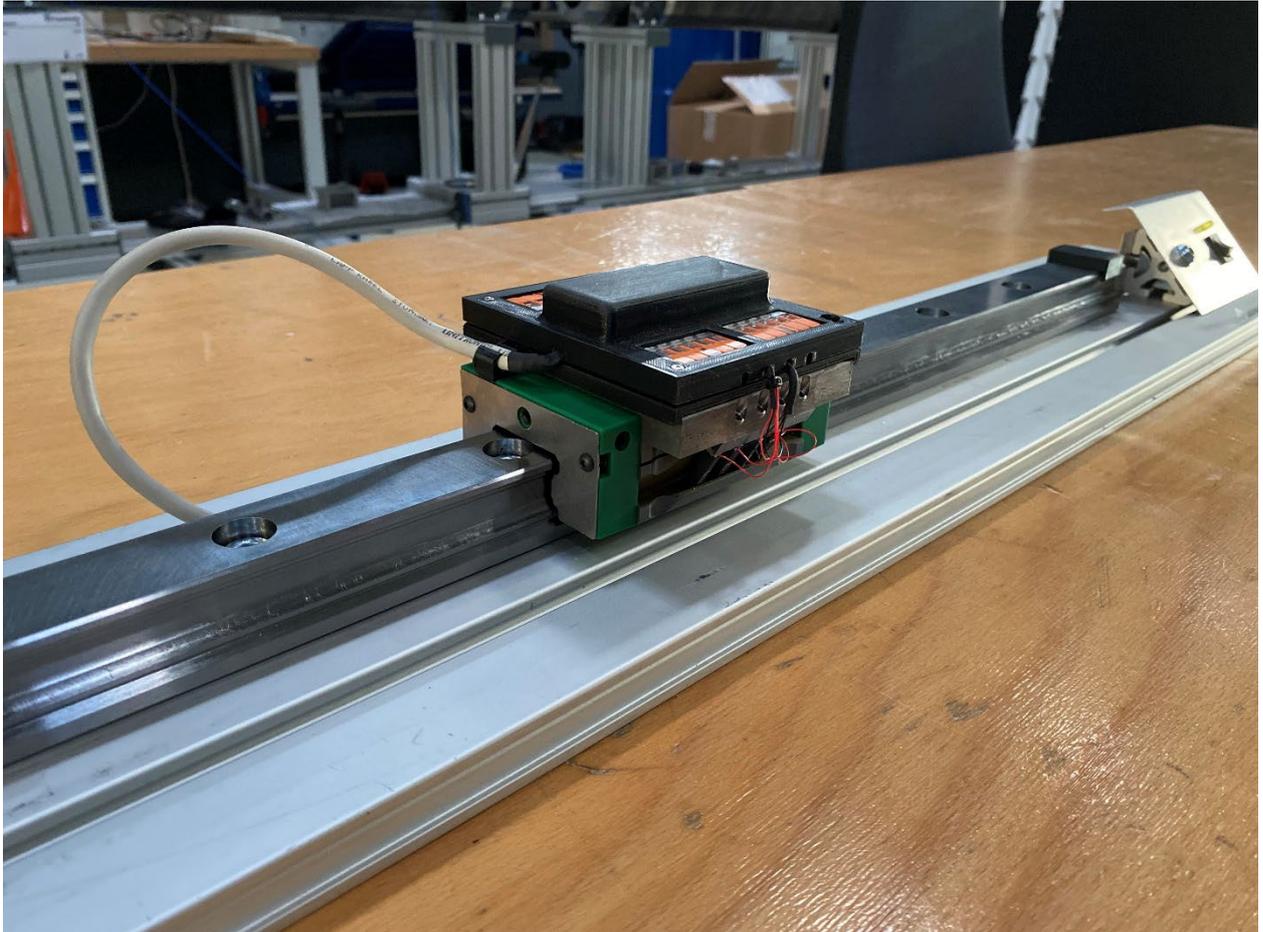


Abbildung 4: Aufgebauter Demonstrator mit Druckschalter zur Aktivierung

Ein wesentliches Ziel des Projektes war die Realmaschinenintegration der piezoaktiven Profilschienenführung in Form einer Stößelführung. Hierfür wurden zwei Komponenten aufgebaut und in eine bestehende Umformmaschine integriert. Abbildung 5 zeigt die Maschine sowie im Detail die integrierten Profilschienenführungen, welche die bisher verbauten Gleitführungen ersetzen. Zwar wurde nur eine Ecke des Stößels geführt, jedoch werden aufgrund des Formschlusses der Führung bis auf die Vertikalbewegung alle Freiheitsgrade eingeschränkt.

Im Rahmen von Belastungsversuchen sowohl gegen Referenzfederlasten (Polymerfeder) als auch im Realversuch wurde das Verkippungsverhalten ebenso wie die sich einstellende Lage der resultierenden Gesamtkraft für den nicht-aktivierten und aktivierten Fall verglichen.

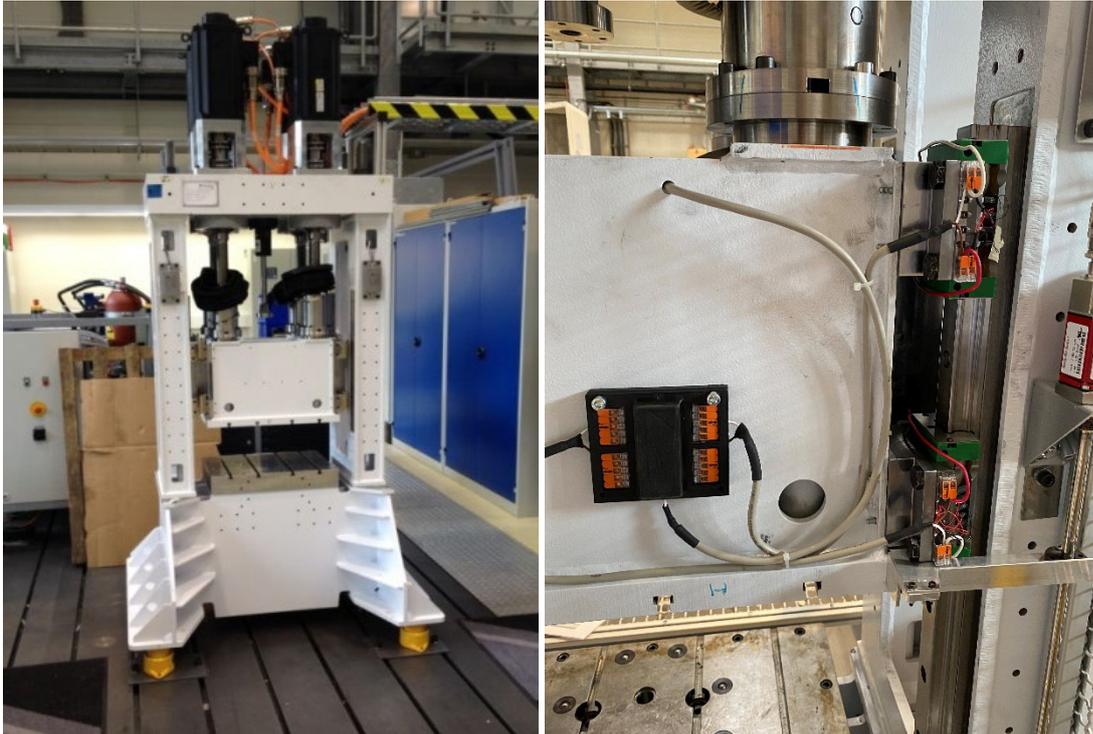


Abbildung 5: Reale Umformmaschine (links) und Integration der piezoaktiven Stößelführung (rechts)

Hierbei ließen sich folgende Ergebnisse zusammenfassend ableiten:

- Die piezoelektrisch aktivierte Erhöhung der Vorspannung der Profilschienenführung bewirkt eine Verringerung der Stößelverkipfung.
- Die piezoelektrisch aktivierte Erhöhung der Vorspannung der Profilschienenführung reduziert die Streuung der sich einstellenden Lage der resultierenden Gesamtkraft im Realprozess. Die erlaubt eine Verbesserung der Prozessstabilität insbesondere in der Serienfertigung.

Zusammenfassung

Die im Rahmen des Projektes entwickelte Methodik ermöglichte die Entwicklung einer piezoaktiven Profilschienenführung auf Basis einer kommerziell verfügbaren Komponente. Die integrierten Piezoaktoren ermöglichen eine stufenlose Erhöhung der Vorspannkraft im laufenden Betrieb ohne signifikante Latenzzeit. Die für das Projekt aufgebaute Komponente ermöglicht eine Änderung zwischen zwei Vorspannklassen. Damit lässt sich je nach Anwendungsfall die Lebensdauer der Komponente signifikant erhöhen. Im Projekt wurde zudem die Auswirkung der Änderung der Vorspannung in einem Umformprozess experimentell untersucht.

Ein besonderer Dank gilt allen Mitgliedern im projektbegleitenden Ausschuss für die gute Zusammenarbeit und für die Unterstützung bei der Durchführung der Forschungsarbeiten.

Eine Langfassung der Forschungsarbeiten kann in Form eines Schlussberichts bei der Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V., Papenberger Str. 49, 42859 Remscheid, www.fgw.de, angefordert werden.

Weiter Informationen erhalten Sie bei Herrn Dr.-Ing. Wolfgang Zorn unter wolfgang.zorn@iwu.fraunhofer.de.