
ENTWICKLUNG EINER AKTIVEN KABELKLEMME AUF BASIS VON FORMGEDÄCHTNISLEGIERUNGEN

Philipp Zimmermann

8. Tagung "Feinwerktechnische Konstruktion" – 04.11.2014



AGENDA

- 1. Einleitung
- 2. Motivation
- 3. Grundlagen und Untersuchungen
- 4. Anforderungen und Lösungsvarianten
- 5. Auslegung der Vorzugslösung
- 6. Funktionsnachweis
- 7. Zusammenfassung und Ausblick

1. Einleitung

Klemmen: Definition

- Klemmen werden in der Elektrotechnik zum lösbaren Anschluss und Verbinden von elektrischen Leitern eingesetzt
- Klemmen verfügen über eine Anzahl von Klemmstellen bzw. Polen, an welchen mittels einer mechanischen Vorrichtung der Leiter sicher und beständig geklemmt wird
- Es erfolgt der Anschluss von Massiv-, Mehr- und Feindrahtleitern und ggf. Leitern mit Crimpverbindungen
- Über die hergestellte Verbindung erfolgt die Übertragung von Informationen und elektrischer Energie

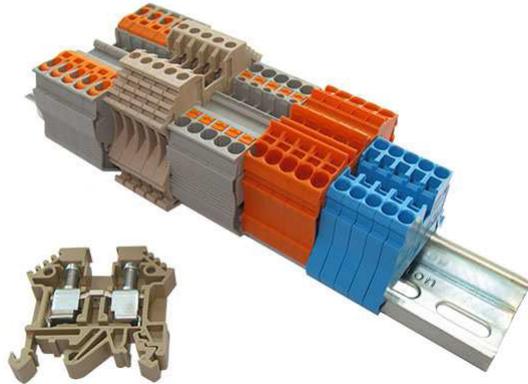
1. Einleitung

Klemmen: Anwendungsbereiche

- Gebäudeinstallationen
 - Elektrizitätsversorgung und -verteilung
 - Anlageninstallationen
 - Fahrzeugindustrie
 - Elektrotechnische Produkte
- Ausgereifte Massenprodukte im millionenfachen Einsatz

1. Einleitung

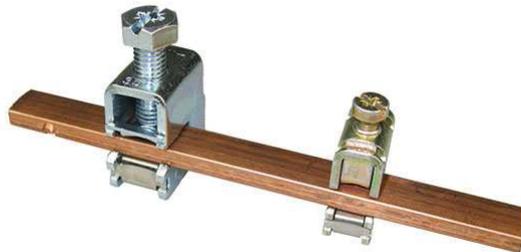
Klemmen: Typen



Reihenklemmen



Leiterplattenklemmen



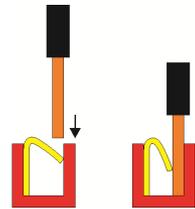
Sammelschienenklemmen



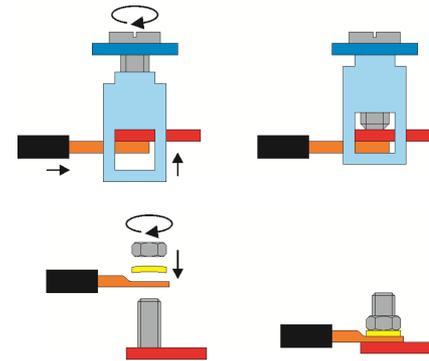
Gebäudeinstallationsklemmen

1. Einleitung

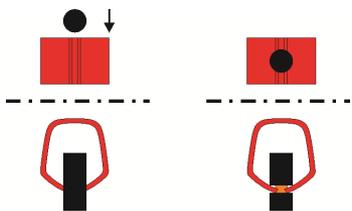
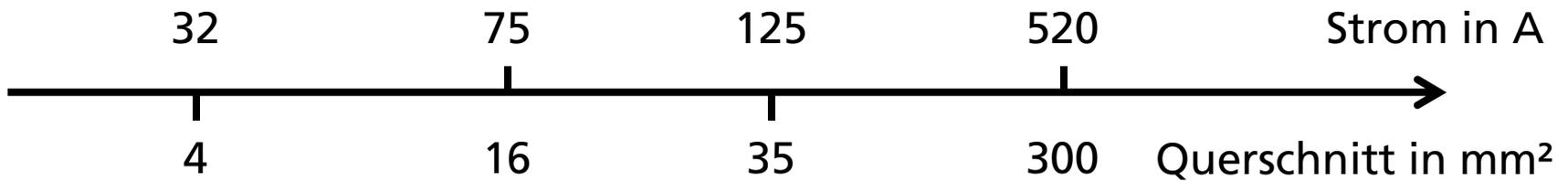
Klemmen: Mechanismen



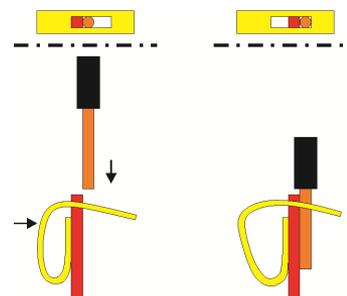
Push-In-Klemme



Schraub-/Bolzenklemme



Schneidklemme



Federzugklemme

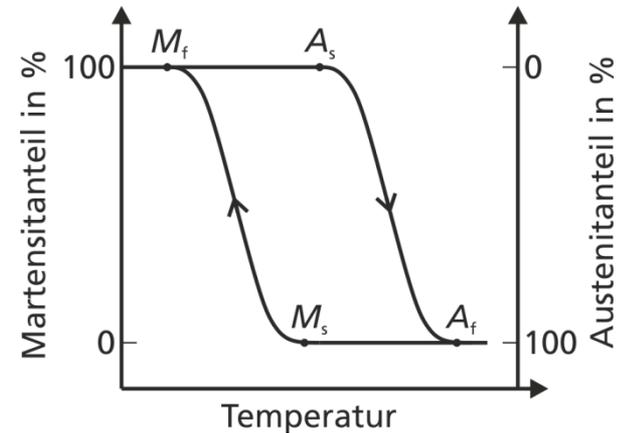
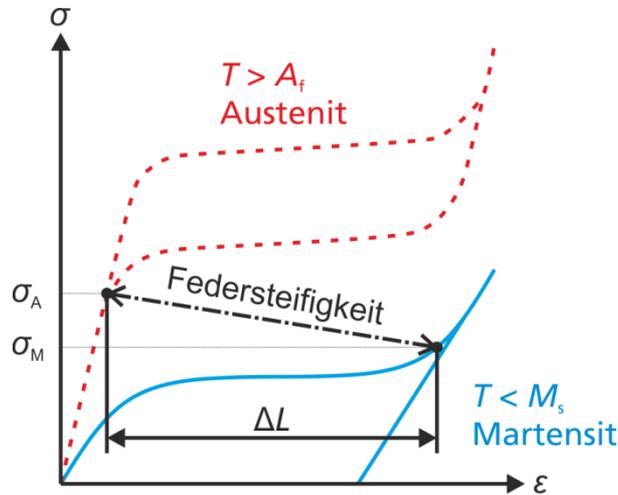
1. Einleitung

Formgedächtnislegierungen (FGL): Grundlagen I

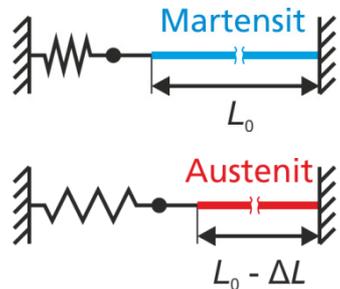
- Niedrigtemperaturphase: Martensit
 - Hochtemperaturphase: Austenit
 - Der Werkstoff wird unter mechanischer Last scheinbar plastisch verformt und nimmt nach Erwärmung seine Ausgangsform wieder an
 - Temperatur- und spannungsinduzierte Phasenumwandlungen in der Kristallgitterstruktur des Materials bedingen den Effekt
 - Häufigster Legierungstyp: Nickel-Titan
 - Vorteile: Sehr hohes Arbeitsvermögen, große Stellwege und -kräfte, robust
 - Nachteile: Temperaturabhängige Dynamik, Hystereeffekte, komplexes Materialverhalten
- Extrinsischer Zweiwegeeffekt für die aktorische Nutzung

1. Einleitung

Formgedächtnislegierungen (FGL): Grundlagen II



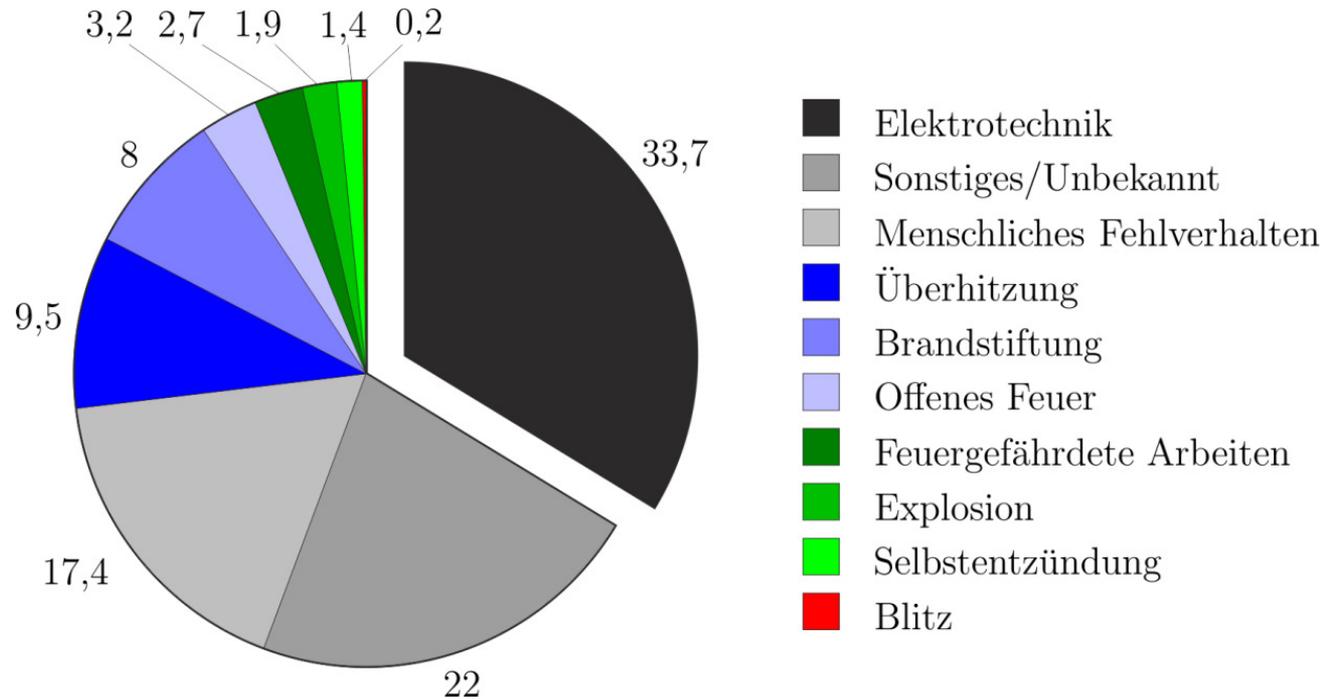
Temperaturhysterese



Extrinsischer Zweiwegeeffekt gegen Feder

2. Motivation

Brandschadenstatistik



Brandursachen in Deutschland in Prozent (2010)

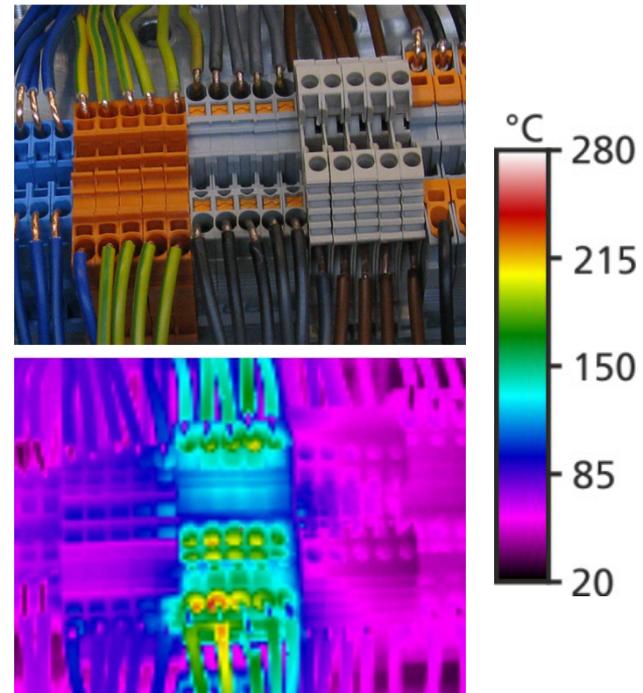
Quelle: VdS Schadenverhütung GmbH

2. Motivation

Mängelursachen

- Bei ca. 10 % aller Prüfungen im Rahmen einer Feuerversicherung wurden Mängel an Leiteranschlüssen und -verbindungen festgestellt (Stand: 2008)
- Ursachen der Lockerung:
 - Bedienfehler bei der Leiterinstallation
 - Vibrationen
 - Alterungserscheinungen
 - Temperaturschwankungen
 - Kriechen der (Leiter-)Werkstoffe

Übermäßige Erwärmung im Reihenklemmen-
aufbau durch Lockerung von Klemmstellen



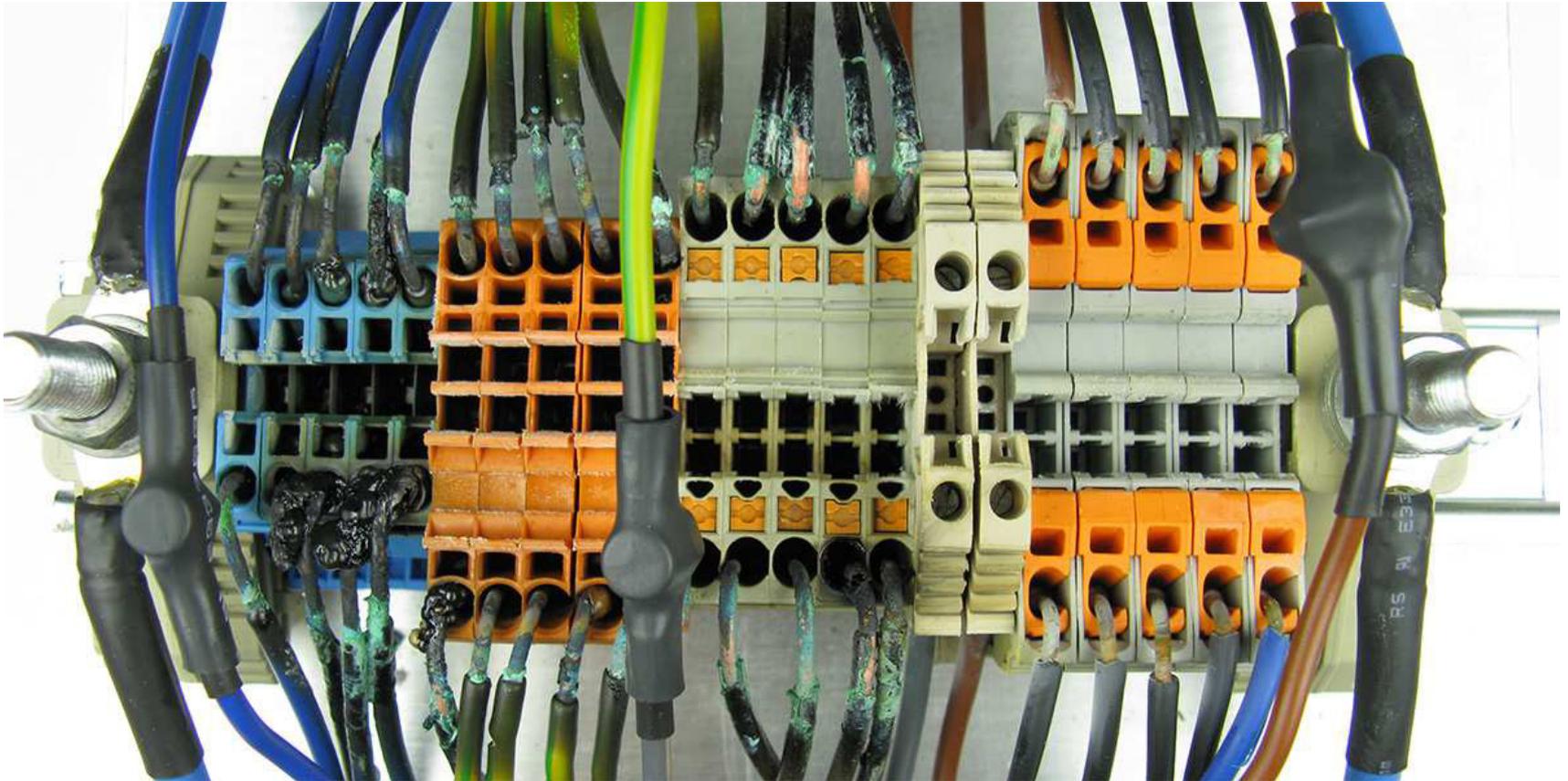
2. Motivation

Beschädigungen durch übermäßige Erwärmung I

- Übermäßige Erwärmung in Folge der Lockerung der Klemmstelle
- Wegen des langsamen Anstiegs lösen weder die Überstrom- noch die Fehlerstrom-Schutzeinrichtung aus
- Ab 125 °C kommt es zur verstärkten Bildung einer Oxidschicht
- Ab 260 °C schmelzen eingesetzte Kunststoffe
- Entstehung von Rauch
- Brandgefahr durch Funkenflug bzw. Störlichtbögen
- Entzündung von in der Nähe befindlichen Materialien (bspw. Holz oder Papier)

2. Motivation

Beschädigungen durch übermäßige Erwärmung II

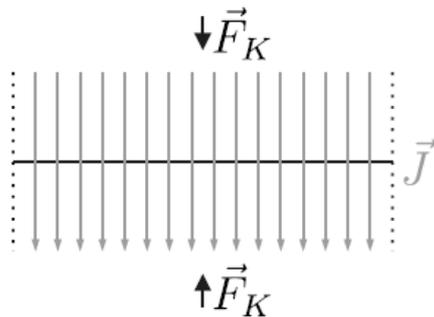


Beschädigungen an einem Reihenklemmenaufbau verursacht durch Lockerung der Klemmstellen

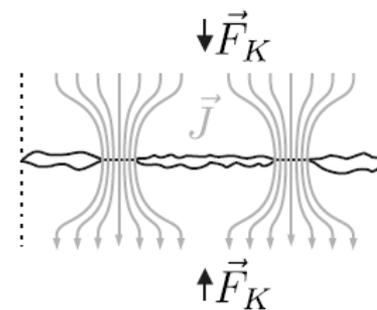
3. Grundlagen und Untersuchungen

Kontaktkraft und Kontaktwiderstand

- Kontaktwiderstand = Fremdschichtwiderstand + **Engewiderstand**
- Fremdschichtwiderstand ist abhängig von: Verunreinigungen durch Öle, Partikel, anorganische Schichten
- Engewiderstand ist abhängig von: **Kontaktkraft**, Kontaktfläche, Oberflächenrauigkeit, Härte, spezifischem elektrischen Widerstand



Ideale Kontaktfläche



Reale Kontaktfläche

Kontaktflächen mit resultierender Stromdichteverteilung

3. Grundlagen und Untersuchungen

Durchgeführte Untersuchungen

- Untersucht wurden Klemmen vom Typ: Schraub-, Bolzen-, Federzug-, Schneid- und Push-In-Klemme
- Mechanische Festigkeit der Klemmstellen (Spannungsabfall, Kontaktwiderstand)
- Leiterauszugsprüfung
- Erwärmungsprüfung zur Ermittlung der stationären Endtemperatur
- Vibrationsprüfung in x-, y-, z-Richtung
- Messung der Kontaktkraft
- Installationszeit von Leitern und Kosten der Klemmen

3. Grundlagen und Untersuchungen

Zusammenfassung der Untersuchungen (Auszug)

Kriterium	Schraub-/ Bolzenklemme	Federzug- klemme	Push-In- Klemme	Schneid- klemme
Max. Strom in A	520	125	72	32
Max. Leiterquerschnitt in mm ²	300	35	16	4
Kontaktkraft	sehr hoch	mittel	gering	mittel
Wirkende Kontaktfläche	groß	klein	klein	klein
Selbstständiges Nachstellen	nein	ja	ja	ja
Widerstand gegen Vibration	hoch	gering	gering	mittel
Widerstand gegen Temperaturschwankungen	gering	hoch	hoch	hoch
Kompensation des Leiterkriechens	gering	hoch	hoch	hoch

4. Anforderungen und Lösungsvarianten

Anforderungsliste (Auszug)

- Forderungen:
 - Erzeugen einer Mindestkontaktkraft
 - Keine Erwärmung der Klemme über die Höchsttemperatur
 - Bestehen der Prüfungen für Niederspannungsschaltgeräte und Klemmen
 - Hohe Funktionssicherheit über Einsatzdauer
 - Manuelles Nachziehen der Klemmen soll entfallen

- Wünsche:
 - Skalierbar für möglichst viele Leiterquerschnitte
 - Möglichst hohe Kontaktkraft nach selbstständigem Nachstellen
 - Möglichst geringer Montageaufwand des FGL-Elementes
 - Möglichst geringe Investition für Anpassung der Klemme

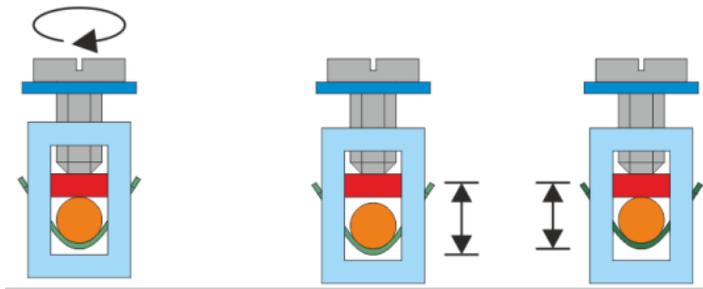
4. Anforderungen und Lösungsvarianten

Wertungskriterien

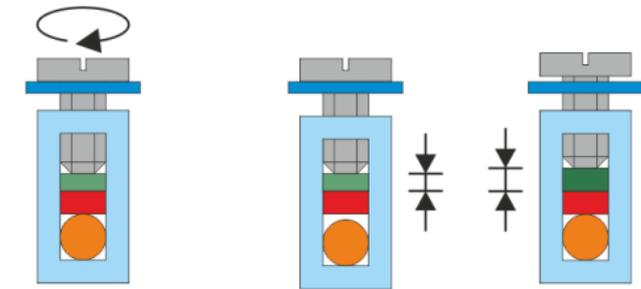
- Verfügbarkeit Formgedächtnis-Halbzeug
- Fertigungsaufwand Formgedächtnis-Element
- Materialvolumen bzw. Kosten der Formgedächtnislegierung
- Montageaufwand des Formgedächtnis-Elements
- Kraftpotential
- Wegpotential
- Potential des Wärmeeintrags
- Investition für die Anpassung
- Einsatzbereich Leiterquerschnitt

4. Anforderungen und Lösungsvarianten

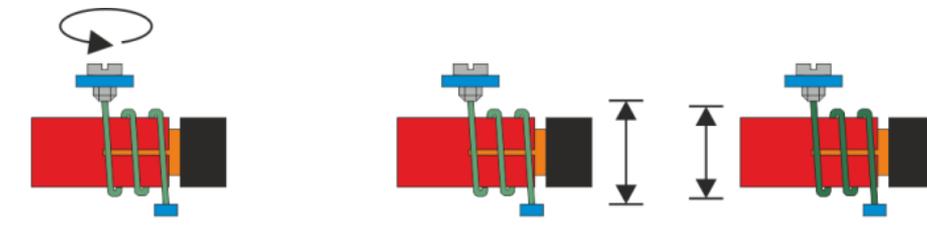
Lösungsvarianten (Auszug)



Variante mit FGL-Biegeblech



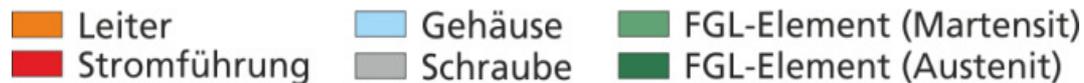
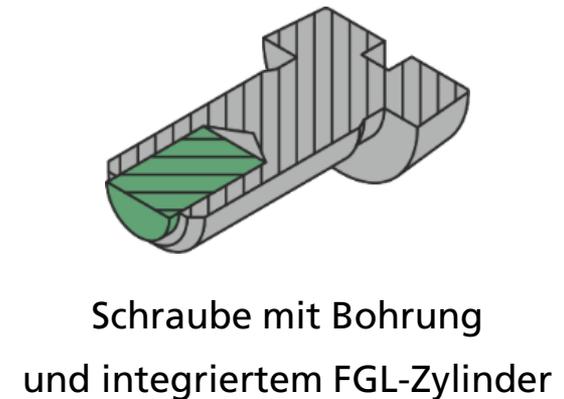
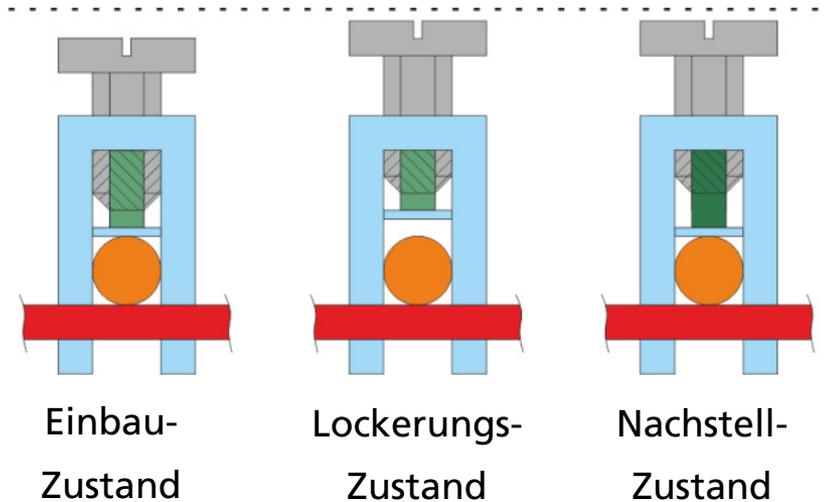
Variante mit FGL-Einlegestück



Variante mit geschlitzter Hülse umwickelt mit FGL-Draht

4. Anforderungen und Lösungsvarianten

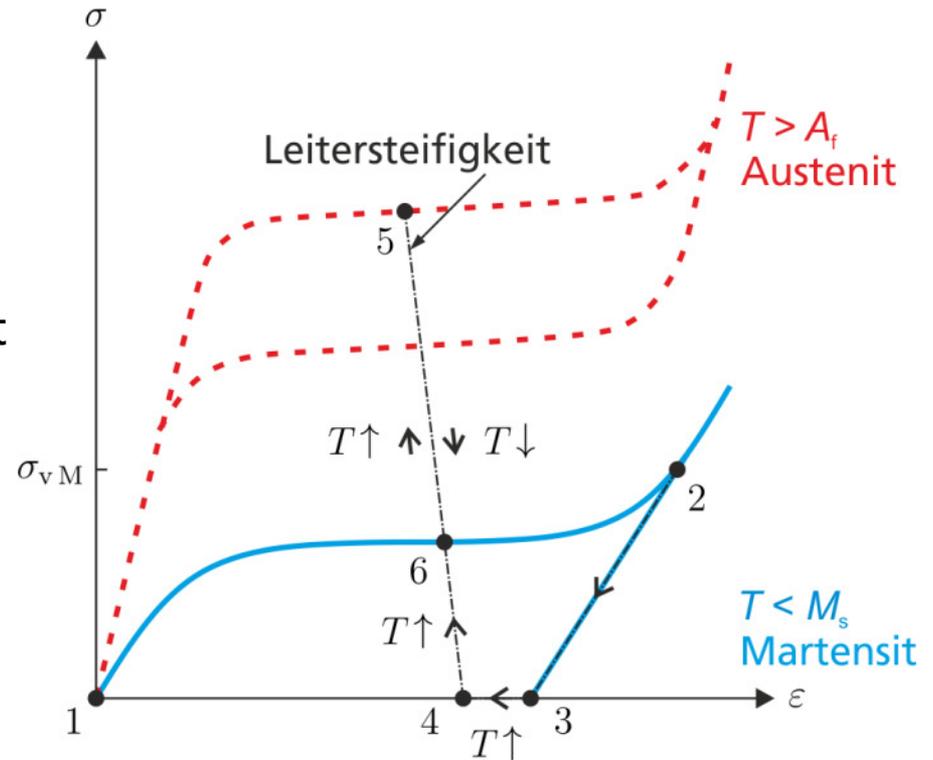
Vorzugslösung – Variante mit FGL-Zylinder



5. Auslegung der Vorzugslösung

Schematisches Funktionsprinzip

1. Ausgangszustand
2. Einbauzustand nach Leiterinstallation
3. Leiter gelockert (Kraft = 0)
4. Möglicher Luftspalt kompensiert
5. FGL in Austenitphase
6. FGL in Martensitphase (Endzustand)



5. Auslegung der Vorzugslösung

Problematik der FGL-Vorspannung

- Anziehen der Schrauben bei der Leiterinstallation erfolgt händisch mit Schraubendreher oder Drehmomentenschlüssel bzw. -schrauber
- Nach VDI Richtlinie 2230 sind Streuungen der Vorspannkraft von $\pm 43\%$ bei beispielsweise abknickenden Drehmomentenschlüsseln möglich
- Aufgrund der großen Streuung empfiehlt sich eine Vorspannung des FGL-Zylinders vor der Leiterinstallation
- Der Zylinder schließt im vorgestauchten Zustand bündig mit der Unterseite der Schraube ab
- Da die herkömmliche Schraube durch eine Schraube mit integriertem FGL-Zylinder ersetzt wird, ist keine neue Dimensionierung erforderlich

6. Funktionsnachweis

Proben für den Nachweis

- M10×20 Stahlschrauben mit Regelgewinde der Festigkeitsklasse 8.8
- FGL-Zylinder aus Nickel-Titan der Firma *Memry*, Typ *Legierung M* mit einem Durchmesser von 6,35 mm

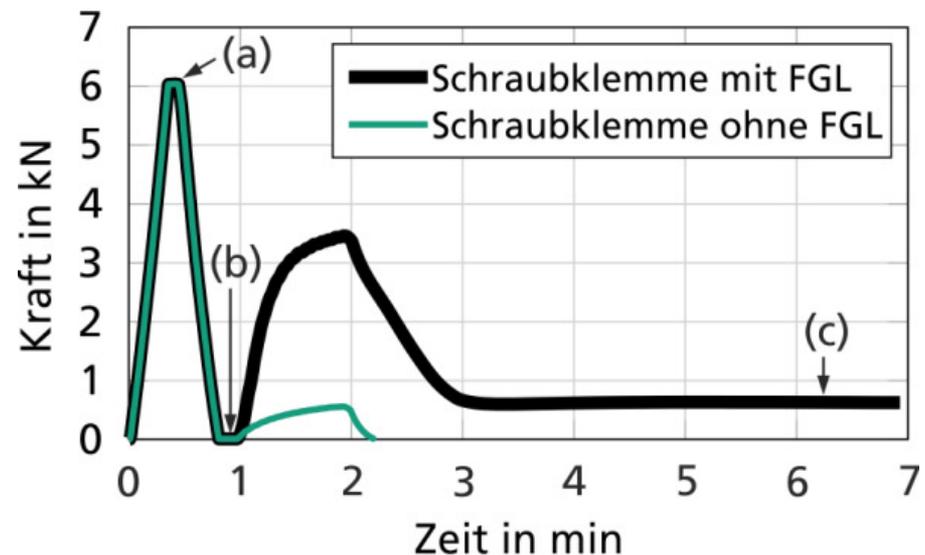
Zylinderhöhe H in mm	Bohrungstiefe T in mm		
10	9	5	1
5	4	2,5	1
2,5	1,5	1,25	1



6. Funktionsnachweis

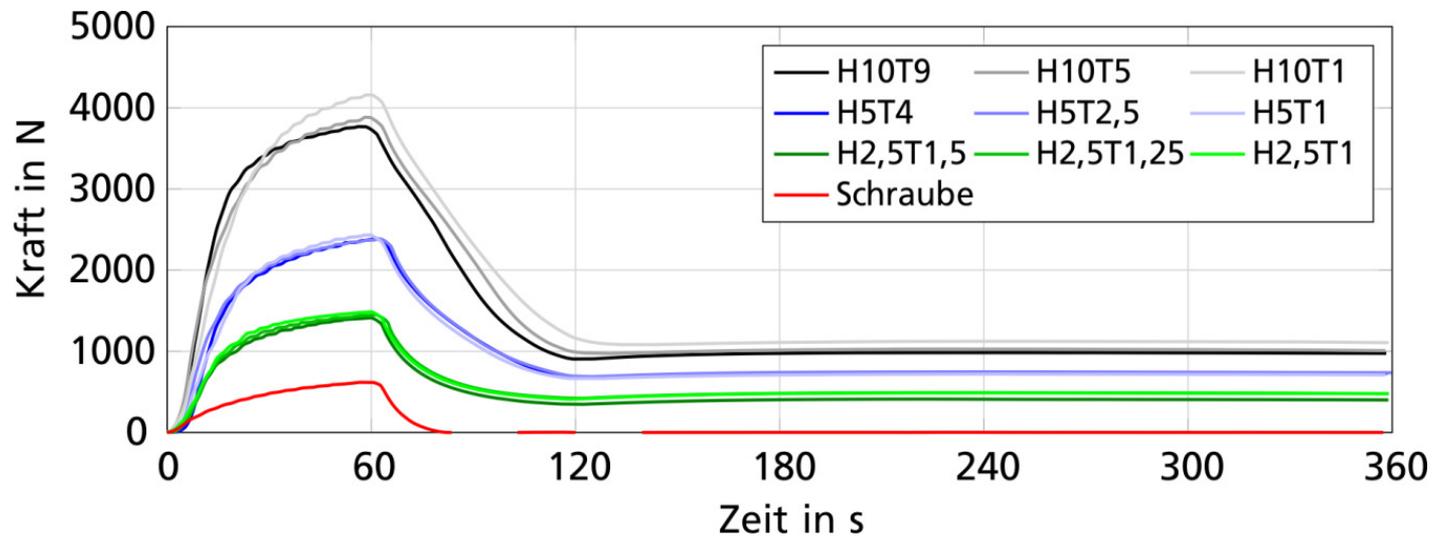
Versuchsablauf

- Messung der Kontaktkraft in der Kabelklemme unter zeitlich verkürzten Bedingungen:
 - Erzeugen einer Vorspannung (a),
 - Lockerung von (a) zu (b),
 - Erwärmung und Abkühlung von (b) zu (c),
 - mit verbleibender Kontaktkraft (c).



6. Funktionsnachweis

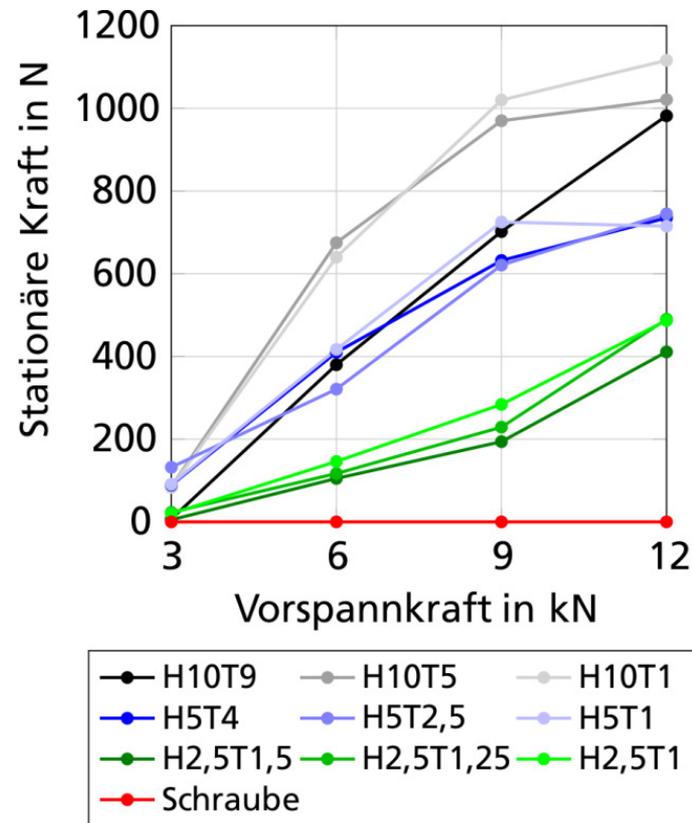
Kraftverlauf während Erwärmung und Abkühlung



Kraftverlauf bei einer Vorspannung von 12 kN

6. Funktionsnachweis

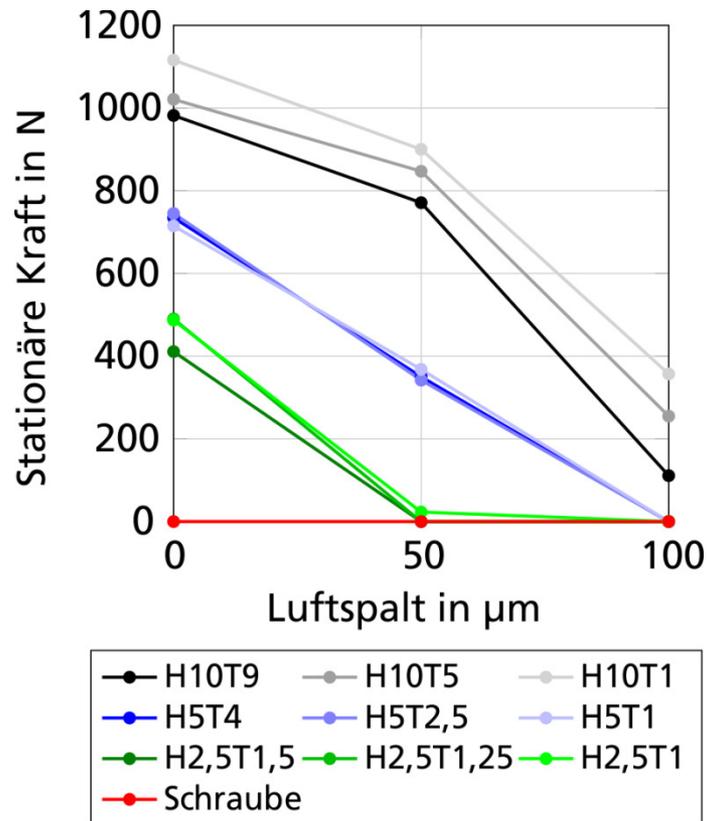
Ergebnisse: Einfluss der Vorspannkraft



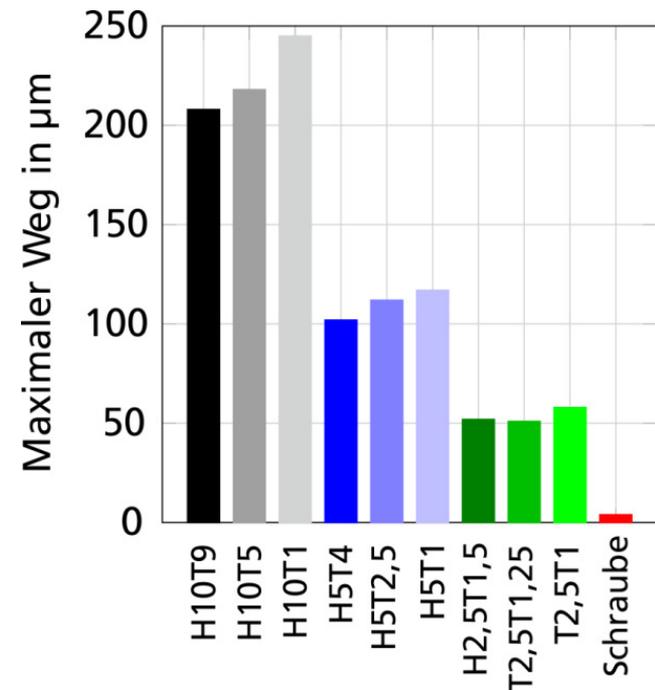
Einfluss der Vorspannkraft auf die verbleibende Kraft nach der Abkühlung

6. Funktionsnachweis

Ergebnisse: Einfluss des Luftspalts



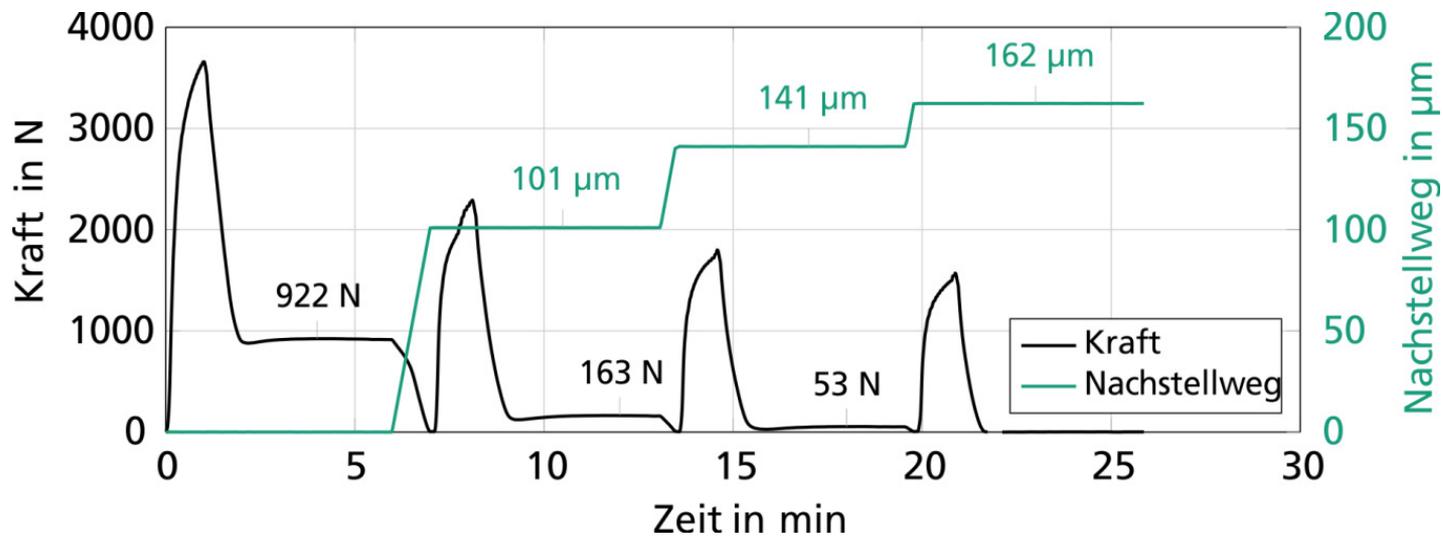
Verbleibende Kraft bei verschiedenen Luftspalten



Maximale Ausdehnung ohne Gegenkraft

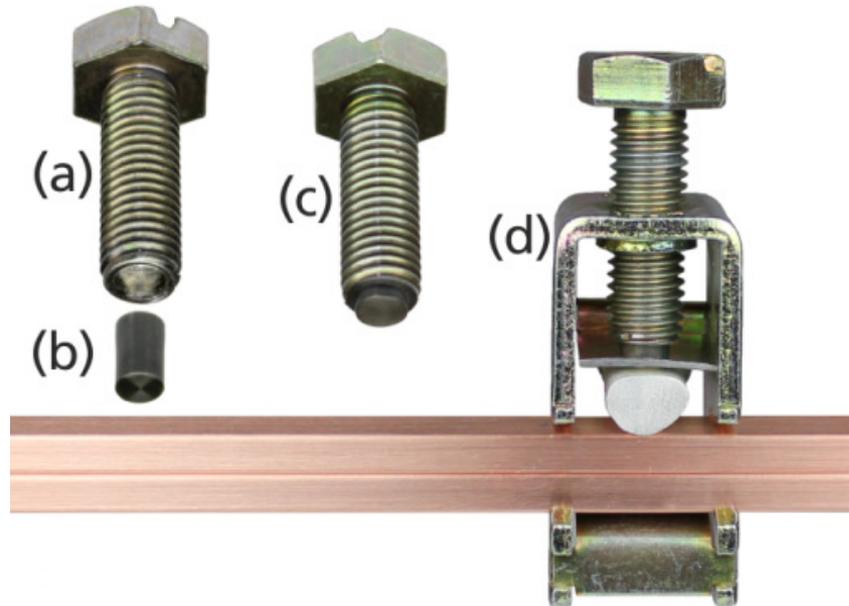
6. Funktionsnachweis

Ergebnisse: Zyklisches Nachstellen



Verbleibende Kraft und zurückgelegter Weg bei mehrmaliger Lockerung und Kompensation

6. Funktionsnachweis Einbau in Sammelschienenklemme



Selbstnachstellende Kabelklemme am Beispiel einer Sammelschienenklemme

(a) Schraube mit Bohrung

(b) Zylinder aus Formgedächtnislegierung

(c) Schraube mit FGL-Zylinder

(d) Schraube mit FGL-Zylinder in einer Sammelschienenklemme

7. Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

- Die Probleme der Klemmen und der Bedarf an nachstellfähigen Klemmen über 35 mm² Leiterquerschnitt und 125 A Stromtragfähigkeit wurden ermittelt
- Durch theoretische Grundlagen und Voruntersuchungen konnten wichtige Kriterien festgelegt werden
- Die Vorzugslösung wurde ausgewählt und auf Kriterien wie die Vorspannkraft, den Luftspalt und die zyklische Nachstellfähigkeit hin untersucht
- Es konnte ein funktionierender Prototyp auf Basis von FGL hergestellt und der Nachweis der Nachstellfähigkeit erbracht werden
- Die Variante „Schraube mit FGL-Zylinder“ wertet die herkömmliche Schraubklemme um eine Nachstellfähigkeit auf
- Die Zusatzkosten liegen im einstelligen Prozentbereich

7. Zusammenfassung und Ausblick

Ausblick

- Der Prozess zum Einfügen eines vorgestauchten FGL-Zylinders in die Bohrung der Schraube sollte untersucht werden.
- Eine Optimierung des Durchmessers der Formgedächtnislegierung in Bezug auf die Abmessungen der Schraube ist für eine Effizienzsteigerung notwendig.
- Es wäre Funktionsnachweis in Klemmen bei höheren Strömen und größeren Leiterquerschnitten sinnvoll.
- Die stationär verbleibende Kraft und Anzahl der Nachstellzyklen gilt es durch geeignete Materialwahl und Werkstoffbehandlung optimieren.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.



Philipp Zimmermann
Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik
Nöthnitzer Straße 44, 01187 Dresden
Tel.: 0351 4772-2123
E-Mail: philipp.zimmermann@iwu.fraunhofer.de