

Fraunhofer IWU

Abteilung Formgedächtnistechnik

Dr. Kenny Pagel

Formgedächtnislegierungen

Grundlagen

Mechanismus:

Mechanisch/ thermisch induzierte Phasenumwandlung

Effekte:

- Pseudoelastizität: „elastisches“ Verhalten bis 8 % Dehnung
- **Pseudoplastizität:** aktorisch nutzbares Spannungs-Dehnungs-Verhalten
- **Interner Sensoreffekt:** Widerstandscharakteristik der Phasenumwandlung

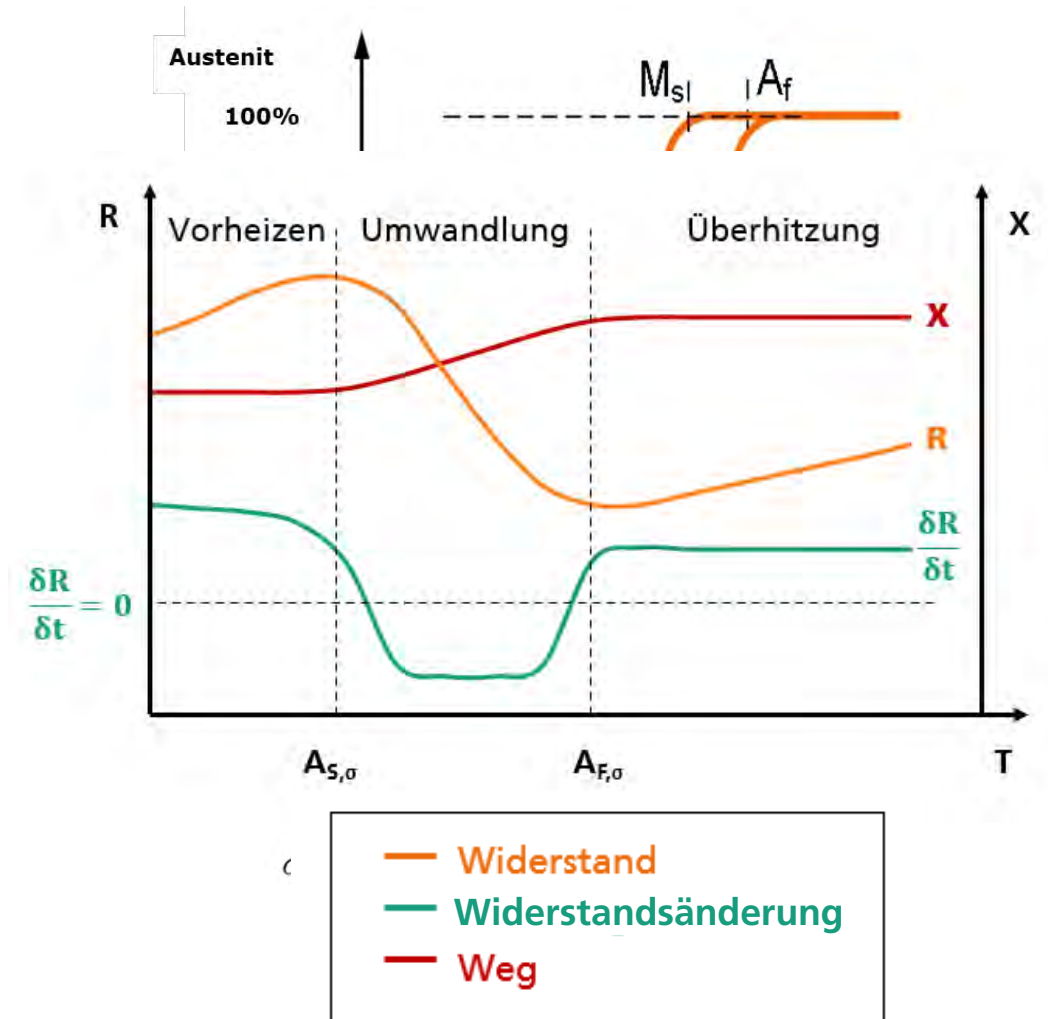
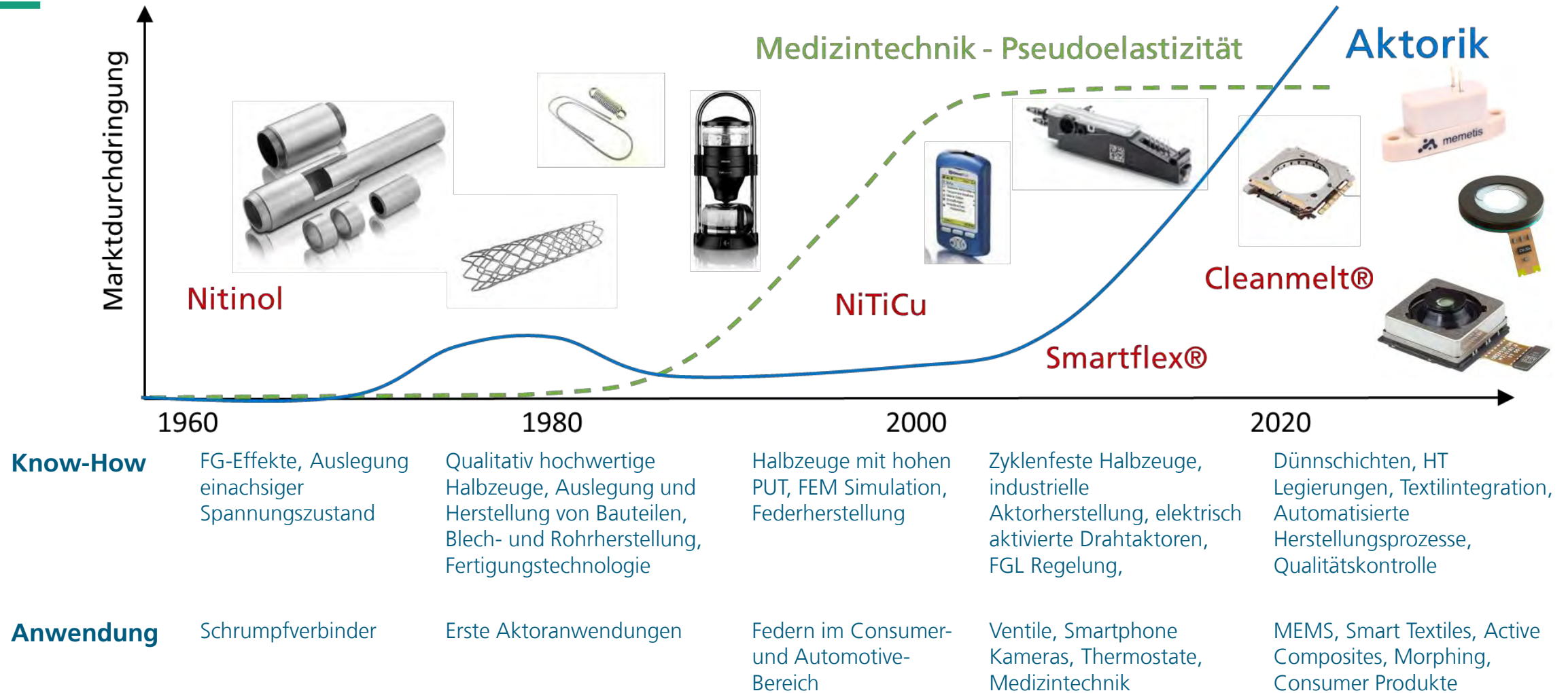


Abbildung 1.10: Widerstandscharakteristik thermische und mechanische Hysterese

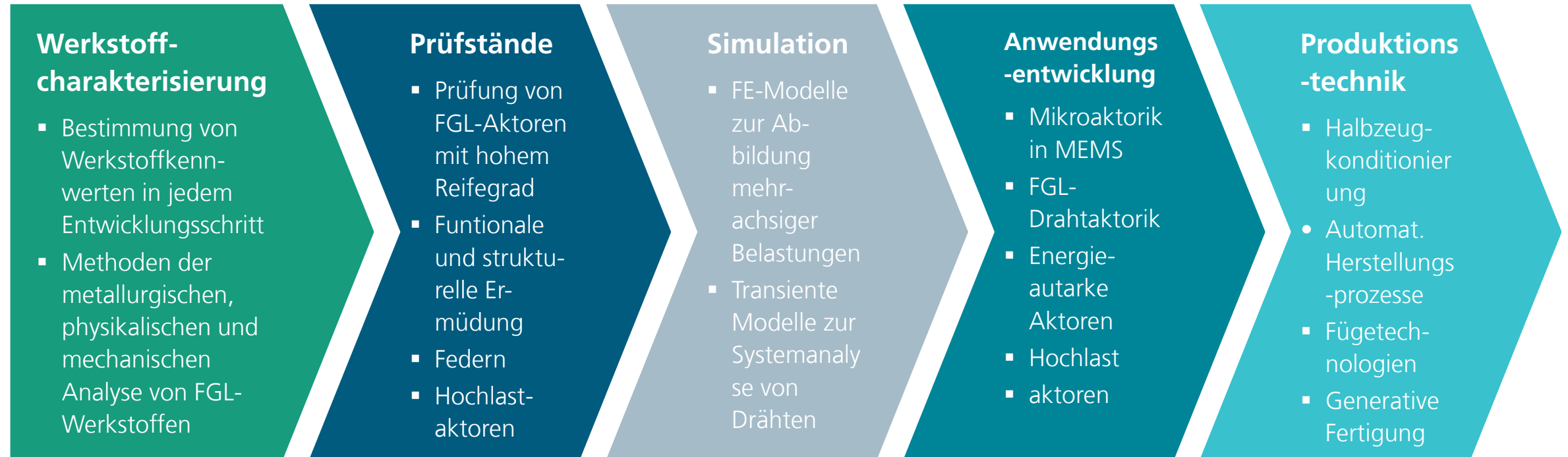
Formgedächtnislegierungen

Status Quo



Abteilung Formgedächtnistechnik

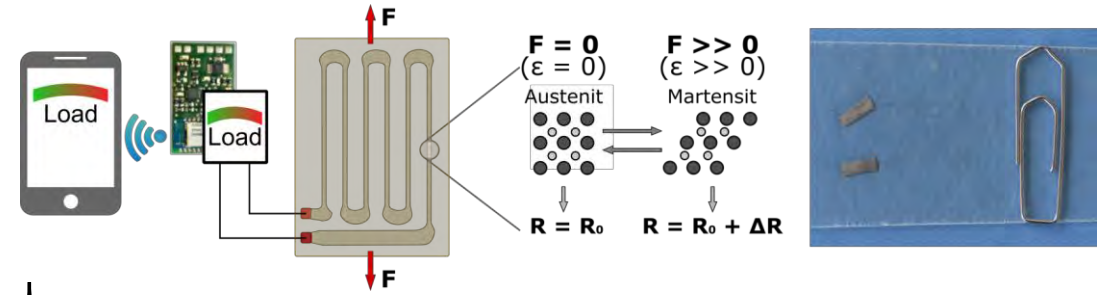
Die gesamte Wertschöpfungskette im Blick



Abteilung Formgedächtnistechnik

Bandbreite von Aktoranwendungen

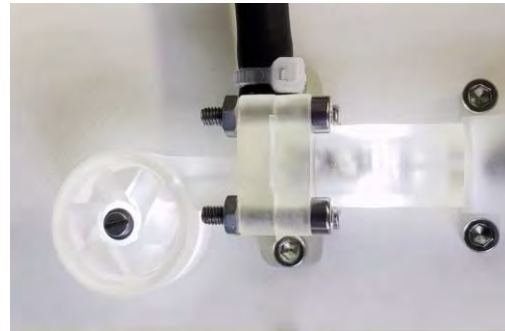
FGL-Sensorik



MEMS und FGL-Mikroaktorik



FGL-Kleinaktorik



FGL-Hochlastaktorik



Werkstoffcharakterisierung

Bestimmung von Werkstoffkennwerten in jedem Entwicklungsschritt

Leistungsangebot

Metallurgische Analysemethoden:

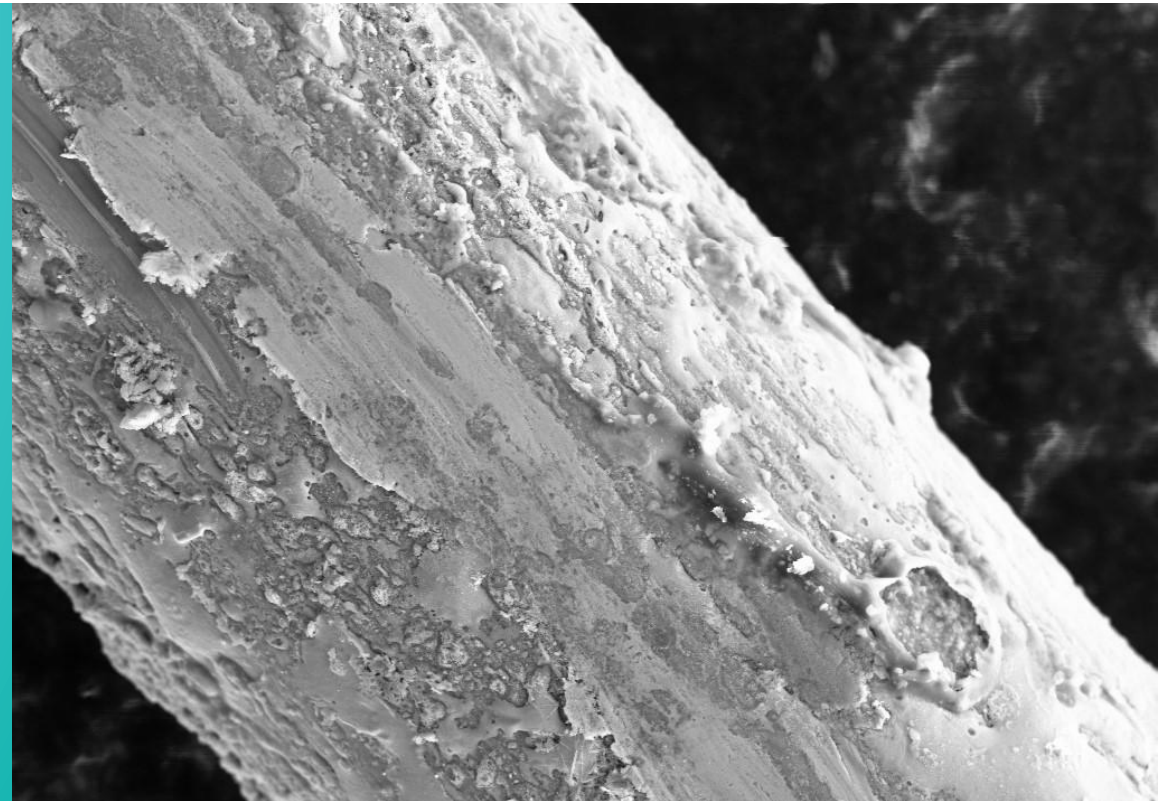
- REM – Rasterelektronenmikroskop
- XRD – Röntgendiffraktometer

Physikalische Analysemethoden:

- DSC - Differential Scanning Calorimetry
- DIL - Quenching and Forming Dilatometer
- Magnetische Eigenschaftsbestimmung mittels Permagraph

Mechanische Analysemethoden:

- Zug-Druck-Prüfmaschine ZwickRoell
- Abschreck- und Umformdilatometer DIL 805



Prüfstände

Prüfung von FGL-Aktoren und Sensoren mit hohem Reifegrad

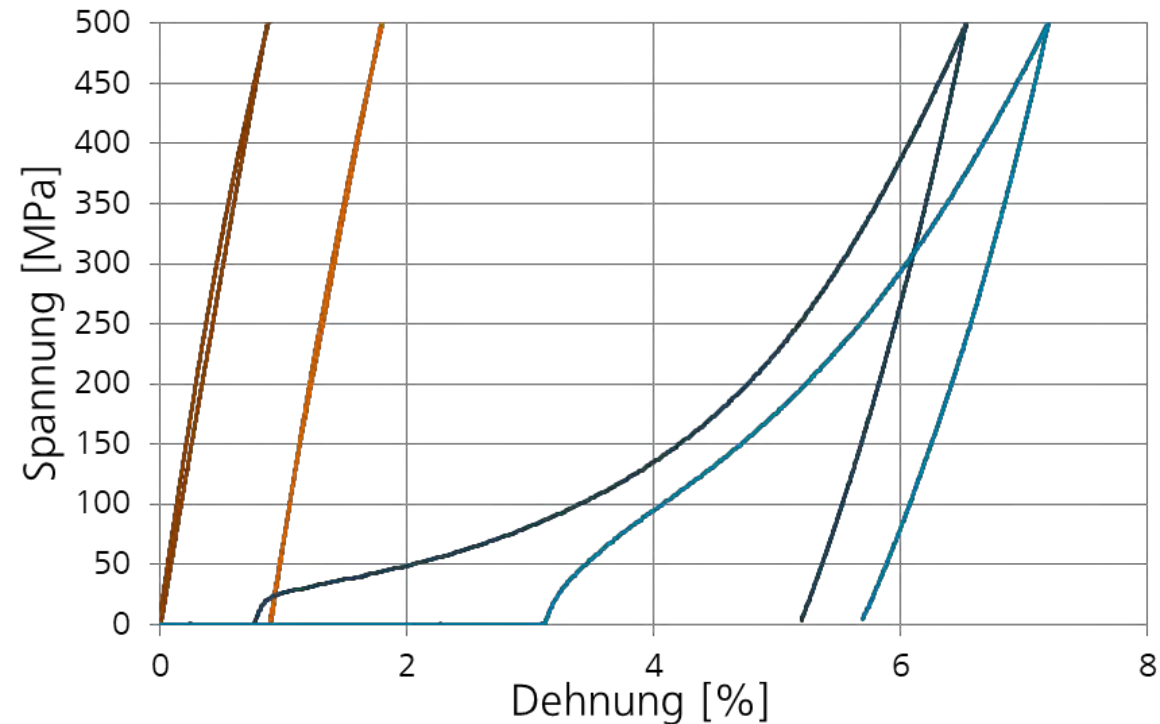
Leistungsangebot

- Messtechnische Untersuchung von FGL-Mikrosystemen
- Drahtprüfstände für Qualitäts-, Zuverlässigkeits- sowie Lebensdauertests
- Prüfung von FGL-Feder-Komponenten
- Untersuchung von FGL-Hochlastaktoren im kN Bereich
- Entwicklung kundenspezifischer Prüfstände



Prüfstände

Prüfstand Funktionale Ermüdung



Leistungsfähigkeit und Messgenauigkeit :

- bis zu 3 Aktordrähte individuell zyklisierbar (bis 200 mm Länge)
- Messung der zyklischen Veränderung von Hub, Widerstand

Variable Lastsimulation :

- Konstantlast durch Gewichte in individuellen Stufen
- Einstellung des Stellwegs auf 0,125 mm genau
- Durchführung von Kurz- und Langzeitversuchen

Flexible Ansteuerung:

- Stromregelung
- PWM mit Konstantspannung

Prüfstände

Prüfstand Strukturelle Ermüdung



Lebensdaueranalysen:

- Untersuchung des Ermüdungsverhalten von Aktordrähten bis zum Versagen
- Ermittlung der maximalen Zyklenzahl in Abhängigkeit parametrierbarer elektrischer und mechanischer Lastszenarien

Leistungsfähigkeit und Messgenauigkeit :

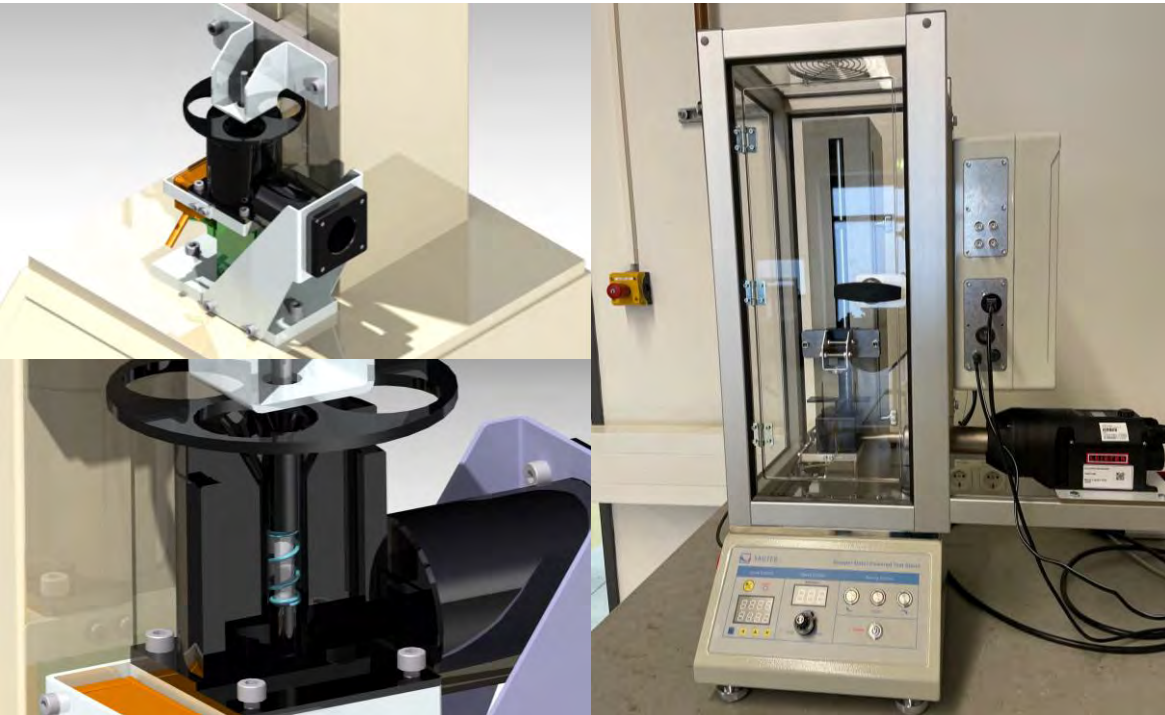
- Laser-Wegsensoren zum Erfassen der Stellwege
- Messbereich: 10 mm, Messauflösung: 1 μm
- Stromgeregelte PWM-Module zum Einstellen von Lastströmen bis 2 A

Flexible Ansteuerung:

- 12 unabhängige Spuren
- GUI zur Parametrierung, Visualisierung und Speicherung

Prüfstände

FGL-Feder-Prüfstand



Leistungsfähigkeit und Messgenauigkeit :

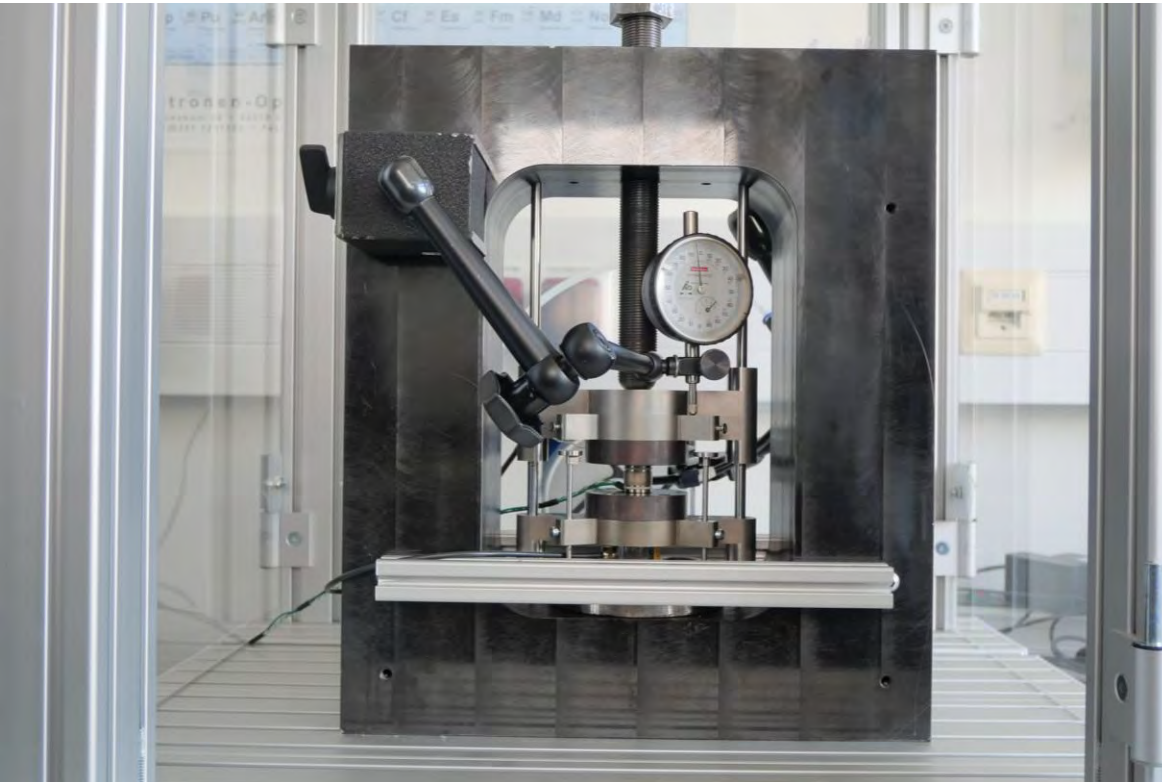
- Aktorlänge von 100 mm, Durchmesser 2 - 40 mm
- maximalen Hub 50 mm, max. Kraft 500 N,
- Temperierung 20 – 150°C
- Vollständig automatisierte Messung und Datenaufnahme

Betriebsarten/Messmethoden:

- Freier Hub, Erfassung einer Wegkennlinie ohne Belastung,
- Blockierkraft für definierte Positionen,
- Spannungs-Dehnungs-Kennlinie mittels definierter Belastung,
- Spannungs-Dehnungs-Kennlinie im zyklischen Test,
- Kraft und Hub mit gesteuerten Temperaturkennlinien

Prüfstände

FGL-Hochlastprüfstand



Leistungsfähigkeit und Messgenauigkeit :

- Erfassung von Aktorkräften bis 20 kN
- Messung von Hüben im Mikrometerbereich bis 1 mm

Betriebsarten/Messmethoden :

- Umsetzung verschiedener Lastszenarien (Kraftfrei, Konstantlast, Blockfahrt, Spannungs-Dehnungs-Kennlinien)
- Untersuchung von Verschleiß- und Degradationsverhalten
- Dauerlastuntersuchungen

Flexible Ansteuerung:

- Stromversorgung für Heizspule der Aktorik
- Indirekte Temperierung durch Auflageflächen
- Fluid-Temperierung für dynamische Untersuchungen

Simulation

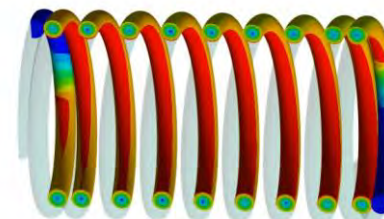
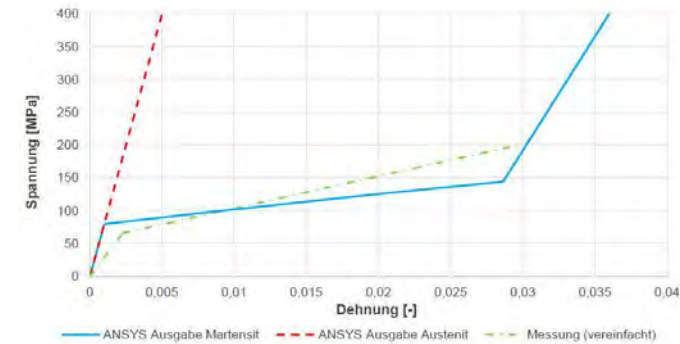
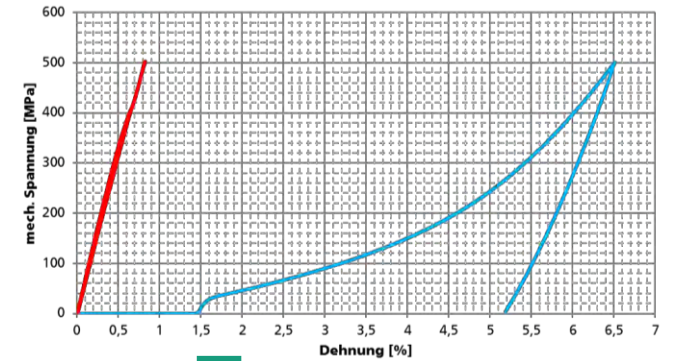
Werkzeuge zur Auslegung von FGL-Aktoren

FE-Modelle:

- zur Berechnung mehrachsig belasteter Aktoren (Federn, Biegewandler, Bulk Aktoren)
- Grundlage bildet gemessenes Spannung-Dehnungs-Diagramm und Spannungsabhängigkeit der PUT
- Abbildung der Zusammenhänge im Modell mit 7 Parametern

Transientes Modell:

- für einachsig belastete Aktoren geeignet
- Grundlage bildet Bilanzierung der Energieanteile bei der Phasenumwandlung
- Parameter aus Spannungs-Dehnungs-Diagramm abgeleitet
- Anwendung bei der Entwicklung von Regelungskonzepten



Simulation

Referenzprojekt: Kennwertbasierte Auslegungssystematik von Formgedächtnisfedern



Motivation und Zielstellung:

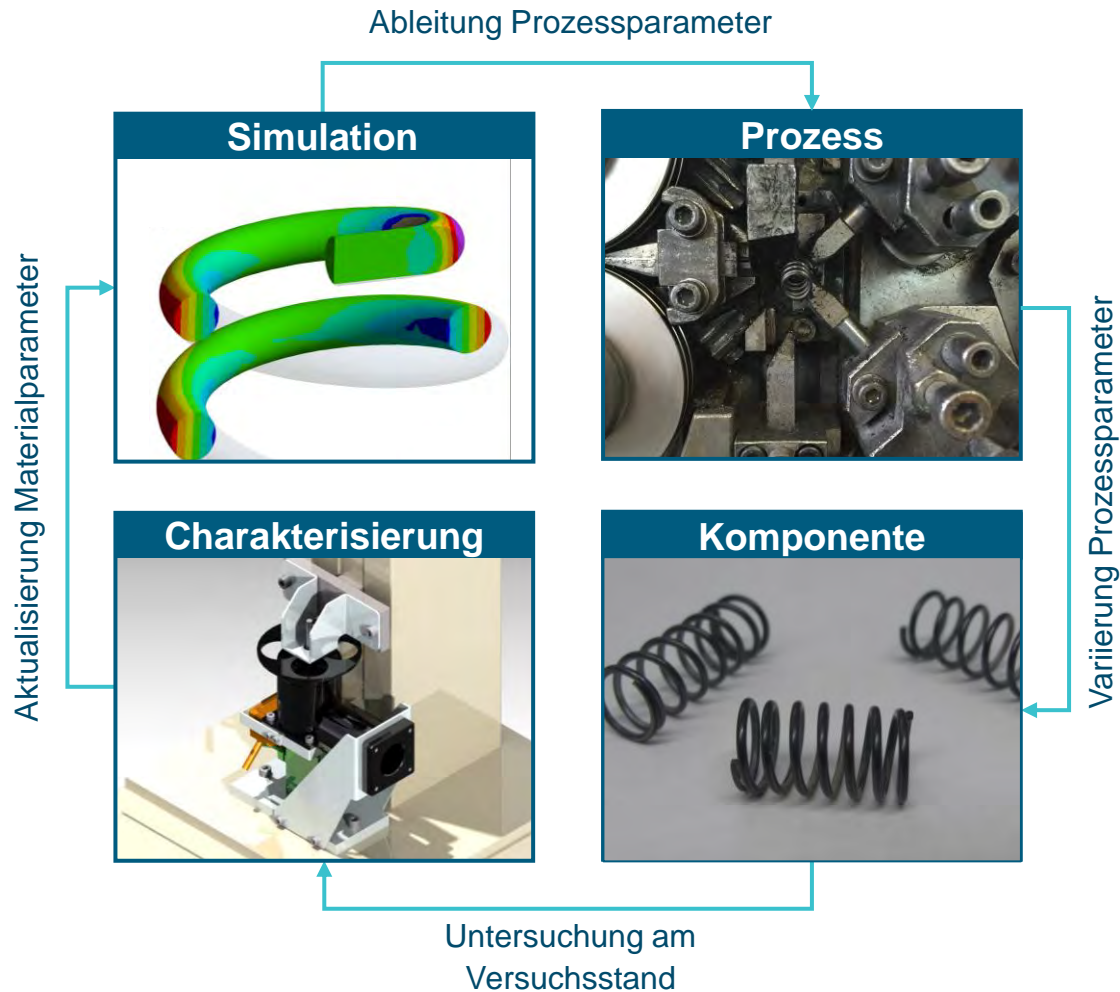
- Auslegung von FGL-Federn ist langwieriger, iterativer Prozess
- Berechnung mittels FEM aufwändig
- Entwicklung einer industrietauglichen Auslegungssystematik
- Weiterentwicklung von standardisierten Verfahren zur FGL-Kennwertermittlung

Ergebnisse:

- Identifikation der mathematischen Wirkzusammenhänge zwischen Kennwerten, Geometrie und Kraft-Weg-Verlauf mithilfe der DoE
- Integration der Gleichungen in ein anwenderfreundliches Auslegungswerkzeug

Simulation

Referenzprojekt: Prozessentwicklung zur effizienten Fertigung von FGL-Federn



Motivation:

- Fertigung von FG-Federn aufwändig, da nach dem Winden Werkzeuge zur Wärmebehandlung erforderlich
- Hohe Kosten, geringe Flexibilität

Zielstellung:

- Werkzeugloses Fertigungskonzept
- Vorhersage bleibender Verformungen Mittels FE-Modellen
- Gezieltes Einstellen des Umformgrads zur Erreichung Zielgeometrie
- Verkürzte Prozesskette

Anwendungsentwicklung

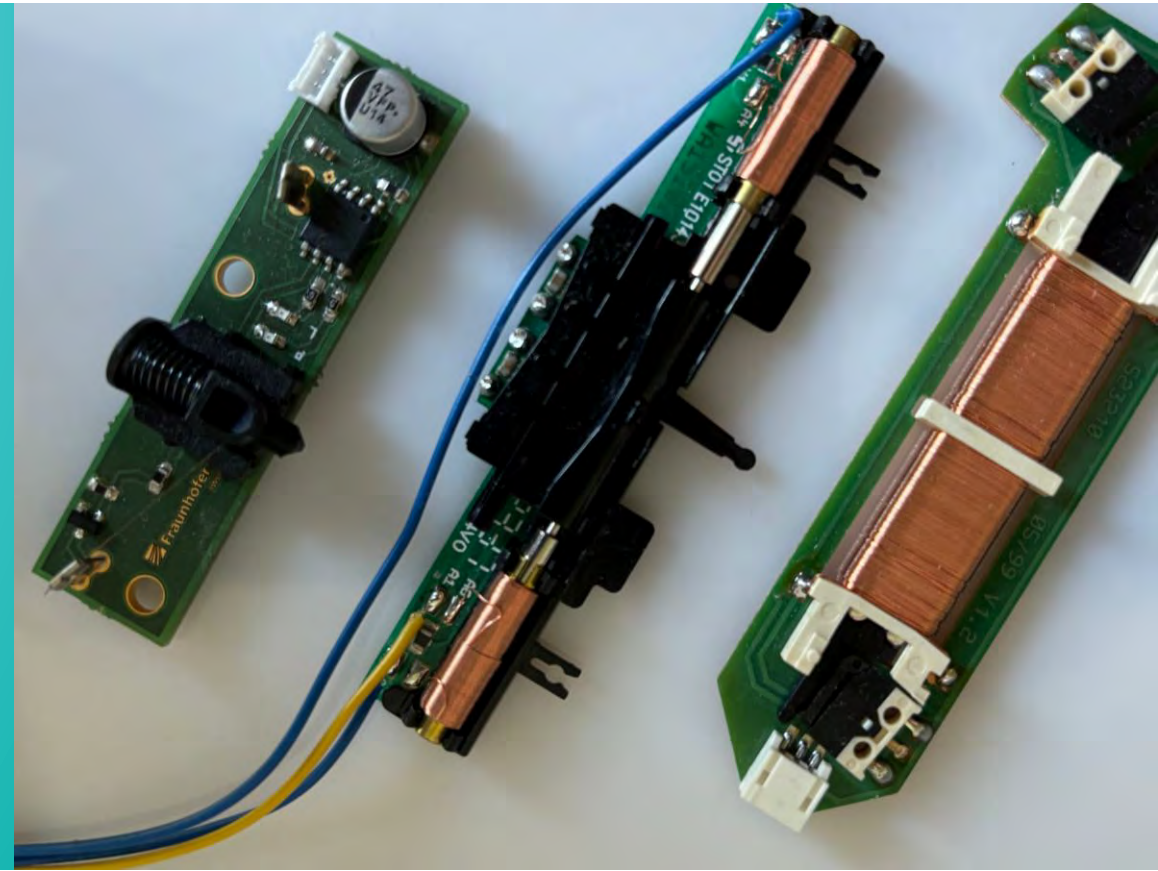
Die gesamte Wertschöpfungskette im Blick

Berücksichtigung aller produktspezifischen Aspekte:

- definierte Vorgaben aus Lastenheften
- werkstofftechnischen Faktoren: funktionale und strukturelle Ermüdung, Phasenumwandlungstemperaturen
- Konstruktive Aspekte: Toleranzketten, angestrebte Produktionsmengen, Fertigungsverfahren
- Steuerung und Regelung

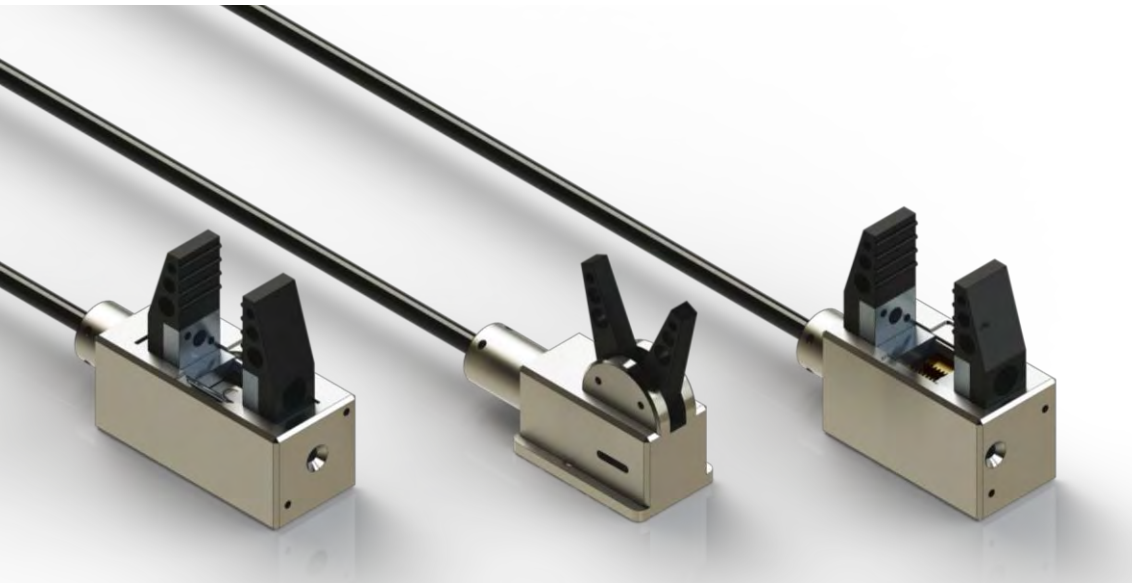
Anwendungsbeispiele:

- MEMS- und Mikroaktork
- Drahtaktork für Ventilanwendungen, Drohnen, Greifer, Manipulatoren und Entriegelungssysteme
- Energieautarke Aktork für thermische Kreisläufe und elektrische Verbindungen
- Hochlastaktork – kompakte Aktoren für den Maschinenbau



Anwendungsentwicklung

Referenzprojekt: Kraftsensitive Greifer auf Basis von FGL



Einsatzbereich:

- Parallel-/Zangengreifer zur Entnahme von Formteilen/Anguss
- Mikrogreifer, Medizintechnik

Vorteile:

- Leichtbau durch Funktionsintegration – Verzicht auf Sensorik
- Druckluftfreie Funktionsweise aber flexibler Bauraum
- Elektromagnetische Verträglichkeit und Biokompatibilität
- Skalierbarer Ansatz für vielfältige Anwendungsszenarien

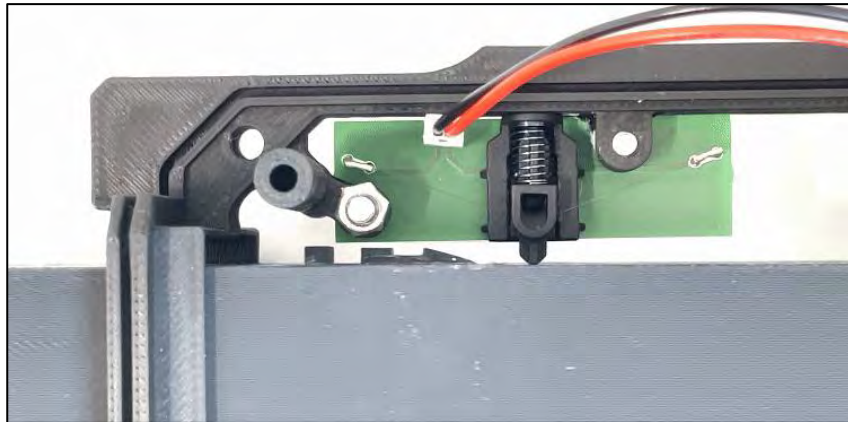


Technische Daten

	Parallelgreifer	Zangengreifer
Greifkraft:	5 N	10 N
Hub / Öffnungswinkel:	10 mm	50°
Lebensdauer:	1 Mio. Greifvorgänge	
Schließzeit:	1 s	

Anwendungsentwicklung

Referenzprojekt: Kompakte Leichtbuantriebe für Quadrocopter



Akkuschlittenverriegelung im Quadrocopter Grabbit G7

- Leichtbau dank 76-mikrometer dünnem Aktordraht
- Einfache Integration in kompakten Bauräumen
- Elektromagnetische Unbedenklichkeit
- Einfache Skalierbarkeit für breite Anwendung

Technische Daten

Hub:	> 2	mm
Aktivierungsgeschwindigkeit:	0,1	s
Bauraum:	56 x 14 x 10	mm ³
Betriebstemperaturen:	-20 – 65	°C
Gewicht:	4	g
Lebensdauer:	> 10.000	Zyklen/ Bewegungen

Anwendungsentwicklung

Referenzprojekt: FGL-Bewässerungsventil



Motivation:

- Bedarfsgerechte Versorgung von Pflanzen mittels passiver Tröpfchen-Bewässerungssysteme etabliert
- Einfluss durch Leitungslängen, Gefälle, Druckschwankungen
- Schaltbare Ventile erforderlich

Lösung:

- Miniaturisiertes, schaltbares Membranventil
- Bistabile Kinematik – Push-Push-Mechanismus
- Umschalten mittels kurzzeitiger Aktivierung eines FGL-Aktors
- Druck bis 2,5 Bar, Aktivierungsleistung 16 W, Schaltzeit 5 s
- Energieversorgung und Ansteuerung über Bussystem mittels Zweidrahtleitung im Schlauch

Anwendungsentwicklung

Referenzprojekt: FGL-Hochlastaktorik



Motivation:

- Maschinenbauanwendungen erfordern kompakte Aktoren mit hoher Steifigkeit, Kräften im kN-Bereich und Hüben bis 1mm

Lösung:

- Hohe Energiedichte von FGL ermöglicht sehr leistungsfähige Aktoren auf geringem Bauraum
- Thermomechanische Optimierung der Aktorgeometrie ermöglicht gute Steuer-/Regelbarkeit
- Anwendungen: Feinpositionierung, Klemmen oder Lösen, Kompensation von Verformungen

Technische Daten

Bauraum:	$h=16\text{ mm}, d=15\text{ mm}, V=2,8\text{cm}^3$
Freier Hub / Arbeitshub:	180/120 μm
Stellkraft:	5 kN
Energieaufnahme	50 Ws
Dynamik:	Bis zu 1 Hz bzw. 180 $\mu\text{m/s}$

Anwendungsentwicklung

Referenzprojekt: FGL-Ladestecker



Motivation:

- Beim Gleichstrom-Schnellladen von BEV führen hohe Kontaktwiderstände zwischen Stecker und Buchse zur Erwärmung
- Installierte Ladeleistung steigt stetig
- Steckersystem als CCS genormt: Änderung Geometrie bzw. Erhöhung Kontaktnormalkraft nicht möglich

Lösung:

- Integration von FGL-Aktoren zur energieautarken Kontaktkrafterhöhung bei Erwärmung
- Reduzierung Übergangswiderstand reduziert Wärmeentwicklung und erhöht Ladeeffizienz

Anwendungsentwicklung

Referenzprojekt: Mikromechanischer Sterilisationszyklenzähler



Motivation:

- Manipulationssicheres Zählen von durchlaufenen Sterilisationszyklen an medizinischen Geräten bisher ungelöst
- Faktor Mensch trotz Dokumentation größte Fehlerquelle
- Gerätehersteller haben keinen Zugang zu Daten

Lösung:

- Mikromechanisches Zählwerk
- Antrieb durch heterogen integrierten FGL-Aktor
- Hermetische und sterilisationsfeste Verkapselung
- Zyklenzahlen bis 10.000 möglich

Anwendungsentwicklung

Referenzprojekt: Räucherrakete



Die FGL-Räucherrakete, ist aus der Kooperation zwischen traditionellem erzgebirgischem Kunsthandwerk (Original Füchtner Holzkunst) und der Hightech-Materialforschung (Fraunhofer IWU) entstanden. Der Clou: Die Wärme eine handelsübliche Räucherkerze reicht aus, um die Formgedächtnisfunktion zu aktivieren. So taucht nach wenigen Minuten wie von Zauberhand der „Reise-Nussknacker Wilhelm“ auf. Dass er ausgerechnet in einer Rakete steckt, ist dabei kein Zufall. Denn gemeinsam mit dem deutschen Astronauten Matthias Maurer war Wilhelm bereits auf der Internationalen Raumstation ISS. Wieder auf der Erde entstand so ein Produkt, das eindrucksvoll zeigt, dass smart materials im Holzkunstwerk angekommen sind.

Produktionstechnik

Grundlagen Wirtschaftliche Fertigungsmethoden als Schlüssel zum erfolgreichen Produkt

Leistungsangebot

- Prozessentwicklung zur Halbzeugkonditionierung und Komponentenherstellung, z.B. von FGL-Federn
- Automatisierte Herstellungsprozesse für FGL-Draht-Aktoren
- Methoden zur Qualitätskontrolle
- Entwicklung von Fügetechnologien für FGL-Komponenten: Crimpen, Schweißen, Löten
- Generative Fertigung von FGL-Elementen
- Textile Fertigungsverfahren für FGL-Drähte
- FGL-Kunststoffintegration mit duro- oder thermoplastischen Verfahren



Produktionstechnik

Referenzprojekt: FGL-Halbzeugkonditionierung



Motivation:

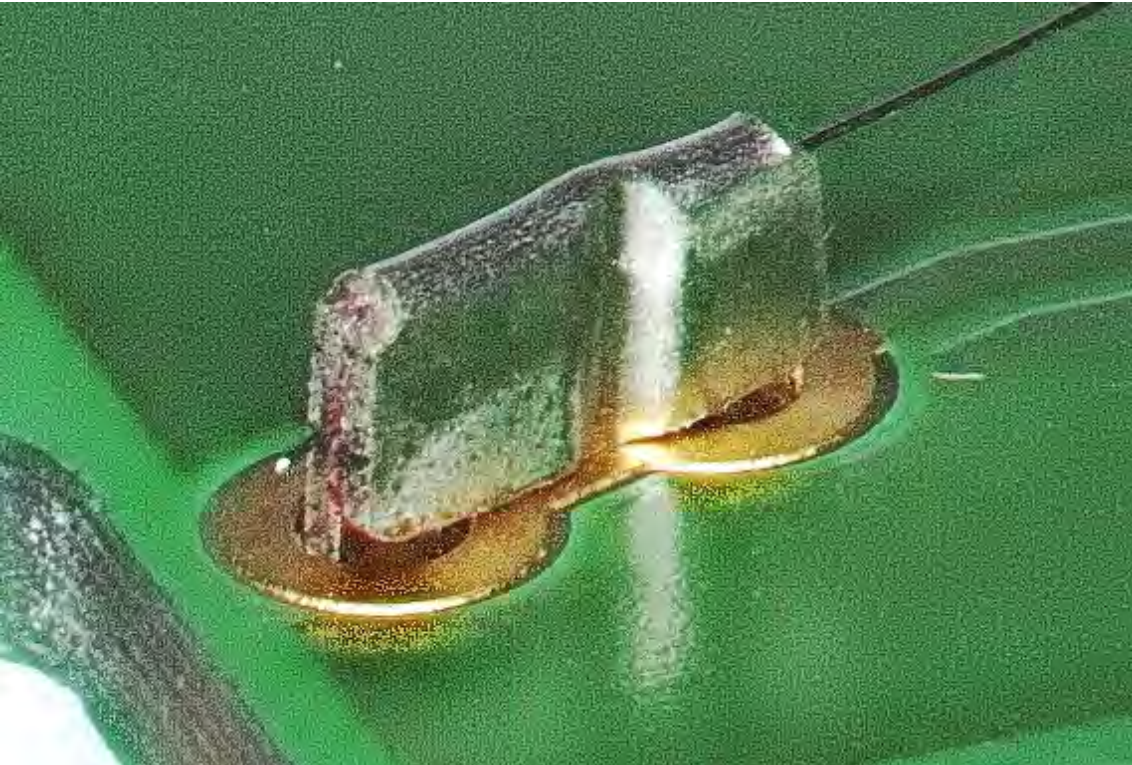
- Ausgeprägtes Einlaufverhalten von FGL-Drähten in den ersten thermischen Lastzyklen
- Muss bei der Auslegung berücksichtigt oder durch zeitaufwändige, thermische Zyklierung kompensiert werden

Lösung:

- Mechanisches Zyklieren in der Hochtemperaturphase – Durchlaufen der mechanischen Hysterese
- Energie- und zeiteffizientere Konditionierung von Drähten und Komponenten wie z.B. Federn möglich

Produktionstechnik

Referenzprojekt: Crimpentwicklung



Motivation:

- Integration von dünnen FGL-Drähten in vollständig automatisierten Produktionsprozessen stellt große Herausforderung dar
- In bekannten industriellen Anwendungen ausschließlich Crimp- oder Spleißverbindungen genutzt

Lösung:

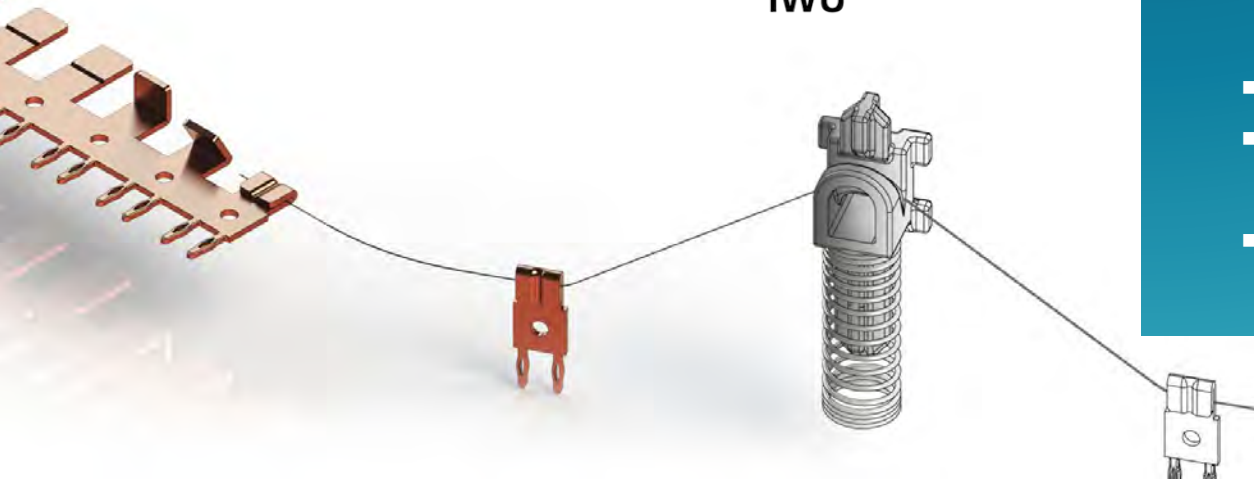
- skalierbares Crimpkonzept, mit breiter industrieller Anwendbarkeit
- Charakterisierung von Crimpverbindungen mittels DoE

Validierte Verbindungen (Testabbruch vor Versagen):

- \varnothing 180 μm @300 MPa: 500.000 Lastwechsel
- \varnothing 150 μm @300 MPa: 800.000 Lastwechsel
- \varnothing 76 μm @300 MPa: 1,7 Mio. Lastwechsel

Produktionstechnik

Referenzprojekt: Optimierung der Serienproduktion von FGL-Draht-Aktoren



Motivation:

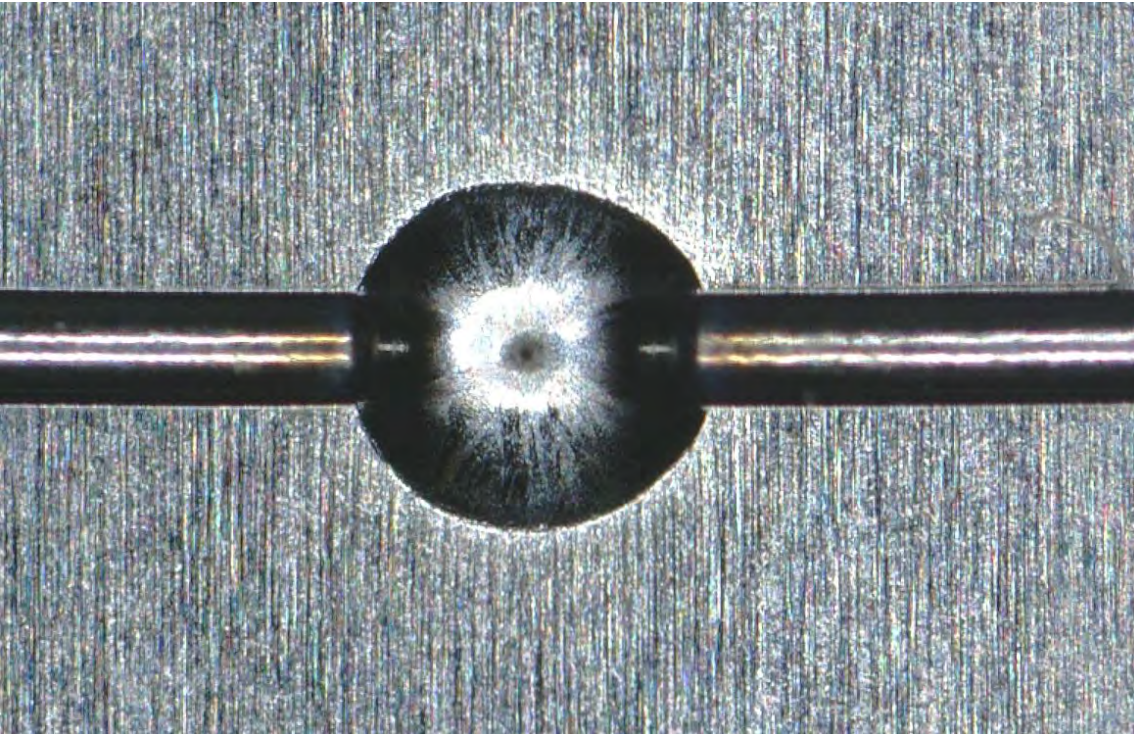
- Automatisierte Fertigung von FGL-Aktorsystemen ist aufgrund der Eigenschaften von FGL besondere Herausforderung
- Ressourcen für die Entwicklung spezieller Fertigungsanlagen oft nicht verfügbar – verhindert Marktdurchdringung

Lösung:

- Bündelung von Expertenwissen zu: FGL, Spezial- und Präzisionswerkzeugen, Handling, Dünndrahtverarbeitung und Automatisierungstechnik
- Analyse von Einzelprozessen und Wechselwirkungen
- Modulare Automatisierungsplattform zur Abbildung beispielhafter Prozessketten
- Maßnahmen zur Automatisierungsgerechten Konstruktion

Produktionstechnik

Referenzprojekt: Thermische Fügeverfahren für FGL



Motivation:

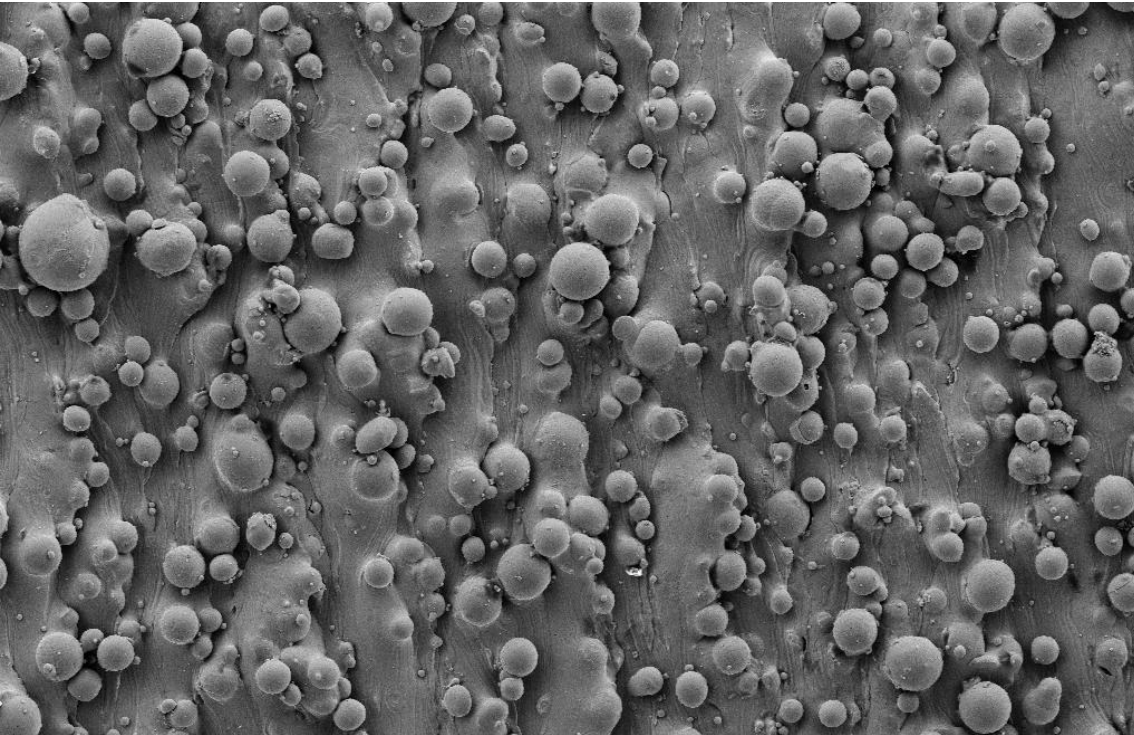
- Fügen von FGL ist nach wie vor eine Herausforderung
- Crimptechnologie für Dünnschichten oder dünne Drähte ungeeignet
- Thermische Fügeverfahren können langfristig Alternative darstellen

Lösung:

- Systematische Untersuchung entlang der gesamten Fügeprozesskette – Plasmapolieren, Beschichten, Laserschweißen, Thermomechanische Nachbehandlung
- wirtschaftliche und serientaugliche Prozesskette

Produktionstechnik

Referenzprojekt: Additive Fertigung von FGL



Motivation:

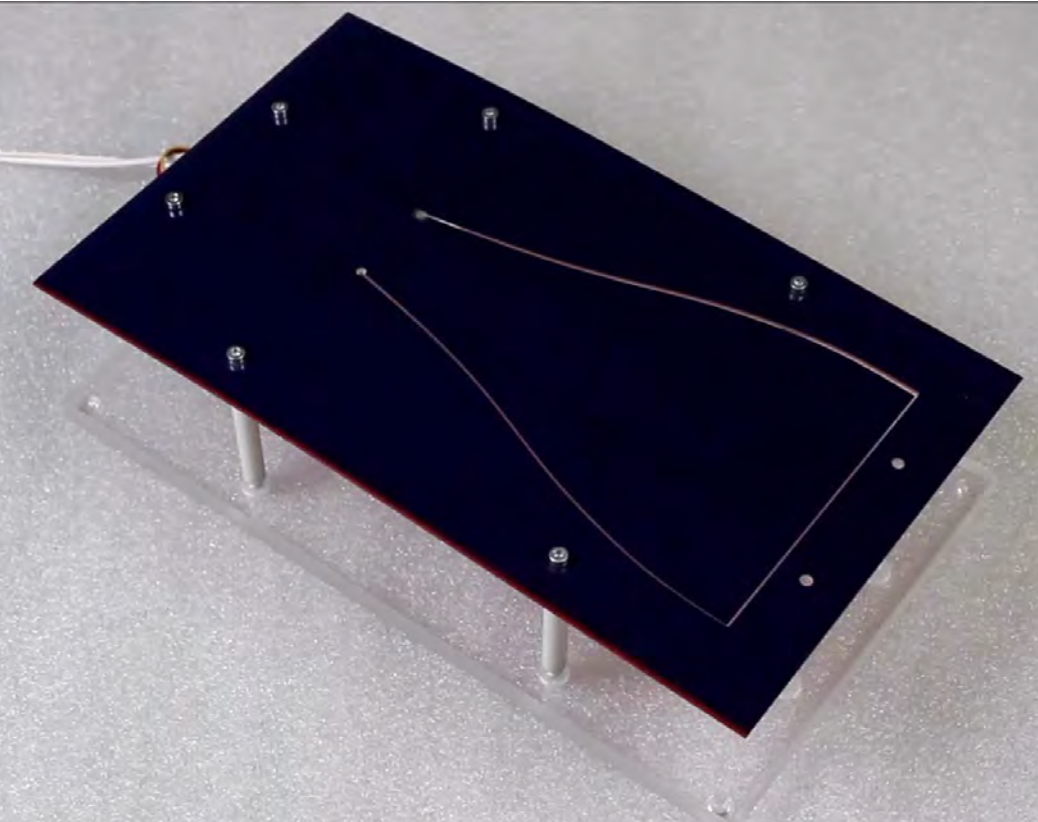
- Verarbeitung von FGL-Halbzeugen ist bis dato sehr aufwändig
- Technologien für den metallischen 3D-Druck geeignet zur wirtschaftlichen Herstellung komplexer FGL-Komponenten
- Additive Fertigung muss immer als Prozesskette gedacht und betrachtet werden – bisher noch unzureichend erforscht

Lösung: Ganzheitlicher Entwicklungsansatz

- Analyse und Betrachtung aller Einzel-Prozessschritte entlang der Wertschöpfungskette
- ganzheitliches Verständnis der Technologie von der Schmelze bis zum Produkt

Produktionstechnik

Referenzprojekt: FGL-Kunststoffintegration



Integration von FGL in Kunststoffkomponenten eröffnet vielfältige Möglichkeiten zur Herstellung aktiver Bauteile

Verarbeitungsprozesse:

- Spritzguss: zur Einbettung von FGL-Elemente direkt in die Kunststoffmatrix, Herstellung komplexe Aktorsysteme in nur einem Prozessschritt
- Extrusions- oder Pultrusionsprozesse: zur Herstellung von Profilen mit integrierten FGL-Drähten oder –Folien
- Thermoforming-Prozesse: zur gezielten Formgebung von FGL-Halbzeugen und Anpassung an bestehende Designs
- Laminierprozesse: zur schichtweisen Einbindung von FGL auch im Verbund mit textilen Halbzeugen

Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit



Fraunhofer-Institut für Werkzeug-
maschinen und Umformtechnik IWU

Kontakt

Dr. Kenny Pagel
Abteilungsleiter Formgedächtnistechnik
Tel. +49 351 4772-2343
Efax +49 351 4772-32343
Kenny.Pagel@iwu.fraunhofer.de

Fraunhofer IWU
Nöthnitzer Straße 44
01187 Dresden
www.iwu.fraunhofer.de



Fraunhofer-Institut für Werkzeug-
maschinen und Umformtechnik IWU