
VORSPANNKOMPENSATION EINES DOPPELMUTTERS SYSTEMS AUF BASIS THERMISCHER FORMGEDÄCHTNISELEMENTE

I. Navarro y de Sosa, André Bucht, T. Junker, K. Pagel, W.-G. Drossel
7. Tagung "Feinwerktechnische Konstruktion".



Dresden, den 5. November 2013

© Fraunhofer IWU

VORSPANNKOMPENSATION EINES DOPPELMUTTERS SYSTEMS AUF BASIS THERMISCHER FORMGEDÄCHTNISELEMENTE

I. Navarro y de Sosa, André Bucht, T. Junker, K. Pagel, W.-G. Drossel
7. Tagung "Feinwerktechnische Konstruktion"



Dresden, den 5. November 2013

© Fraunhofer IWU
2



AGENDA

1. Einleitung
 - Formgedächtnislegierungen
 - Antriebe in Werkzeugmaschinen
2. Motivation
3. Auslegung und Konstruktion
4. Experimenteller Funktionsnachweis
5. Zusammenfassung

© Fraunhofer IWI
3



Fraunhofer
IWI

1. Einleitung

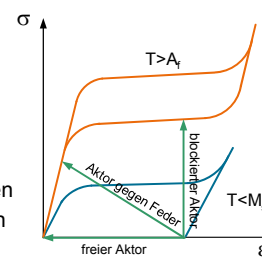
Formgedächtnislegierungen-Grundlagen

Mechanismus:

- Thermisch induzierte Phasenumwandlung ändert die Gefügestruktur → Spannungs-Dehnungs-Verhalten

Effekte:

- *Pseudoelastizität*: reversible 8% Dehnung
- *Ein-Weg-Effekt*: mechanisches Rückstellen beim Erhitzen
- *Zwei-Weg-Effekt*: Formänderung bei Erhitzen und Abkühlen



- max. Dehnung: 5 %
- Spannung: 350 N/mm²
- Frequenzen: <1Hz



Verschiedene FGL-Aktorgeometrien



Quelle: Memory-Metalle

© Fraunhofer IWI
4



Fraunhofer
IWI

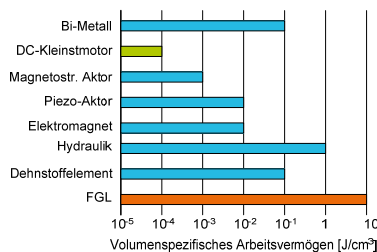
1. Einleitung

Formgedächtnislegierungen-Eigenschaften

- meist Einsatz von binären **Nickel-Titan-Legierungen**
- kommerziell verfügbar als Draht, Stab, Rohr oder Blech
- Umwandlungstemperaturen** zwischen **-200°C und +100°C** abhängig von Legierungszusammensetzung
- Dehnung** bis **maximal 5%** abhängig von der zu erreichenden Zyklenzahl
- Blockierkräfte bis 350 N/mm²** abhängig von Zyklenzahl
- bei entsprechender Auslegung **Zyklenzahlen >1.000.000 möglich**
- sehr **große** spezifische **Energiedichte**
→ sehr großes Miniaturisierungspotential



Verschiedene FGL-Aktorgeometrien



© Fraunhofer IWU
5

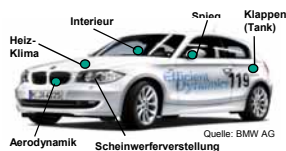


1. Einleitung

Anwendungen von FGL – im Kfz

Stellantriebe kleiner Leistung

- Motivation:** Gewicht, Baugröße, Preis, Akustik, EMV



Beispiel 1: Tankklappe - schaltend

- Antriebsparameter:
 - Kraft: 10 N → Durchmesser: 0,3 mm
 - Weg: 5 mm → Aktorlänge: 120 mm



Eigenschaft	E-Motor	FG-Aktor
Gewicht	104 g	10 g
Teilezahl	10	3

Beispiel 2: Klimaklappe – stufenlos geregelt

- Antriebsparameter:
 - Sensorlose Regelung
 - Kraft: 5 N → Durchmesser: 0,152 mm
 - Weg: 9 mm → Aktorlänge: 230 mm



Eigenschaft	Schrittmotor	FG-Aktor
Gewicht	ca. 65 g	ca. 20 g
Anzahl Bauteile	ca. 20	ca. 10

© Fraunhofer IWU
6



1. Einleitung

Anwendungen von FGL - Kfz

Beispiel 3: Energieautarke Kühlluftklappe

- Ersatz des Motors mit Drahtaktor
- schaltender Betrieb
- Bei geeigneter Platzierung kann die Wärme des Motors zur Aktivierung genutzt werden
- Antriebsparameter
Kraft: 24 N
Weg: 10 mm
- Aktorlänge: 275 mm
- Aktordurchmesser 3 x 0,5 mm
Aktorquerschnitt: 0,6 mm²



Stellantrieb Kühlluftklappe – Elektroantrieb



Stellantrieb Kühlluftklappe – FG-Antrieb

Eigenschaft	E-Motor	FG-Aktor
Gewicht	190	76g
Teilzahl	7	3

© Fraunhofer IWI
7

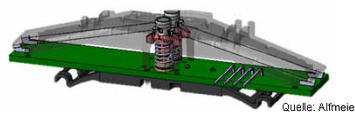


Fraunhofer
IWI

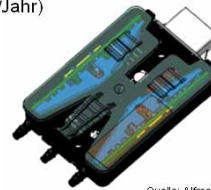
1. Einleitung

Anwendungen von FGL - Kfz Ventiltechnik

- **Serieneinsatz** im Automobil durch **Alfmeier Präzision AG**:
 - FG-Antrieb für 3/3-Wegeventil zum Einsatz in pneumatischen Sitzanwendungen (Stückzahl: mehrere Mio./Jahr)



Quelle: Alfmeier



Quelle: Alfmeier

- **steigendes Interesse** bei OEM's und Zulieferern
- **Mitte 2011**: Gründung der **Actuator Solution GmbH** durch Alfmeier Präzision AG und SAES Getters
 - Ziel: Bündelung und Forcierung der Formgedächtnis-Aktivitäten
- **Anfang 2012**: Übernahme der FG Innovation GmbH (Ausgründung RUB) durch **Otto Egelhof GmbH & Co. KG** (Zulieferer Ventil- und Klimatechnik)
 - Ziel: Entwicklung und Markteinführung von FG-Stellaktoren

© Fraunhofer IWI
8



Fraunhofer
IWI

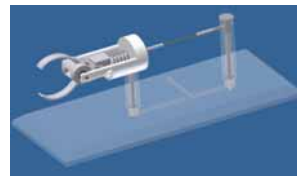
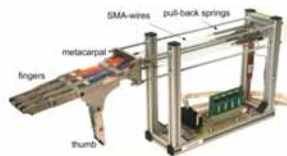
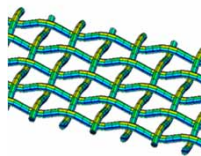
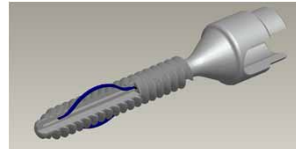
1. Einleitung

Anwendungen von FGL - Medizintechnik

Beispiele: Hüftimplantat (o.r.), adaptive Schraube (m.r.), funktionales Operationswerkzeug (u.r.), Prothese (u.m.) und adaptive Textilien (u.l.)

Vorteile

- Materialien sind **biokompatibel**
- skalierbares Arbeitsvermögen
- aktive Eigenschaften vergleichbar mit **Muskel**
- Integration sowohl von **Aktor-** als auch von **Sensoreigenschaften**
- superelastischer Effekt, Formgedächtniseffekt



© Fraunhofer IWU
9



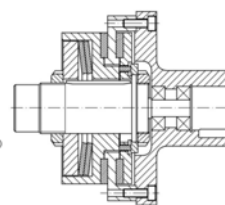
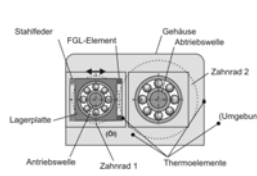
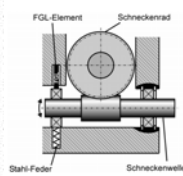
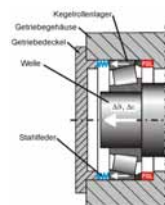
Fraunhofer
IWU

1. Einleitung

Anwendungen von FGL - Maschinenbau

Beispiele: Vorspannung in Kegelrollenlager, Spielverstellung in Schneckengetriebe und Stirnradgetriebe und Sicherheitskupplung (v.l.n.r.) nach [Bauer]

- **Verwendungszweck:** Spielanpassung, Vorspannungsänderung, Sicherheitsfunktion
 - autarker selbstregelnder Betrieb
 - insb. wälzgelagerte Maschinenelemente vorteilhaft
- verringert den **Verschleiß** und erhöht damit die **Sicherheit** und **Verfügbarkeit** von Werkzeugmaschinenkomponenten



© Fraunhofer IWU
10



Fraunhofer
IWU

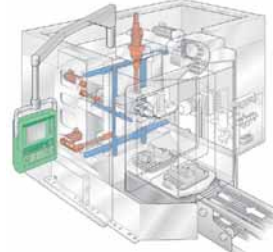
1. Einleitung

Anforderung an Werkzeugmaschinen

- hohe Produktivität
- hohe Genauigkeit
- hohe Verfügbarkeit



GESTELL + FÜHRUNGEN + ANTRIEB + STEUERUNG



Quelle: Bearbeitungszentrum, Bosch Rexroth Handbuch Lineartechnik

Die Wärmeausdehnung begrenzt die Bearbeitungsgenauigkeit der Werkzeugmaschine selbst bei Klimatisierung (90% des E-Verbrauchs)

© Fraunhofer IWI
11



Fraunhofer
IWU

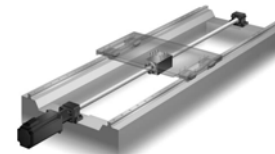
1. Einleitung

Vorschubantriebe in Werkzeugmaschinen

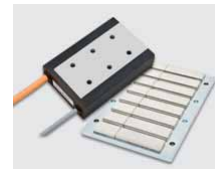
- Ritzel – Zahnstange
 - Wandeln Rotations- in Translationsbewegung um
 - Mechanische Elemente stark spielbehaftet
- Gewindetriebe
 - Wandeln Rotations- in Translationsbewegungen um
 - Mechanische Übertragungselemente oft spielbehaftet und limitieren Dynamik
 - Kugelgewindetriebe (KGT) am meistens verwendet
- Linearmotor
 - Direkter Erzeugung der Linearbewegung ohne mechanische Übertragungselemente
 - Hochdynamisch
 - Schlechter Wirkungsgrad
 - Hohe Kosten



Quelle: Wittenstein



Quelle: Bosch Rexroth Kugelgewindetriebe Katalog



Quelle: IDAM

© Fraunhofer IWI
12

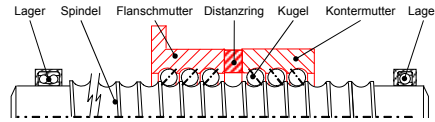


Fraunhofer
IWU

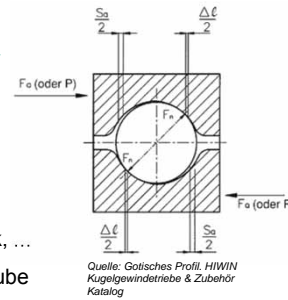
1. Einleitung

Kugelgewindetriebe KGT

- geringer Verschleiß, hohe Lebensdauer
- hoher Wirkungsgrad, hohe Präzision
- kein Stick-Slip-Effekt (Haftgleiteffekt)
- **Positioniergenauigkeit = f (Axialspiel)**



Arten	Umkehrspiel, S_u	Thermospiel, Δl_{th}	Einfederungs spiel, Δl
Ursache	fertigungsbedingtes Spiel	Wärmeausdehnung	wirkende normale Kraft, F_n
Lösung	Vorspannen mit innerer Kraft, P steuerungstechnische Maßnahmen	adaptronische Systeme andere Methoden	steuerungstechnische Maßnahmen



- **Vorspannmöglichkeiten**
 - Doppelmutter: **Distanzscheiben**, Differentialring, Unilock, ...
 - Einzelmutter: Kugelgröße, Steigungsversatz, Dehnschraube
- **Nachteile:**
 - Mechanik mit vielen **Einzelteilen**
 - Zugang zum KGT notwendig → **keine Anpassung im Betrieb möglich**

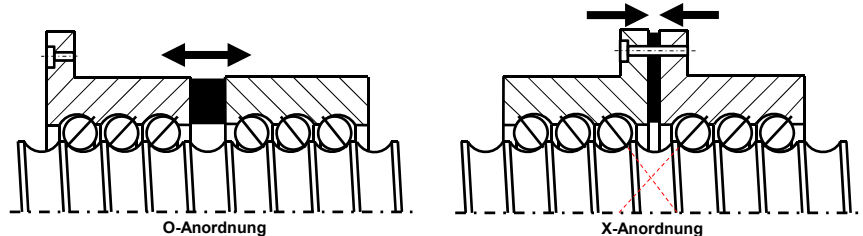
© Fraunhofer IWU
13



1. Einleitung

Kugelgewindetriebe KGT - Doppelmuttersysteme

- Anforderungen an Kugelgewindetriebe:
 - hohe **Steifigkeit** und **spielfreier** Betrieb
- spielfreies Fertigen des Wälzkontakts aufwändig → KGT vorspannen
- Unterscheidung zwischen Einzel- und **Doppelmutter-System**
- **Auseinanderdrücken** der Mutterhälfte → **O-Anordnung**
Spindel unter **Druckspannung**
- **Zusammendrücken** der Mutterhälfte → **X-Anordnung**
Spindel unter **Zugspannung**



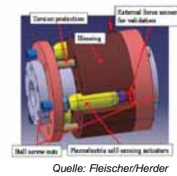
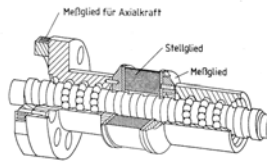
© Fraunhofer IWU
14



1. Einleitung

Kugelgewindetriebe KGT – Vorspannungseinstellung mittels Piezoaktorik

- Auslegungskriterien: **Kraft**, **Weg** und **Dynamik**
- bedarfsgerechter Konstruktion → mechanische Vorspannung zur **Entkopplung** von **Scherkräften / Momenten**
- Auslegung **Leistungsverstärker** und **Steuerelektronik**
- Elektrische **Isolation** der Komponente und **Zuführen** der elektrischen Energie
- **Problem:** hohe Kosten, Bauraum, Energiezuführung



© Fraunhofer IWU
15



2. Motivation

Prozessanforderungen

- **hohe Vorspannung:** genaue Positionierung und hohe Steifigkeit
- **niedrige Vorspannung:** große Vorschubgeschwindigkeit und geringer Verschleiß

Zielkonflikt

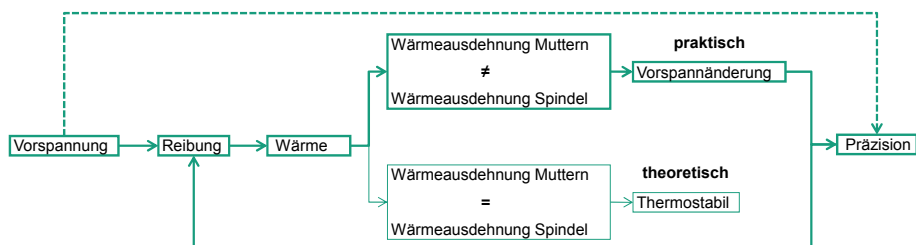
Kompromiss



mittlere Vorspannung → Idealfall im Betrieb konstant

Problemstellung

- **Vorspannungsvariation** aufgrund der **Reibungswärme** in Kugeln und Kugellrillen

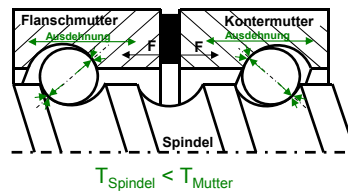
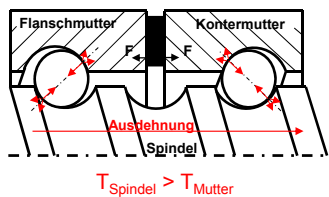


© Fraunhofer IWU
16



2. Motivation Problemstellung

- Fall 1: $T_{\text{Spindel}} = T_{\text{Mutter}}$
 - Vorspannung im Idealfall konstant
- Fall 2: $T_{\text{Spindel}} > T_{\text{Mutter}}$
 - Spindel dehnt sich stärker als Muttern
 - Vorspannung sinkt!
- Fall 3: $T_{\text{Spindel}} < T_{\text{Mutter}}$
 - Muttern dehnen sich stärker als Spindel
 - Vorspannung steigt!



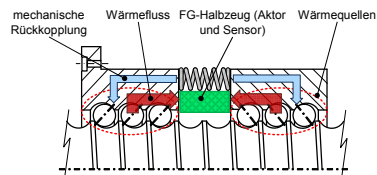
© Fraunhofer IWI
17



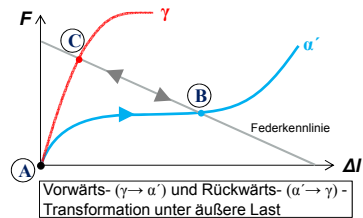
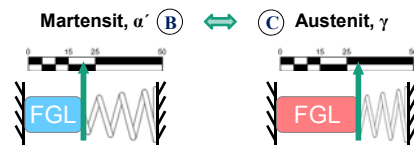
3. Auslegung und Konstruktion Lösungsansatz

- Integration von Formgedächtnislegierungen zur Kompensierung der Wärmeausdehnung
- Systemanforderungen:

1 hohe Steifigkeit	Große Querschnitte
2 hohe Blockierkräfte & kleine Hübe	FG-Zylinder oder -Bleche
3 einachsige Belastung	Push- oder Pull-Aktor
4 ohne äußere Energie	autarkes selbstregelndes System
5 Kommerziell verfügbare FGL	Geometrie als Halbzeug



- Extrinsischer Zwei-Weg-Effekt (ZWE): $A \rightarrow B \leftrightarrow C$
 ↳ FG-Halbzeug interagiert mit Federkraft

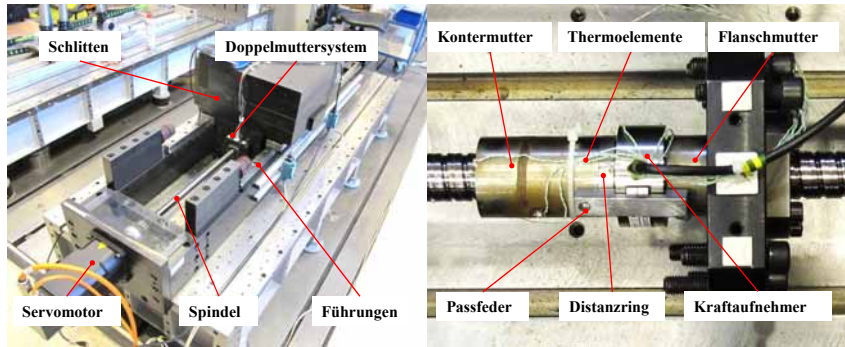


© Fraunhofer IWI
18



3. Auslegung und Konstruktion Charakterisierung des KGT Prüfstands

- symmetrisch in **O-Anordnung** bei vorgespannter Flansch-Doppelmutter
- Lagerung: **fest-los-Lagerung**
- Umsetzung: angetriebene Spindel
- Steifigkeitsberechnung laut DIN 69051-6



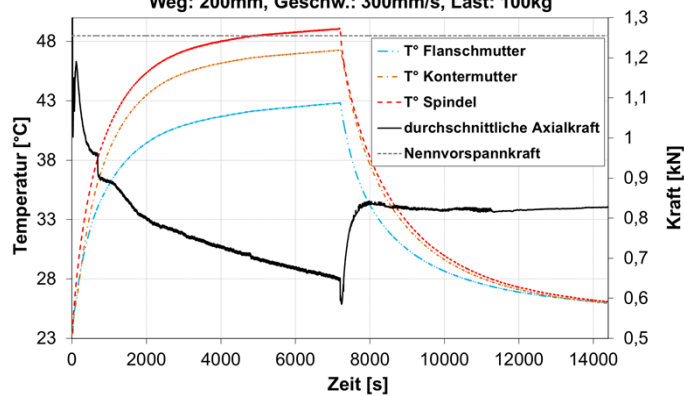
© Fraunhofer IWI
19



Fraunhofer
IWI

3. Auslegung und Konstruktion Charakterisierung des KGT Prüfstands

Temperatur-Kraft-Vergleich Doppelmutter 20110725
Weg: 200mm, Geschw.: 300mm/s, Last: 100kg



reversierender
Betrieb



$T_{\text{Mutter}} < T_{\text{Spindel}}$
 Δt_{th} steigt Vorspannung sinkt



Thermoinstabiler
KGT

© Fraunhofer IWI
20

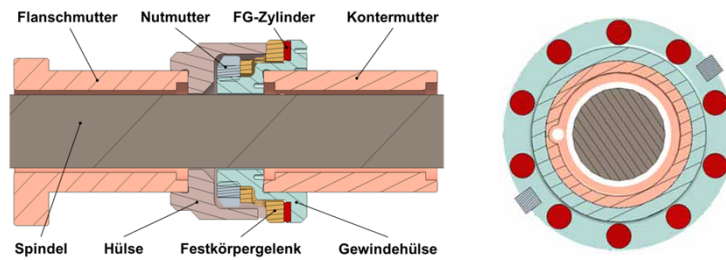


Fraunhofer
IWI

3. Auslegung und Konstruktion

Entwurf

- Druckbeanspruchung (Push-Aktor) → Platzierung zwischen den Muttern
- ringförmige Anordnung der FG-Zylinder → Vermeidung von Verkipfung
- thermisch günstige Lage der FG-Zylinder → effizienter Wärmeeintrag



© Fraunhofer IWI
21

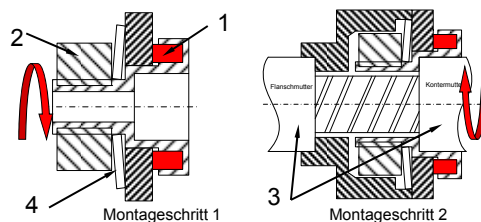


Fraunhofer
IWU

3. Auslegung und Konstruktion

Funktionsprinzip

- mechanische **Vorlast** auf Aktoren (1) über Vorspannmutter (2)
- Montage des KGT durch **Kontern** der Muttern (3)
- Aktoren stützen an Muttern (3) ab → **thermische Kopplung**
- Verformung des Federelements/FKG (4) → **Energiespeicher** beim **Erwärmen**
- FKG (4) drückt Aktoren (1) beim **Abkühlen** in **Ausgangszustand** zurück



© Fraunhofer IWI
22

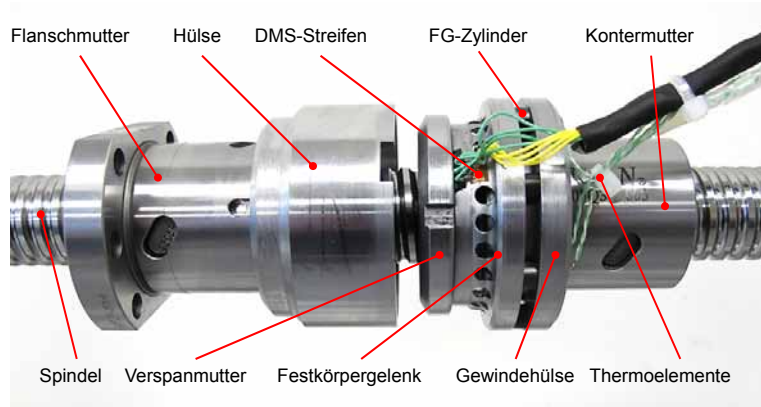


Fraunhofer
IWU

3. Auslegung und Konstruktion

1. Prototyp

- Thermostabiler Kugelgewindetrieb



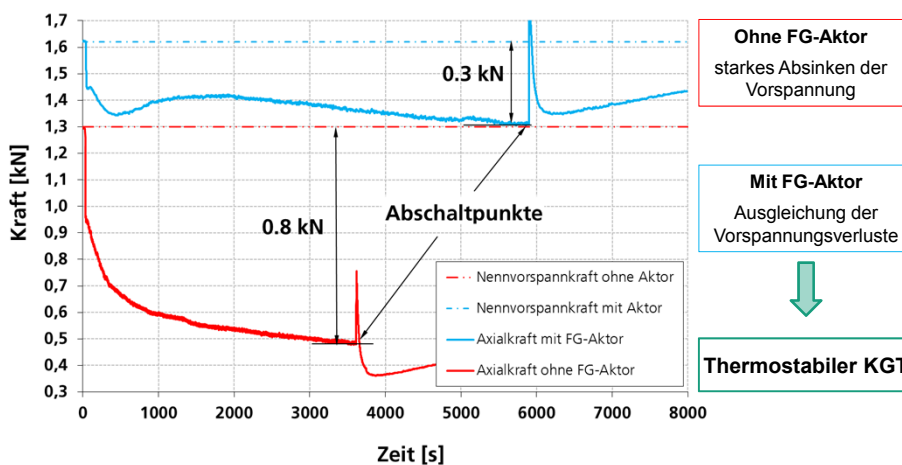
© Fraunhofer IWI
23



4. Experimenteller Funktionsnachweis

Untersuchungen am KGT

- Weg 400 mm, V_{max} 900 mm/s, Last 100 kg



© Fraunhofer IWI
24



5. Zusammenfassung

■ Ausgangssituation:

- Haupteinsatzgebiet von KGT in WZM zur genauen Positionierung des Werkstück- bzw. Werkzeugträgers
- Positioniergenauigkeit hängt hauptsächlich vom Axialspiel zwischen Kugel und Laufbahnen ab
- Vorspannen des Doppelmuttersystems reduziert das Umkehrspiel

■ Problem:

- Vorspannung ändert sich aufgrund der Reibungswärme → **thermoinstabiler KGT**

■ Lösung:

- Integration FG-Aktor zwischen Muttern zur Kompensation der Wärmeausdehnung

■ Ergebnis:

- **Thermostabiler KGT** verbessert den Vorspannungsverlust um 70%

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Kenny Pagel

Fraunhofer Institut Werkzeugmaschinen
und Umformtechnik

Tel: 0351 – 4772 2343

E-Mail: kenny.pagel@iwu.fraunhofer.de

Dieses Projekt wird gefördert von der Europäischen Union aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) sowie aus Landesmitteln des Freistaats Sachsen.



Defördert aus Mitteln
der Europäischen Union

STAATSMINISTERIUM
FÜR WISSENSCHAFT
UND KUNST



Europa fördert Sachsen.
Europäischer Fonds für
regionale Entwicklung

