Fraunhofer
IWU

Fraunhofer-Institut für Werkzeug-
maschinen und Umformtechnik IWU

Keynote Formgedächtnislegierungen

05.11.2025

Dr. Kenny Pagel, Fraunhofer IWU

Formgedächtnislegierungen

Agenda

- Grundlagen
- Werkstoffe und Herstellungsprozesse
- Werkstoffcharakterisierung
- Simulation, Auslegung und Systemdesign
- Steuerung/Regelung
- Produktionstechnik
- Anwendungen und Trends

 © Fraunhofer IWU

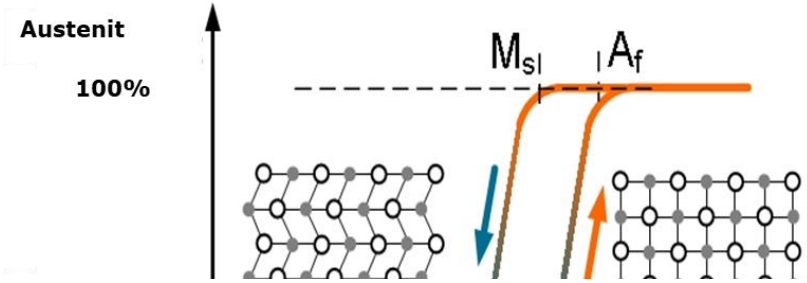
Fraunhofer IWU

Grundlagen

Mechanismus:
Mechanisch/ thermisch induzierte Phasenumwandlung

Effekte:

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



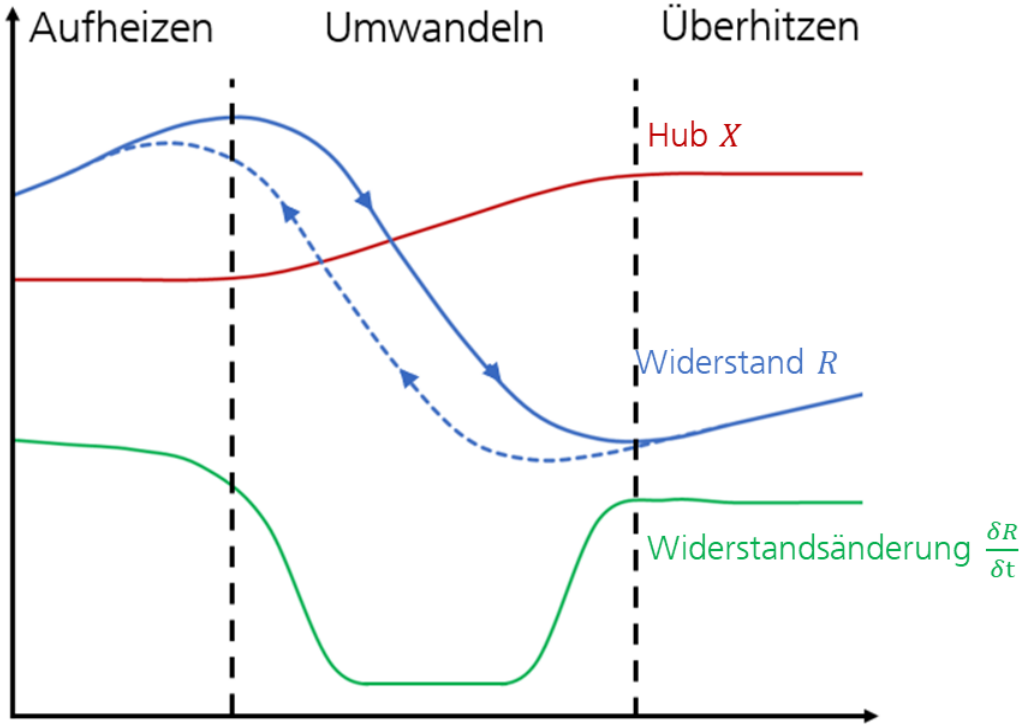


Abbildung FGL-Widerstandscharakteristik
Abbildung thermische und mechanische Hysterese

 © Fraunhofer IWU

Fraunhofer IWU

Grundlagen

Besondere Eigenschaften von FGL

Spannungsabhängigkeit der PUT:

- Linearer Zusammenhang zwischen mechanischer Spannung und PUT
- Anstieg von 10-20 K/100 Mpa für Mart. PUT kleiner als für Aust. PUT

Funktionale Ermüdung:

- plastische Verformung (Drahtlänge) und Abnahme der Effektgröße (Hub)
- Direkt abhängig von Spannung und Dehnung
- Kann durch thermomechanische Behandlung reduziert werden

Strukturelle Ermüdung:

- Abhängig von Verunreinigungen und mech. und therm. Belastung

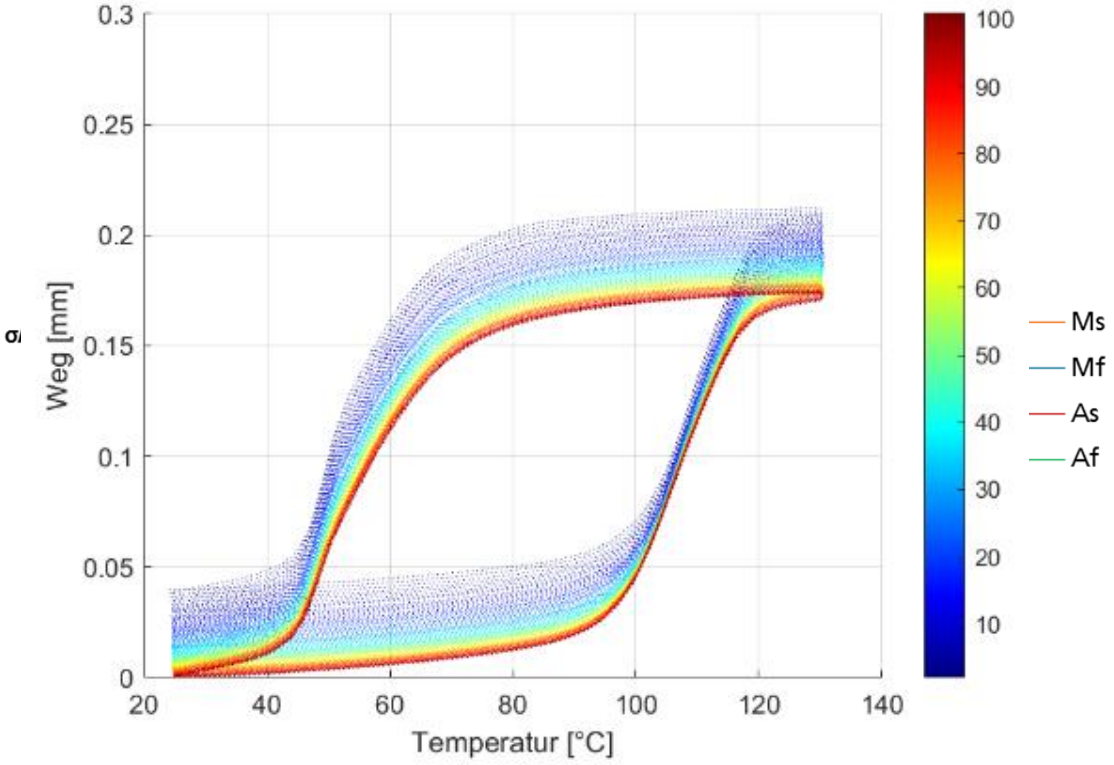


Abbildung: Einlaufverhalten eines FGL-Hochlastaktors

 © Fraunhofer IWU

Fraunhofer IWU

Werkstoffe

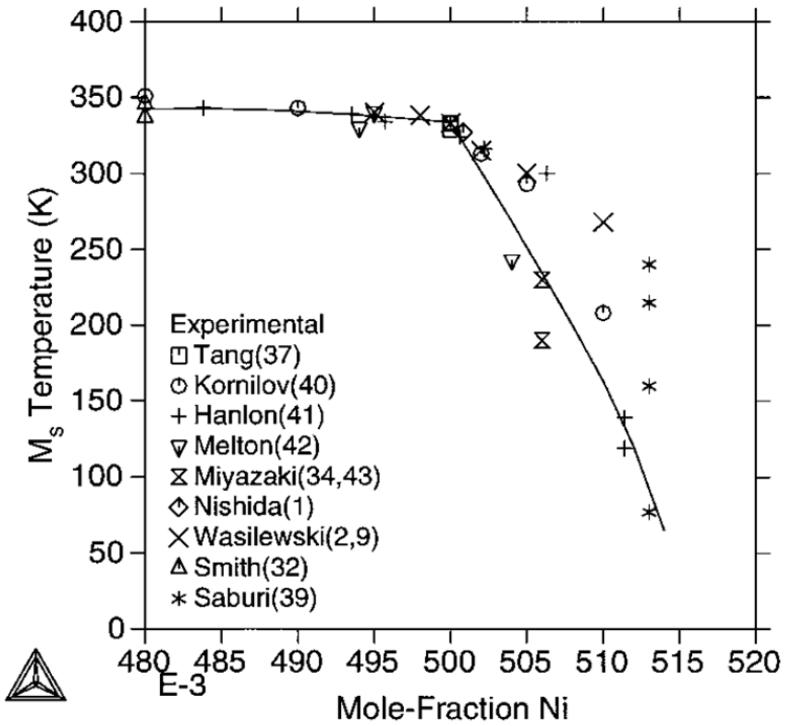


Abbildung: Abhängigkeit der PUT von der Legierungszusammensetzung [Tang et. al.: New modelling of the B2 phase and its associated martensitic transformation in the Ti–Ni system. In: Acta Materialia 47 (1999), Nr. 12, S. 3457–3468. – ISSN 13596454]

Legierungsbestandteile

- Ni und Ti Gehalt bestimmen die Phasenumwandlungstemperaturen (PUT) grundsätzlich
- Cu verringert die Hysterese (ab ca. 6% Atomanteil)
- Co und Cr verschieben die PUT nach unten (bis ca. 1% Atomanteil)
- Nb erweitert die thermische Hysterese (bis ca. 10% Atomanteil)
- Pd und Hf führen zu Anstieg der Mf Temperatur (zwischen 15% und 29% Atomanteil)

 © Fraunhofer IWU

Fraunhofer IWU

Werkstoffe

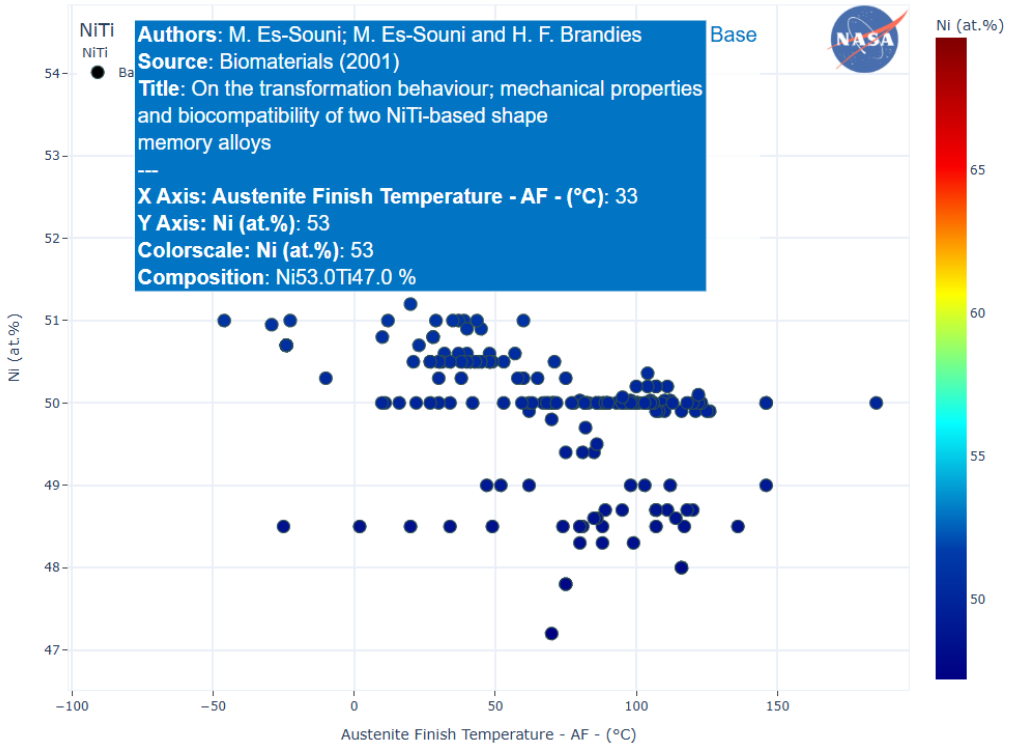


Abbildung: Austenit-Finish-temperatur in Abhängigkeit des Ti Gehalts von NiTi Legierungszusammensetzung [https://shapememory.grc.nasa.gov/]

NASA Smart Material Database

- Umfassende Datenplattform bisheriger internationaler Forschungsergebnisse zu FGL bzgl.:
  - Chemische Zusammensetzung
  - Mechanische Eigenschaften
  - Thermische Eigenschaften
  - Herstellungs- und Verarbeitungsverfahren
- Daten können webbasiert visualisiert und mittels KI analysiert werden
- Bildet die Grundlage zur beschleunigten Entdeckung neuer Legierungen

 © Fraunhofer IWU

Fraunhofer IWU

Herstellungsprozesse

Prozesskette zur Herstellung von FGL- Halbzeugen und Komponenten

Abbildung: Herstellungsprozesskette für FGL-Komponenten [VDI 2248]

 © Fraunhofer IWU

Fraunhofer IWU

Herstellungsprozesse

Einfluss der thermomechanischen Behandlung

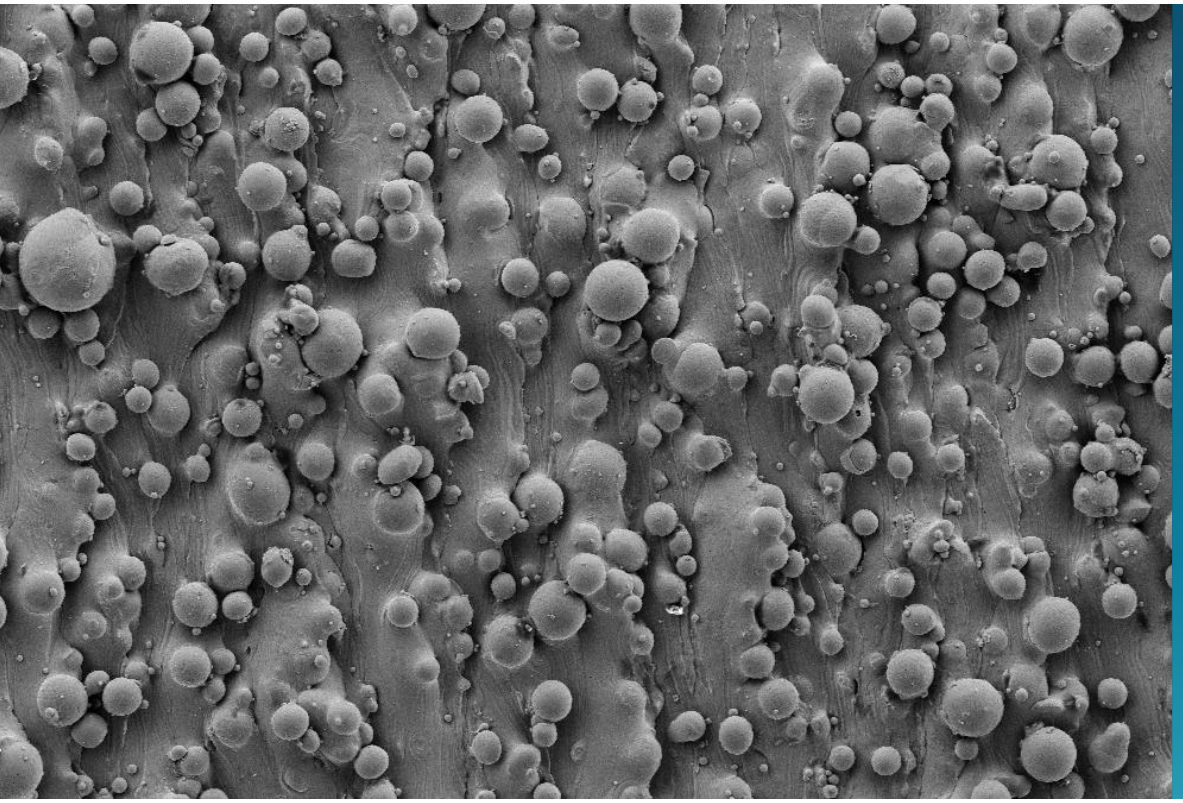
	Legierung H	SmartFlex®	Cleanmelt®
Zusammen-setzung	**Ni 51,4%, Ti 48,6%**		
Reinheit	hoch	hoch	clean
Korngröße	fein	sehr fein	sehr fein
A_s @ 250 MPa	85°C	90°C	**95°C**
Degradation @ ε=2,5%	> 1,5 %	0,8%	**< 0,8%**
Zyklenfestigkeit @ ε=2,5%	0,1 Mio.	1 Mio.	**10 Mio.**

 © Fraunhofer IWU

Fraunhofer IWU

Herstellungsprozesse

Generative Fertigungsverfahren



- Uneingeschränkte Geometrievielfalt
- Feines Korn ermöglicht gute funktionale Eigenschaften
- Verunreinigungen bilden größte Herausforderung
- Binder-Basierte Verfahren aufgrund der Binder ungeeignet
- Laser-Powder-Bed-Fusion (**L-PBF**) - exakte Prozessführung und Schutzgasatmosphäre entscheidend
- Electron-Beam-Powder-Bed-Fusion (**PBF-EB**) **–** Hochvakuum ermöglicht sehr hohe Reinheit
- Direct-Energy-Deposition (**DED**) Laser-, Elektronenstrahl- oder Lichtbogenbasiert: Pulverbasiert nicht so rein wie PBF, drahtbasierte DED-Verfahren bisher sehr wenig erforscht

 © Fraunhofer IWU

Fraunhofer IWU

Werkstoffcharakterisierung

Grundlegende Methoden

Metallurgische Analysemethoden:

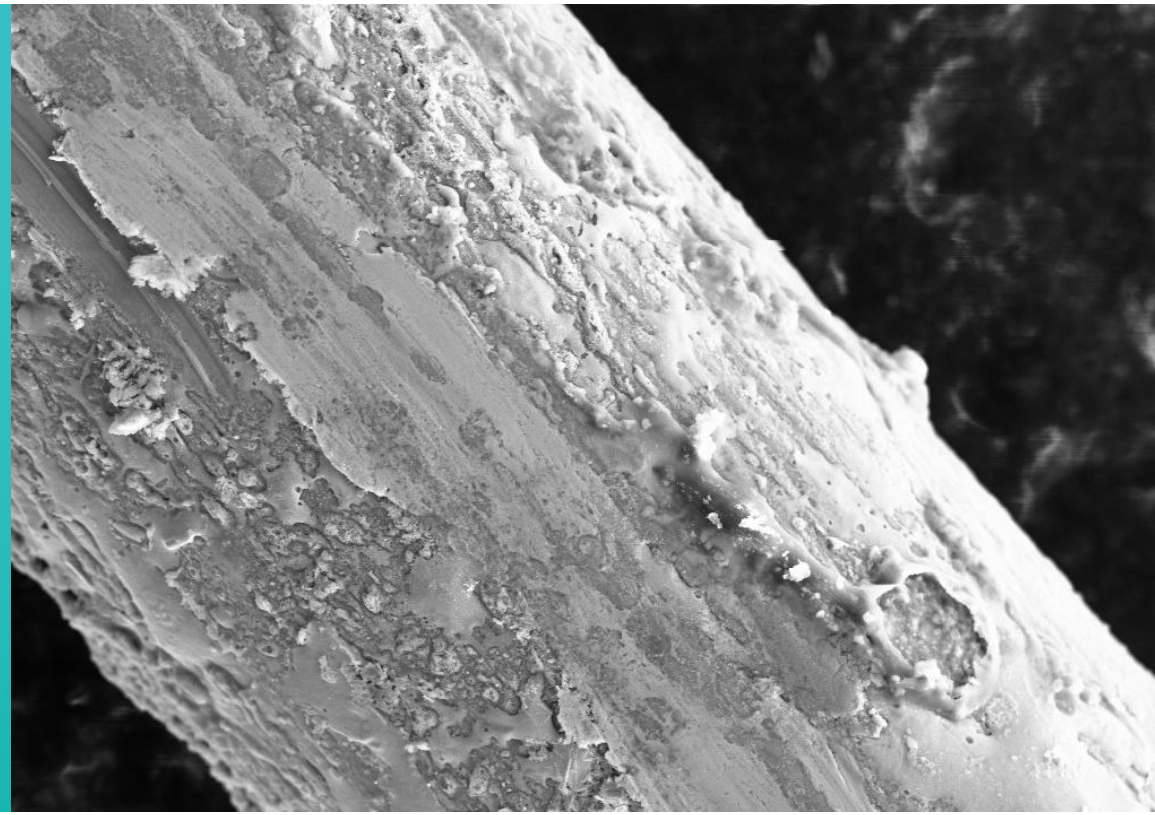
- REM – Rasterelektronenmikroskop
- XRD – Röntgendiffraktometer

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



 © Fraunhofer IWU

Fraunhofer IWU

Werkstoffcharakterisierung

Anwendungsnahe und spezielle Prüfmethoden

Prüfstände zur Ermittlung des Umwandlungsverhaltens:

- Klimatisierung von - 20 – 85°C mittels Klimakammer, Heizelementen, Ölbad oder Peltier Elementen
- Einstellung verschiedener Lastszenarien bzw. Vorspannungen
- Kraft und Positionsmessung erforderlich

Prüfstände für Anwendungsnahe Lebensdaueranalysen:

- Untersuchung des funktionalen und strukturellen Ermüdungsverhaltens von Aktordrähten
- Nachbildung von Lastszenarien bzgl. Spannung und Dehnung
- Ermittlung der maximalen Zyklenzahl in Abhängigkeit parametrierbarer elektrischer und mechanischer Lastszenarien

Hochlast- und Federprüfstände

 © Fraunhofer IWU

Fraunhofer IWU

Simulation, Auslegung und Systemdesign

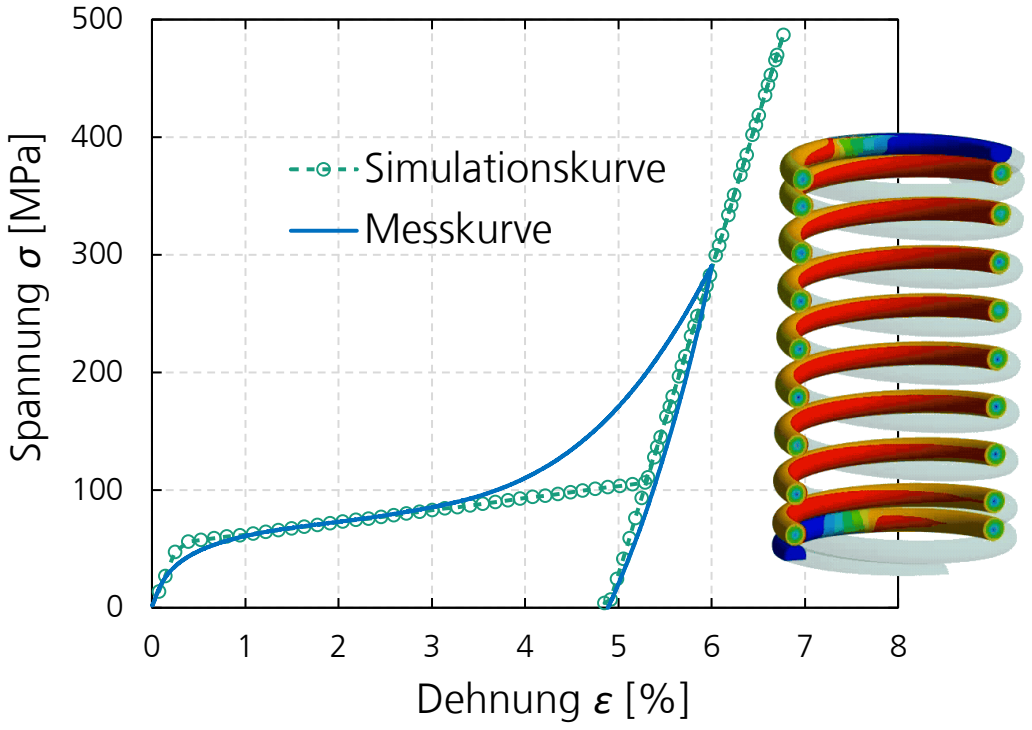
Simulationswerkzeuge zur Auslegung von FGL-Aktoren

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 mindestens 7 (Auricchio) und bis zu 50 Parametern (Woodworth)

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



 © Fraunhofer IWU

Fraunhofer IWU

Simulation, Auslegung und Systemdesign

Auslegung von FGL-Aktoren

Konzeptionierung:

- Ausführliches Lastenheft
- Art der Bewegungserzeugung – Zug/Druck, Biegung, Torsion
- Rückstellung – Konstantlast, Feder, Antagonistische Anordnung
- Aktorhalbzeuge

Detaildesign – Beispiel Drahtaktorik:

- Der Hub eines FGL-Drahtes ist proportional zur Dehnung
- Die Kraft eines FGL-Drahtes ist proportional zum Querschnitt
- Kraft-Weg-Übersetzung erlaubt eine Huberhöhung
- Die Verwendung mehrerer Drähte erlaubt eine Krafterhöhung
- Mehrere Stufen (Miga Motor) erlauben eine Hubaddition
- Zyklenfestigkeit und Degradation sind Auslegungsparameter

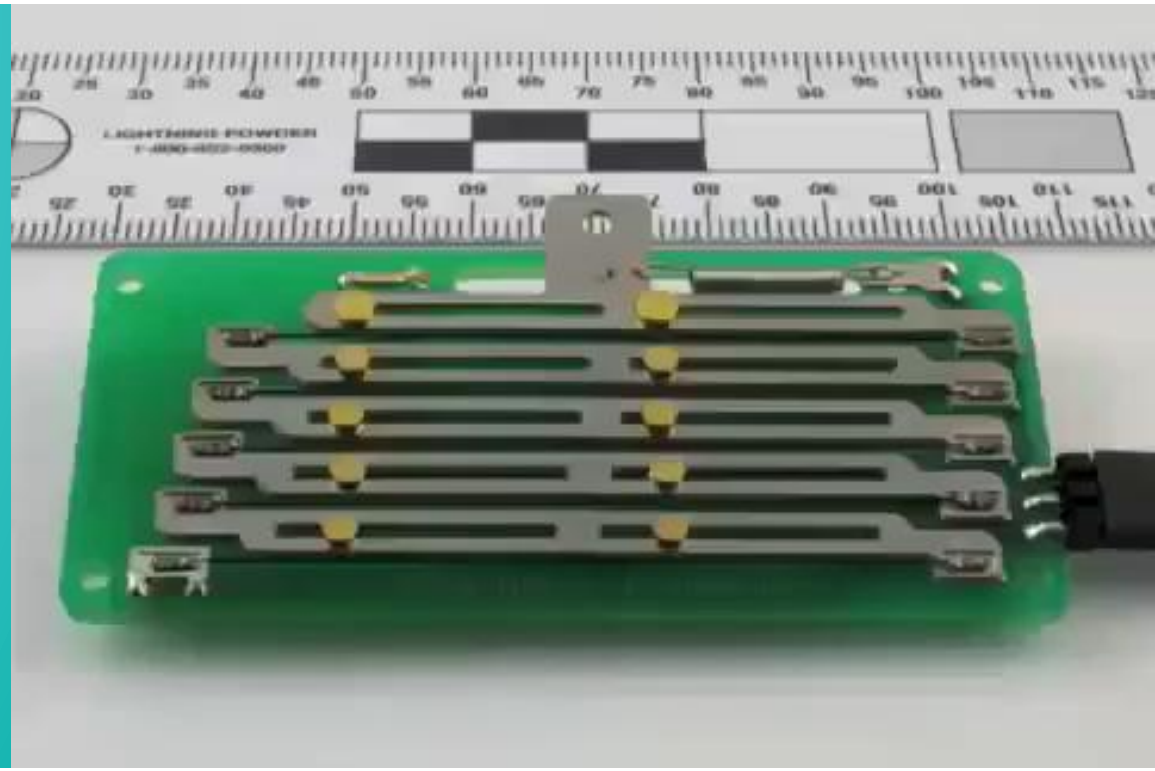


Abbildung: Mehrstufiger Aktor Miga One [Miga Motors]

 © Fraunhofer IWU

Fraunhofer IWU

Steuerung/Regelung

Steuerung

Steuerungskonzept	Berück-sichtigung T_U	Endlagen-erkennung	Minimale Halteleistung	Erkennung variable Last
Zeitbasierte Leistungssteuerung (ZS)	✗	✗	✗	✗
Zeit- und temperaturbasierte Leistungssteuerung (ZTS)	✓	✗	✓	✗
Temperatur- und widerstandsbasierte Leistungssteuerung (TRS)	✓	✓	✓	✓
Zeit- und widerstandsbasierte Leistungssteuerung (ZRS)	✓	✓	✓	✗

Zielstellung:

- Aktorik schnell aktivieren aber nicht überhitzen
- Aktivierungsleistung vs. Halteleistung - Endlagenerkennung
- Berücksichtigung von Last, Umgebungstemperatur, Konvektionsbedingungen und Zyklenzahl

Steuerungskonzepte:

- Stellgröße: Strom, Leistung, Spannung + PWM
- Einstellung der Aktivierungsenergie auf Basis von: Zeit, Temperatur, elektrischem Widerstand oder Kombinationen

Hardware:

- Kostengünstige Controller mit großem Funktionsumfang
- CMOS-Treiber angesteuert durch PWM
- Spannungsquelle

 © Fraunhofer IWU

Fraunhofer IWU

Steuerung/Regelung

Widerstandsbasierte Positionsregelung

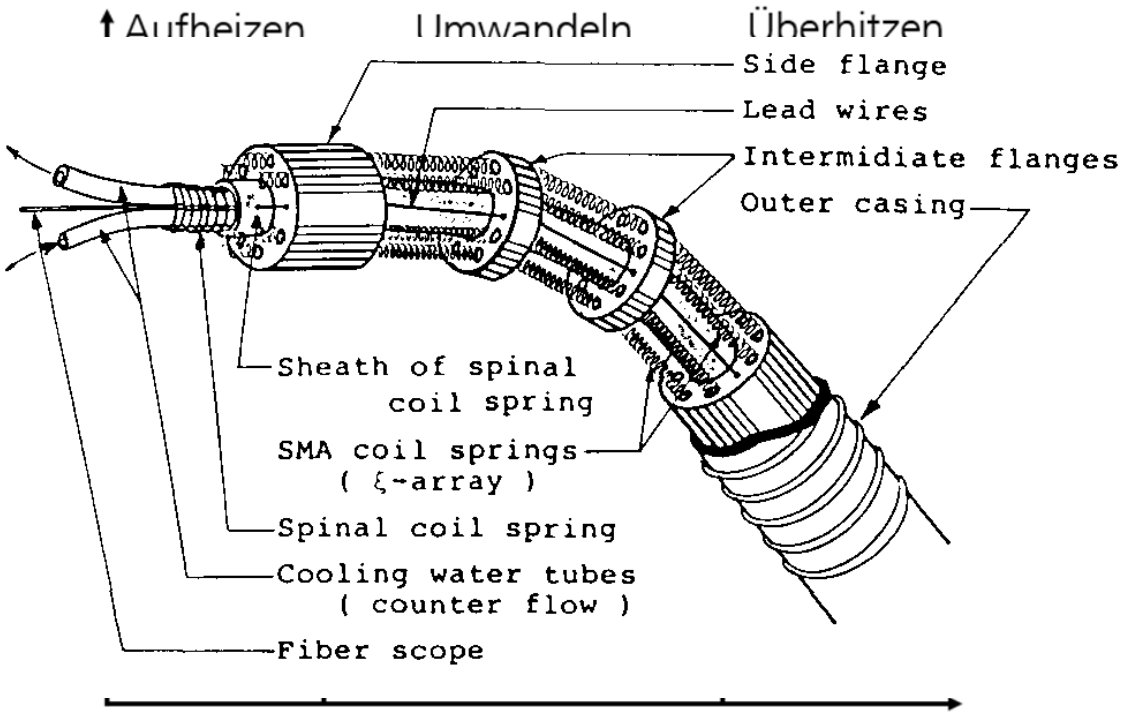


Abbildung FGL-Widerstandscharakteristik

Abbildung Aktives Endoskop mit FGL-Aktoren [Ikuta et. Al.]

Zielstellung:

- Widerstandscharakteristik wird genutzt um Hub zu Regeln
  - Genaue Nachbildung der Hysteresebehafteten Widerstandskennlinie erforderlich – hoher Modellierungsaufwand
  - Spannungsabhängigkeit der Widerstandskennlinie ist problematisch – nur für Systeme mit genau bekannten Lasten geeignet
  - Gut geeignet für antagonistisch aufgebaute Aktoren da Regelung auf Widerstandsdifferenz möglich

 © Fraunhofer IWU

Fraunhofer IWU

Produktionstechnik

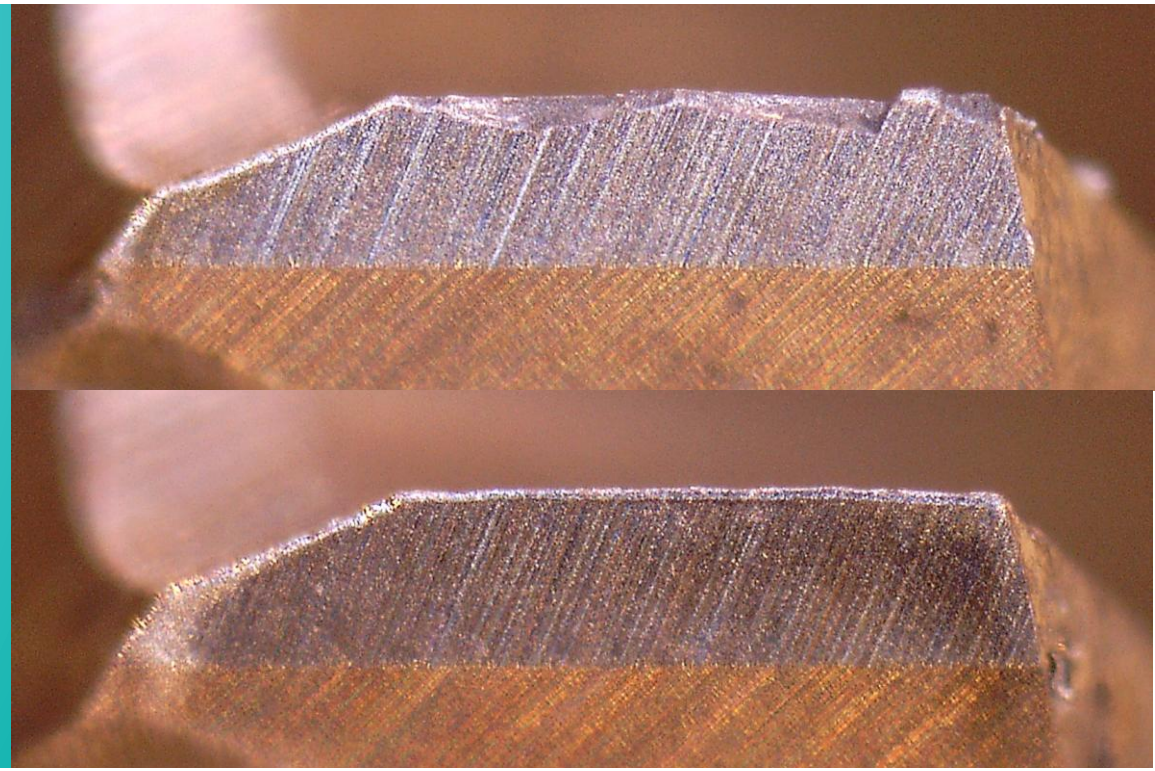
Technologien für die Verarbeitung von FGL

Trennende Verfahren:

- Zerspanen aufgrund mechanischer Eigenschaften anspruchsvoll
- Laserschneiden von dünnen Blechen oder Bändern
- Erodieren
- Wasserstrahlschneiden
- Hochgeschwindigkeitsstanzen

Umformverfahren:

- Walzen
- Strangziehen
- Tiefziehen
- Biegen
- Innenhochdruckumformung



 © Fraunhofer IWU

Fraunhofer IWU

Produktionstechnik

Federherstellung

Wickeln:

- Draht wird um Dorn gewickelt
- Geometrie wird durch Dorn definiert
- Wärmebehandlung erfolgt auf dem Dorn
- Geeignet für kleine Stückzahlen

Winden:

- Draht wird über Windestifte geführt und durch Kinematik Geometrie eingestellt
- Verschiedene Federarten herstellbar
- Wärmebehandlung erfolgt in zusätzlichem Werkzeug
- Insbesondere geeignet für große Stückzahlen

 © Fraunhofer IWU

Fraunhofer IWU

Produktionstechnik

Textilintegration

Technologien:

- Weben
- Stricken, Wirken, Häkeln
- Flechten, Knüpfen
- Drahtdurchmesser ist begrenzender Faktor

Potenzielle Anwendungen:

- Adaptive Kleidung
- Halbzeuge für FKV-Strukturen
- FGL-Sensorik in Gürteln, Kleidung, Pflastern

[Curious Collections by Marielle Leenders, Youtube.com]

 © Fraunhofer IWU

Fraunhofer IWU

Produktionstechnik

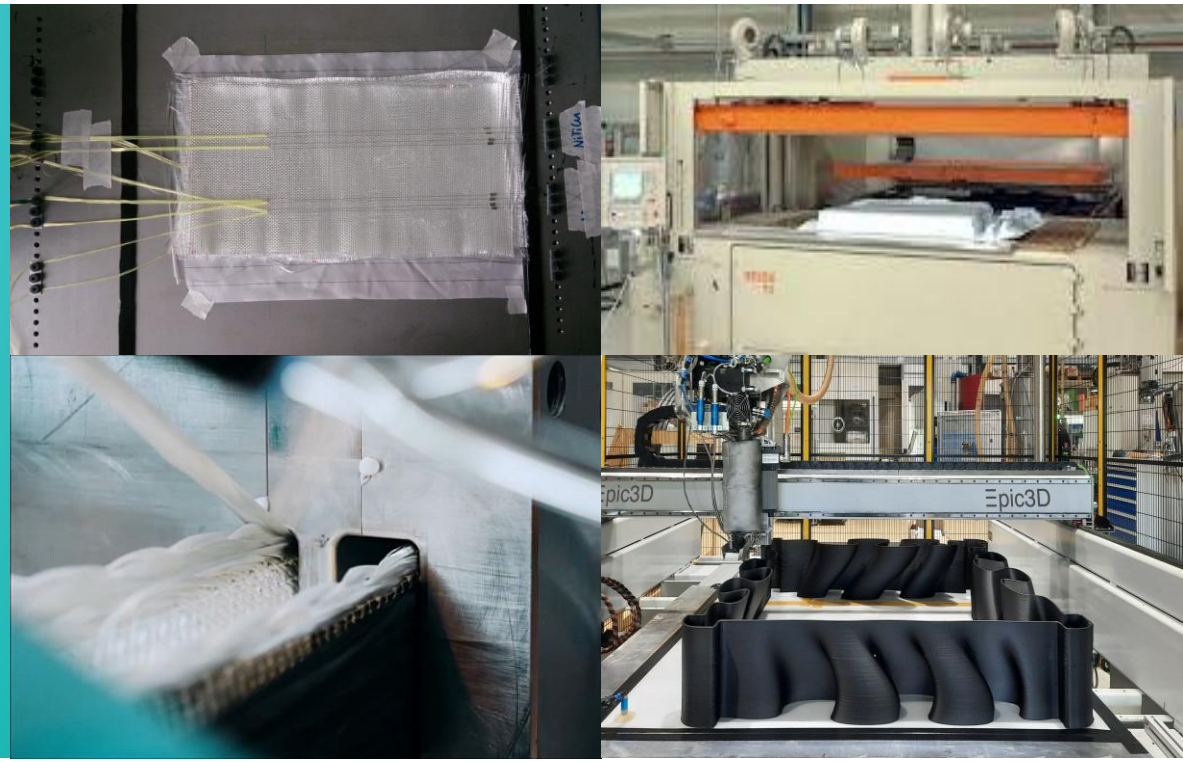
Kunststoffintegration

„Kalte“ Prozesse:

- Duroplast-Vakuuminfusion
- Hybride Integration von FGL mit Fused Deposition Modeling

„Warme“ Prozesse:

- Spritzgießen
- Thermoformen
- Extrudieren
- Pultrudieren



 © Fraunhofer IWU

Fraunhofer IWU

Produktionstechnik

Fügetechnik

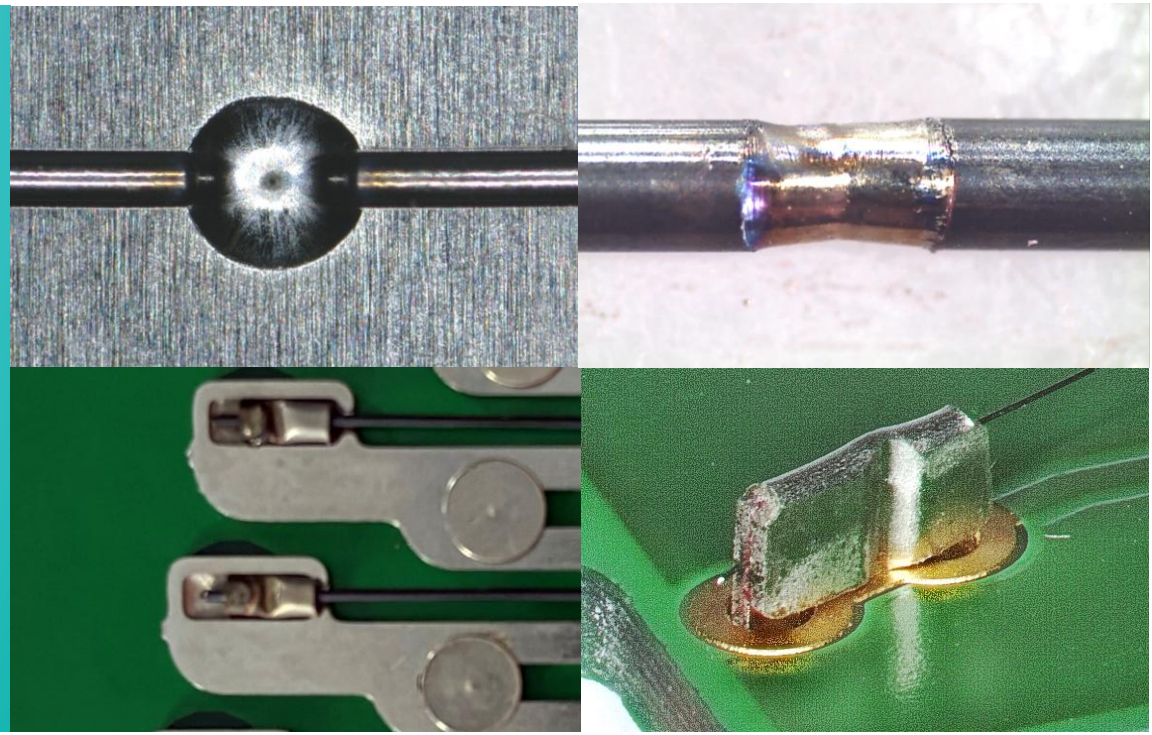
Elektromechanische Kontaktierung von FGL

Thermische Fügetechnik:

- Löten mit Flussmittel auf oxydfreier Oberfläche möglich
- Widerstandspunktschweißen
- Laserschweißen

Mechanische Fügetechnik:

- **Crimpen**
- Splicen
- Nieten



 © Fraunhofer IWU

Fraunhofer IWU

Produktionstechnik

Automatisierung

- Automatisierte Herstellung von FGL-Draht-Aktoren stellt aufgrund der Eigenschaften von FGL eine enorme Herausforderung dar
- Komplexe Einzelprozessschritte – teures Know-How
  - Drahthandling
  - Vorspannen
  - Crimpen
- Hoher finanzieller Aufwand bei der Anlagenentwicklung
- Meist nur bei sehr großen Stückzahlen gerechtfertigt
- Konsequent fertigungsgerechte Produktgestaltung erforderlich

Abbildung: Drahtzuführung für OIS-Aktoren [Cambridge Mechatronics]

 © Fraunhofer IWU

Anwendungen und Trends

FGL Sensorik

Key facts:

- K-Faktor > 5, Dehnung (bis zu 8 % stat., bis zu 2 % dyn.)
- Zyklenfestigkeit (>10^6 Zyklen mit 0.5 % Dehnung)
- Einfache Integration in FVK oder Elastomere
- Konventionelle und kostengünstige Auswerteelektronik
- Preis vergleichbar mit herkömmlichen DMS

Sensortypen:

- Draht- bzw. Faser-Sensoren
- Dünnschichtsensoren

Anwendungen:

- Windkraft
- Automotive: Drucktanks, Blattfedern, Fahrwerk
- Health: Prothesen, Textilien, Sportgeräte

 © Fraunhofer IWU

Fraunhofer IWU

Anwendungen und Trends

Energieautarke Anwendung: FGL-Federsysteme

Abbildung: Verbrühschutzventil mit FGL-Feder [Toto]

- Aktorprinzip FGL-Feder gegen konventionelle Feder
- Energieautarke Aktivierung durch umgebendes Medium
- Nutzung von:
  - Austenit-Martensit-Umwandlung
  - R-Phase
- Anwendung in:
  - Haushaltsgeräten
  - Badarmaturen
  - Automotive: Öl- und Kühlkreisläufe, Standheizung
  - Gebäudetechnik
- Stückzahl > 5 Mio. jährlich

 © Fraunhofer IWU

Fraunhofer IWU

Anwendungen und Trends

Schaltende Anwendung: Pneumatikventile für Sitzkomfortsysteme

Abbildung: ASG Pneumatikventil 2010 [ASG]

Abbildung: Alfmeier Pneumatikventil 2021

Abbildung: Kongsberg Pneumatikventil 2015

Status Quo FGL-Pneumatikventile:

- Markteinführung 2005 durch Alfmeier/ASG
- Bisher mehr als 140 Mio Stück produziert
- 2025 Mehrere Anbieter am Markt vertreten

Gemeinsamkeiten der Systeme:

- Modularen Aufbau aus Einzel- bzw. Doppelaktoren
- Aktoren sind meist auf Leiterplatten montiert
- Sämtliche Systeme nutzen gecrimpte Drähte
- Drahtdurchmesser 76µm
- Umlenkung des FGL-Drahtes ist symmetrisch gestaltet
- Geringe Teileanzahl
- Sehr geringer Stückpreis

 © Fraunhofer IWU

Fraunhofer IWU

Anwendungen und Trends

Geregelte Anwendung: Bildstabilisierung und Autofokus in Kamerasystemen

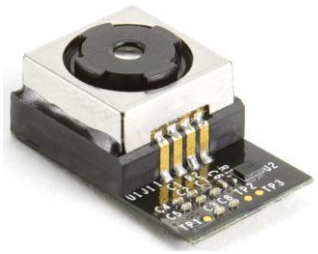


Abbildung: SMA AF [ASG]

Abbildung: SMA Lens Shift OIS [CML]

Abbildung: SMA Sensor Shift OIS [CML]

Abbildung: SMA Module Tilt OIS [CML]

Abbildung: SMA Lens Shift OIS+AF [CML]

Abbildung: SMA AF [CML]

- Erzeugung von Relativbewegungen zwischen Linse und Imager Chip zur:
  - Realisierung Autofocus (AF)
  - Kompensation von Schwingungen – Optical Image Stabilisation (OIS)
- Verschieden Ansätze als Produkte realisiert:
  - 2010 SMA AF durch Actuator Solutions
  - 2015 SMA Lens Shift OIS durch Hutchinson/TDK
  - 2022 SMA Sensor Shift OIS und CM824 Treiber-Schaltkreis
  - 2023 SMA AF+OIS und SMA Module Tilt OIS
  - 2024 SMA AF
- Stückzahl geschätzt derzeit bei 150 Mio.
- Smartphone-Hersteller suchen nach Alternativen und sind im IP-Bereich sehr aktiv

 © Fraunhofer IWU

Fraunhofer IWU

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Fraunhofer IWU

Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU

Kontakt

Dr. Kenny Pagel
Abteilungsleiter Formgedächnistechnik
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
IWU

Fraunhofer-Institut für Werkzeug-
maschinen und Umformtechnik IWU

Abteilung Formgedächtnistechnik

Die gesamte Wertschöpfungskette im Blick

Werkstoff-charakterisierung

- Kennwertbestimmung in jedem Entw.-schritt
- Methoden der metallurgischen, physikalischen und mechanischen Analyse

Prüfstände

- Prüfung von Systemen mit hohem Reifegrad
- Drahtaktoren
- Federn
- Hochlastaktoren
- Mikrosysteme, MEMS

Simulation

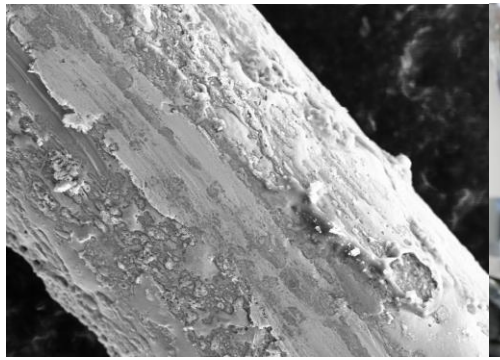
- FEM für Komponenten mit mehrachsigen Belastungen
- Transiente Modelle zur Systemanalyse von Drähten

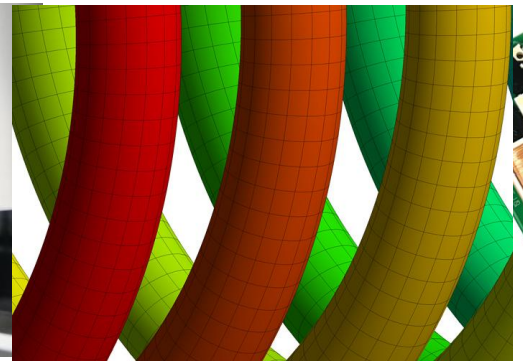
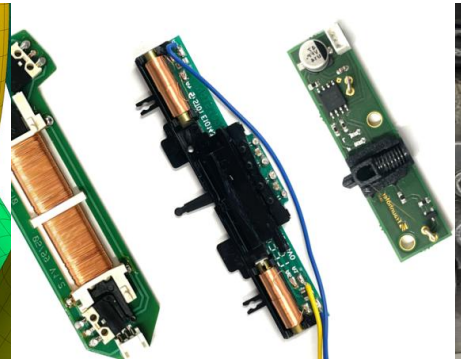
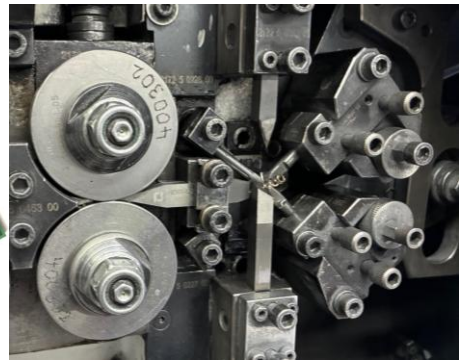
Anwendungs-entwicklung

- Mikroaktorik in MEMS
- Drahtaktorik
- Energieautarke Aktoren
- Hochlastaktoren
- Schrittantriebe

Produktions-technik

- Halbzeugverarbeitung
- Automatisierte.Herstel-lung, Qualitätskontrolle
- Fügen (mech., therm.)
- Generative Fertigung



© Fraunhofer IWU