

Simulation von Vibrationsbelastungen an Steckverbinder- Leitungssystemen

Jian Song
Roman Probst

28.01.2025

Agenda

1. Motivation
2. Einfluss unterschiedlicher Bewegungsformen auf Steckverbinder (StRobA)
3. Simulation von Vibrationsbelastungen an Steckverbinder-Leitungssystemen (ViSVib)
4. Zusammenfassung und Ausblick

Motivation

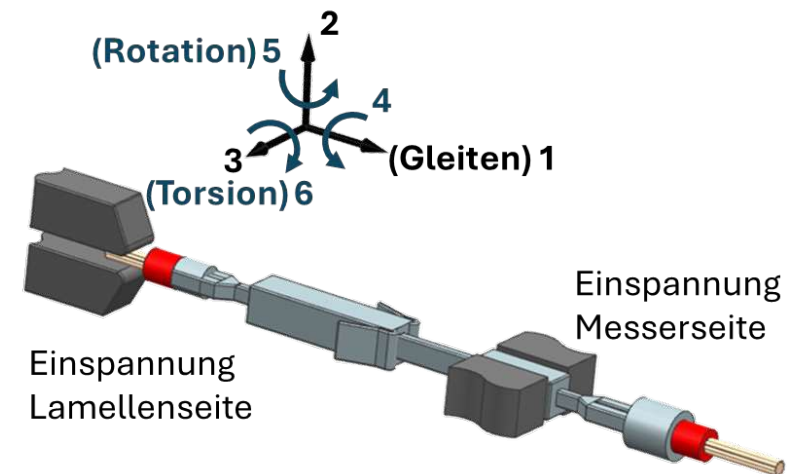
- Reibkorrosion ist eine der Hauptursachen eines Ausfalls von Steckverbinder.
- Mikrobewegungen in Steckverbinder können zu Verschleiß, Durchrieb, Ermüdung bzw. Delamination der Oberflächenschutzschicht führen. Alle diese Degradationsmechanismen können potentiell Reibkorrosion verursachen
- Mikrobewegungen werden häufig ausgelöst durch Vibrationen von Fahrzeug, Maschine, etc. und u. a. über die angeschlossene Leitung in Steckverbinder eingetragen
- Eine Möglichkeit der Verringerung der Mikrobewegung liegt in der Beruhigung der angeschlossenen Leitung
- Hierfür gibt es jedoch keine genauen Vorschriften

Ist-Zustand

- Technischen Leitfaden (TLF) 0214 des Zentralverbands Elektrotechnik- und Elektronikindustrie (ZVEI) oder LV 214
- In Prüfgruppe (PG) 16 Reibkorrosion ist keine Richtung der Relativbewegung vorgeschrieben. Die Prüfung wird jedoch lediglich in der Steckrichtung durchgeführt
- PG 17 Dynamische Beanspruchung gibt für Prüfungen mittels Shaker 3 Schwingungsrichtungen vor

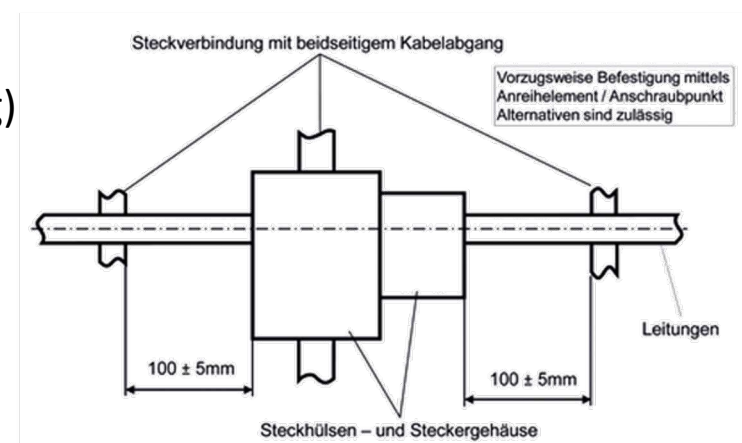
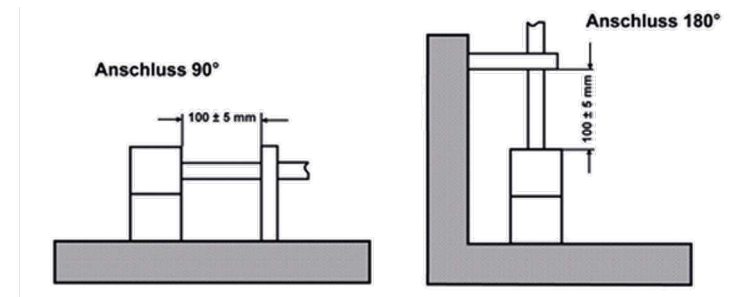
Prüfungsvorschriften – Reibkorrosionsprüfung

- In PG 16 Reibkorrosion: lediglich in der Steckrichtung durchgeführt
- Zwei weitere Varianten sollen hinzukommen:
 - Relativbewegung in Richtung 1 / Achse X (Gleiten)
 - Drehung um die Achse 2 / Y (Rotation)
 - Drehung um die Achse 3 / Z (Torsion)



Prüfungsvorschriften – Vibrationsprüfung

- Angeschlossene Leitung wird nach PG 17 immer gerade vom Steckergehäuse herausgeführt
- Abfangen der Leitung nach ca. 100 mm ab dem Steckergehäuse
- In der Praxis kommen unterschiedliche Verlegungsarten der angeschlossenen Leitung vor (bspw. gewinkelte Leitungsverlegung)
- Weitere Varianten von Leitungsverlegung sollen hinzukommen



Unterschiedliche Schwingungsrichtungen bei der dynamischen Prüfung (Quelle: TLF 0214)

Herausforderungen - Aufgaben

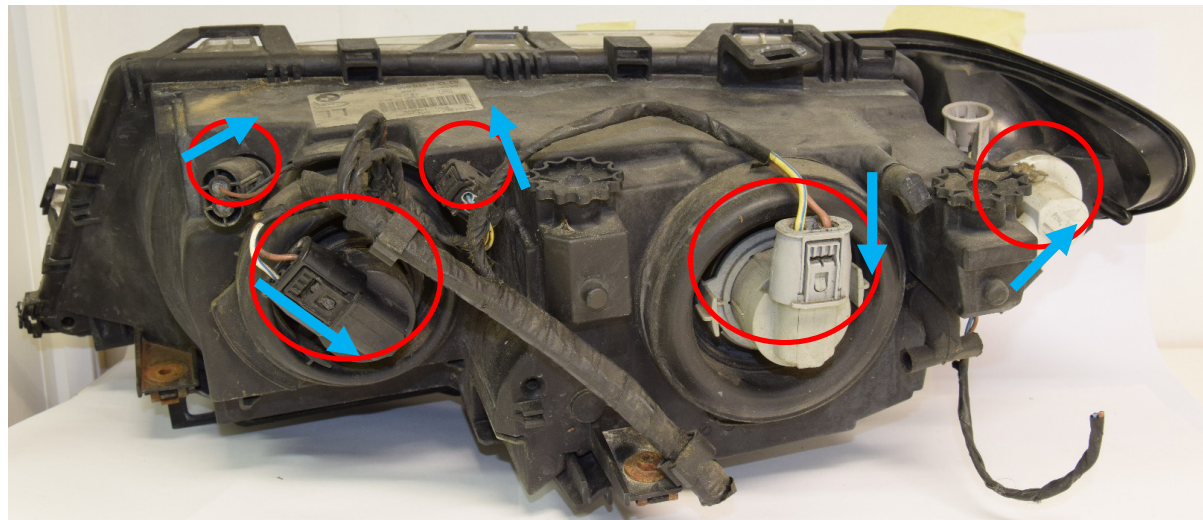
- Angesichts der Vielzahl möglicher Kombinationen dieser Parameter wäre eine Laborprüfung jeder einzelnen Variante jedoch äußerst zeit- und kostenintensiv
- Eine Simulationsumgebung für die virtuelle Bewertung der konstruktiven Auslegung von Steckverbinder-Leitungssystemen wünschenswert
- Daraus sind folgende Fragestellung abgeleitet:
 - **Einfluss der Bewegungsformen auf die elektrischen Steckverbinder**
 - Forschungsprojekt zum Einfluss von unterschiedlichen Bewegungsformen auf Steckverbinder (StRobA)
 - Darauf aufbauend weiteres Forschungsprojekt zur virtuellen Simulation von Vibrationsbelastungen an Steckverbinder-Leitungssystemen (ViSVib)

Agenda

1. Motivation
- 2. Einfluss unterschiedlicher Bewegungsformen auf Steckverbinder (StRobA)**
3. Simulation von Vibrationsbelastungen an Steckverbinder-Leitungssystemen (ViSVib)
4. Zusammenfassung und Ausblick

Einfluss unterschiedlicher Bewegungsformen auf Steckverbinder

- Diverse Steckverbinder können an einem Bauteil angebracht sein
- Dabei sind verschiedene Einbaulagen möglich
- Somit können unterschiedliche Belastungsrichtung und unterschiedliche Belastungsstärke auftreten
 - Welchen Einfluss hat dies auf die Steckverbinder?

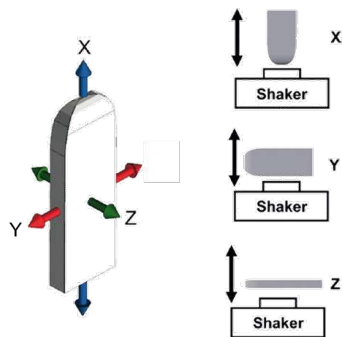


Steckverbinder in unterschiedlichen Einbaulagen

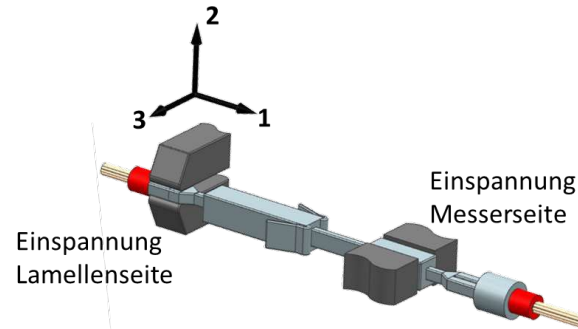
Roter Kreis = Steckverbinder
Blauer Pfeil = Einbaulage

Prüfungen in unterschiedlichen Bewegungsrichtungen

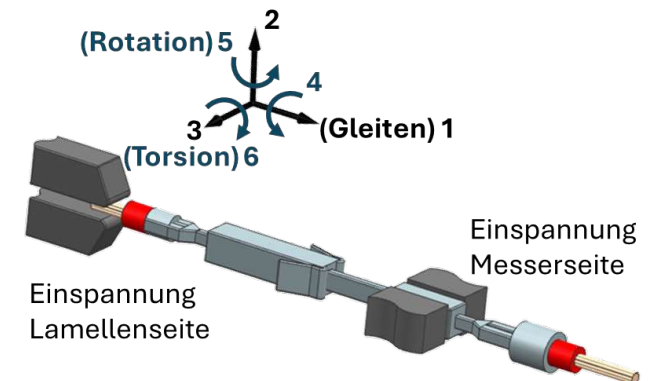
- Überlagerung der Mikrobewegungen bei Vibration durch nicht eindeutig definierte Anregung
- Anregung bei Reibverschleiß- und Reibkorrosionsprüfungen sehr gezielt bzw. erzwungen
- Differenzierung der Anregungsrichtungen zwischen Vibrations- und Reibverschleißprüfungen
 - Richtungen bei Vibration nach TLF 0214
 - Richtungen bei Reibverschleiß und Reibkorrosion wie folgt:



Anregungsrichtungen während der Vibrationstests



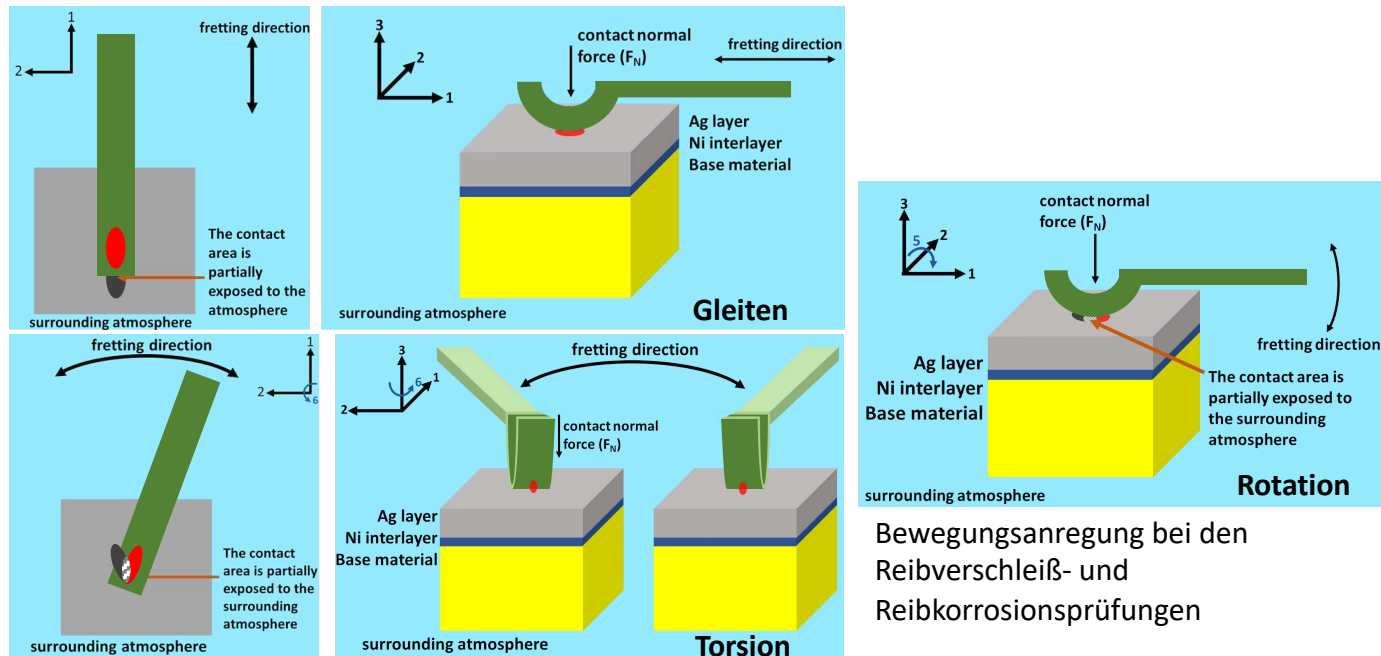
Einspannung der Richtung 1



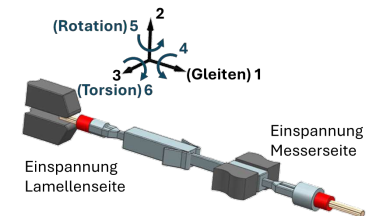
Einspannung der Richtungen 5 und 6

Bewegungen in Steckverbinder

- Die Bewegung orthogonal zu Steckrichtung dazu ist kein reines Gleiten, sondern auch rotatorisch
- Bewegung quer zur Steckrichtung durch Drehung um die Achse 3 als Torsion
- Bewegung senkrecht dazu als Rotation durch Drehung um Achse 2

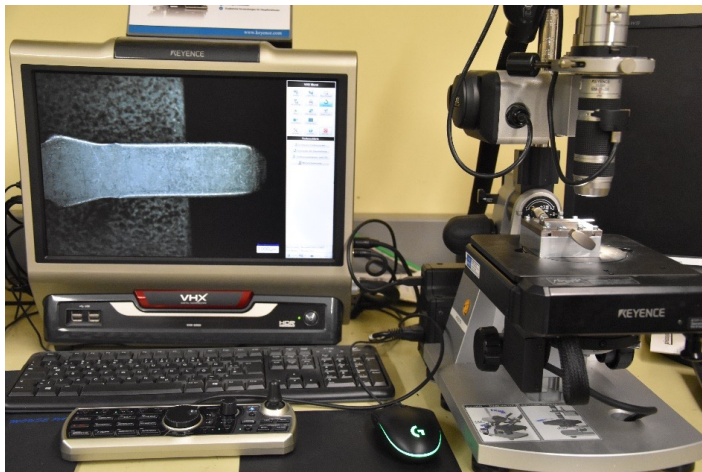


Bewegungsanregung bei den
Reibverschleiß- und
Reibkorrosionsprüfungen

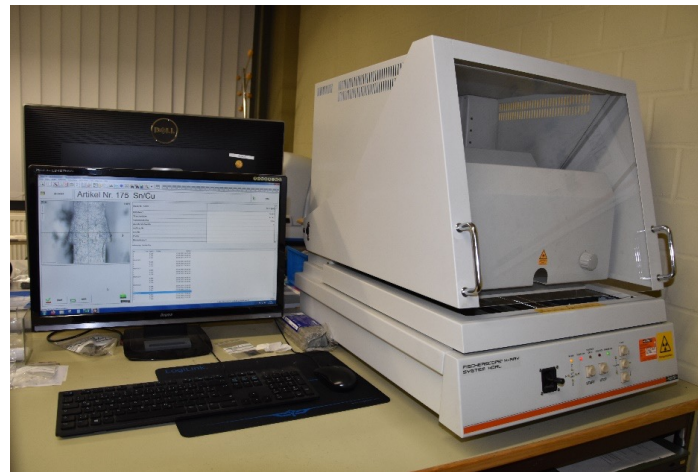


Analytik

- Systematische Ermittlung der Verschleißstärke
 - Optische Beurteilung des Verschleißes
 - Restschichtdickenmessung und Materialzusammensetzung bzw. Oxidanteile
 - Ermittlung der Verschleißtiefe und des Verschleißprofils mittels Konfokalmikroskopie und Laserscanningmikroskop



Digitales Lichtmikroskop



Röntgenfluoreszenz-Messgerät



Rasterelektronenmikroskop

Korrelation zwischen Bewegungsarten / Richtungen und Verschleiß

- Bei Reibverschleißprüfungen größte Abnahme der Schichtdicke bei Gleiten
- Größter Verschleiß der Beschichtung bei Vibration in Z-Richtung

Mittlere verbleibende Restschichtdicke bei **Reibverschleißprüfungen** von Ag-Kontakten nach 100.000 Zyklen

Reibverschleißprüfung 100.000 Zyklen	Schichtdickenmessung Reibverschleißprüfung			
	Gleiten	Rotation	Torsion	Neuteil
	Ag [μm]			
Mittelwert	1,49	5,11	4,21	5,53
Standardabweichung	0,44	0,55	1,54	0,16
Minimalwert	1,07	3,91	1,99	5,30

Mittlere verbleibende Restschichtdicke bei **Vibrationsprüfungen** von Ag-Kontakten nach 22 h Belastungsdauer

Belastungsdauer 22 h	Schichtdickenmessung Vibrationsprüfung			
	X-Richtung	Y-Richtung	Z-Richtung	Neuteil
	Ag [μm]			
Mittelwert	5,45	5,41	3,70	5,53
Standardabweichung	0,23	0,29	1,27	0,16
Minimalwert	5,23	5,15	2,33	5,30

Agenda

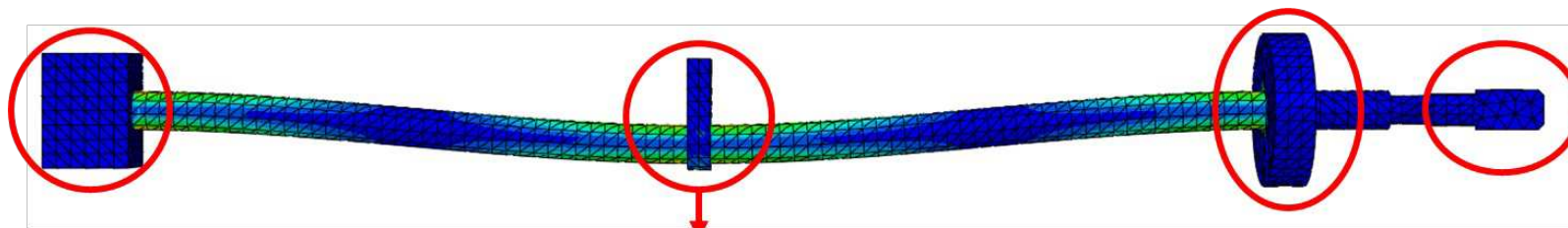
1. Motivation
2. Einfluss unterschiedlicher Bewegungsformen auf Steckverbinder (StRobA)
- 3. Simulation von Vibrationsbelastungen an Steckverbinder-Leitungssystemen (ViSVib)**
4. Zusammenfassung und Ausblick

Simulation von Vibrationsbelastungen an Steckverbinder-Leitungssystemen

- Entwicklung einer virtuellen Simulationsumgebung zur Auslegung und Bewertung von Steckverbinder-Leitungssystemen
- Durchführung in Kooperation mit dem Fraunhofer LBF in Darmstadt
- Hauptaugenmerk liegt auf der Mikrobewegung von elektrischen Steckverbindern (TH OWL) verursacht durch Leitervibration (Fraunhofer LBF) inklusive experimenteller Validierung der Simulationen
- Qualitative und quantitative Bewertung der Mikrobewegungen im Steckverbinder verursacht durch die Leitungsvibration

Simulationsmodell - Modellvalidierung

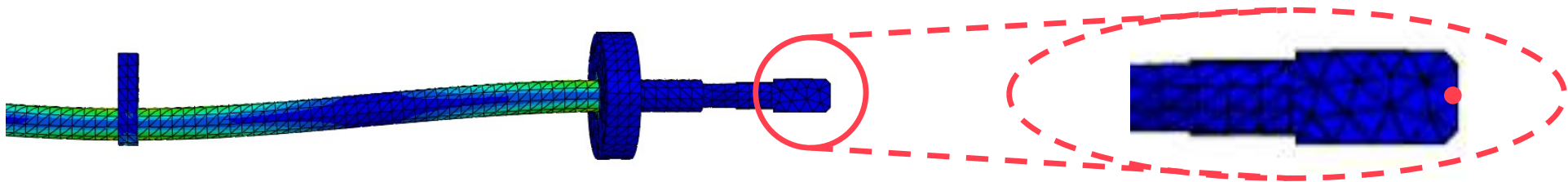
- Vorangegangene Studie zeigt, dass Vibration senkrecht zur Steckrichtung kritischer ist
- Bei einachsiger Verschiebung jedoch Steckrichtung mit größtem Verschleiß
- Simulationsmodell mit fixiertem Leitungsende (links) und Auslenkung in der Mitte der Leitung
- Kontakt (rechts) kann sich translatorisch frei bewegen, Torsionsbewegung eingeschränkt
- Untersuchung der Korrelation zwischen Leitungsbewegung und Mikrobewegung des Kontakts



Ausgelenktes Simulationsmodell des Steckverbinder-Leitungssystems

FEM-Analyse

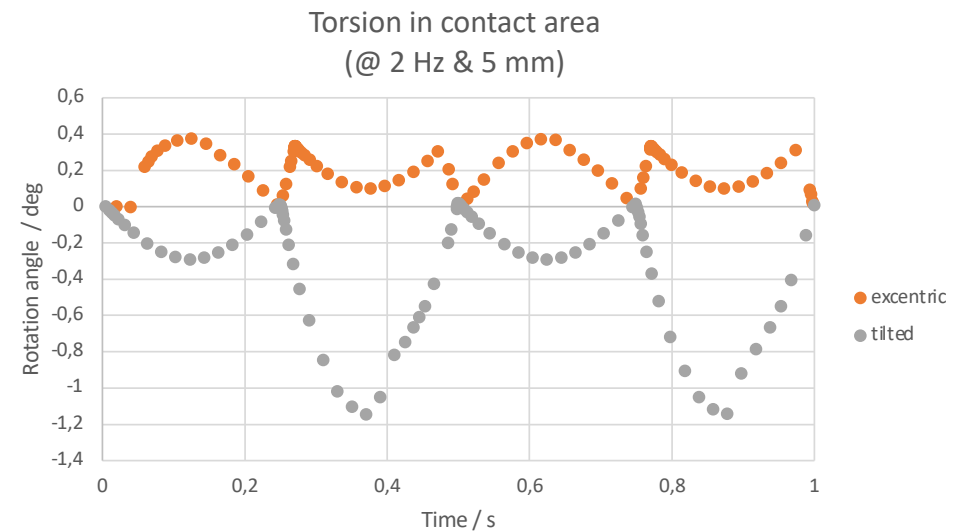
- Knoten am rechten Ende des Kontakts als Output der Simulation
- Anhand dieses Knotens wird die Bewegung in Steckrichtung analysiert
- Leitungsauslenkung von ± 5 mm resultiert in einer Spitze-Spitze-Bewegung des Kontakts von $296 \mu\text{m}$



Simulationsmodell mit dem markierten Knoten für das Simulationsergebnis

Simulationsergebnisse - Torsion bei unterschiedlichen Randbedingungen

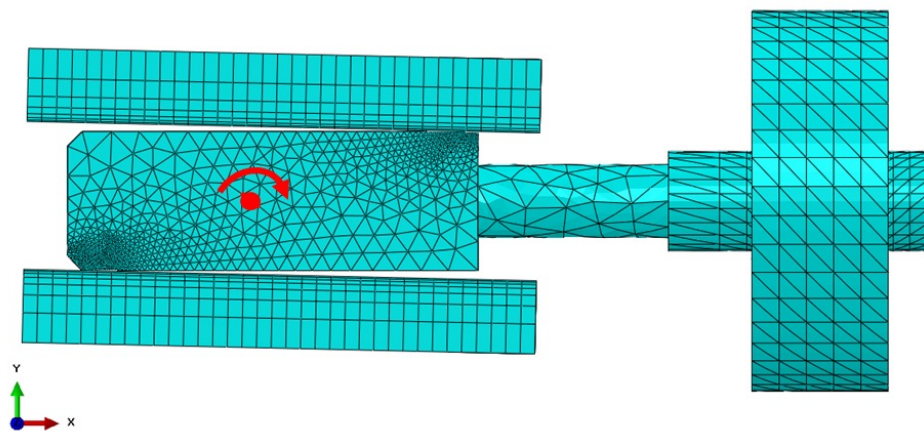
- Übersicht der Simulationsergebnisse der Torsionsbewegung bei unterschiedlichen Anfangsbedingungen
- Größte Torsion bei verkippter Anfangsbedingung von etwa $1,2^\circ$ innerhalb eines Zyklus



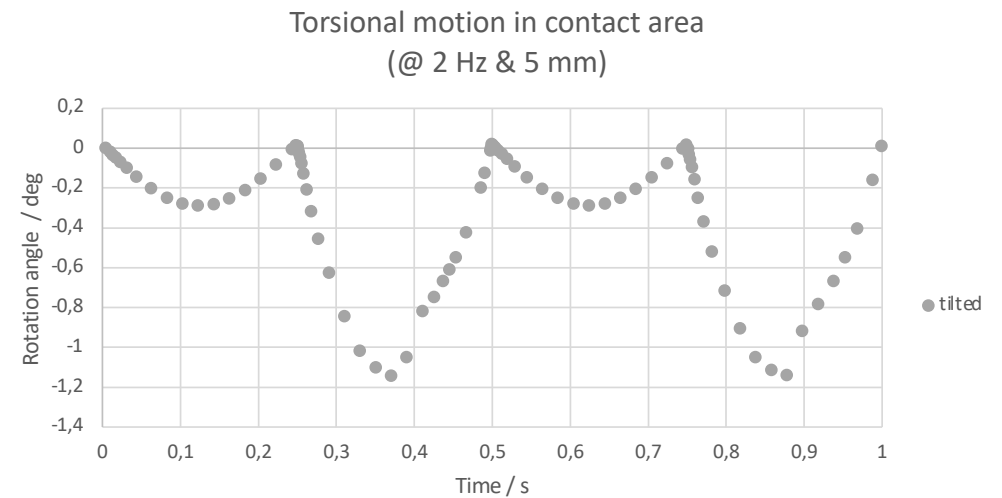
Darstellung der translatorischen Bewegung des Kontakts bei einer Leitungsauslenkung von 5 mm bei einer Frequenz von 2 Hz

Simulationsergebnisse - Torsion

- Simulation mit verkippter Anfangsbedingung des Kontakts bei einer Leitungsauslenkung von 5 mm und einer Auslenkungsfrequenz von 2 Hz
- Maximale Rotation von etwa $1,2^\circ$



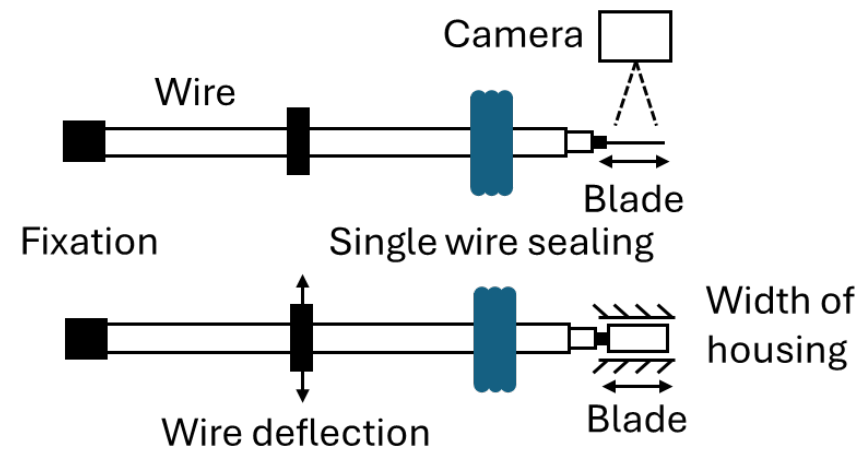
Simulationsmodell mit dem markierten Bereich für die Auswertung der Torsionsbewegung bei exzentrischer Anfangsbedingung



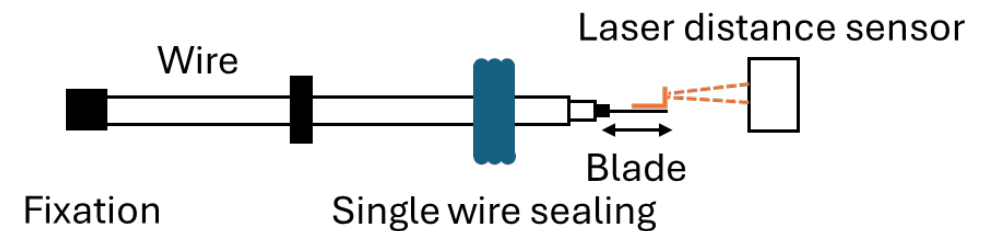
Torsion des markierten Bereichs

Laborvalidierung

- Analyse der Bewegung findet auf zwei unterschiedliche Arten statt
 - Hochgeschwindigkeitskamera senkrecht oberhalb des Kontakts
 - Laserabstandssensor; wird von der Stirnfläche des Kontakts reflektiert



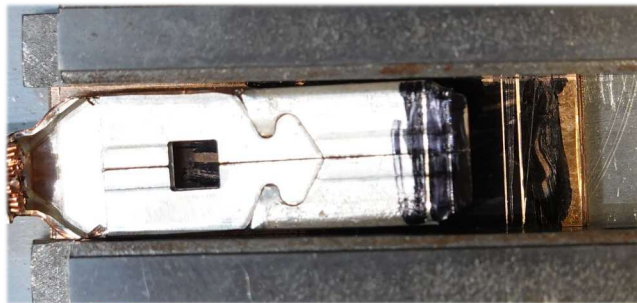
Schematische Abbildung des Versuchsaufbaus für die Kameraauswertung



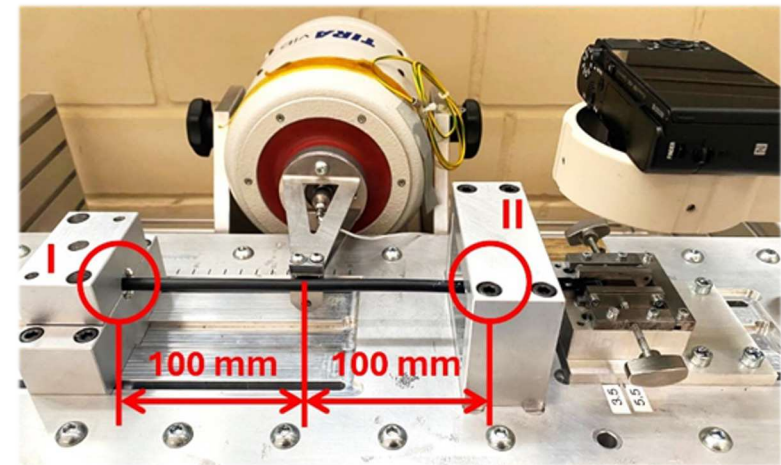
Schematische Abbildung des Versuchsaufbaus für die Lasermessung

Versuchsaufbau

- Laborversuche zur Validierung des Simulationsmodells
- Leitung am linken Ende fixiert (I), Einspannung der Einzelleiterabdichtung (ELA) auf der rechten Seite (II)
- Definierter Abstand zwischen zwei Spannbacken, um Gehäuseinnenmaß nachzubilden
 - Translatorische Bewegung weiterhin möglich
 - Torsionsbewegung deutlich eingeschränkt



Präparation des Messers zur Einschränkung der Torsionsbewegung

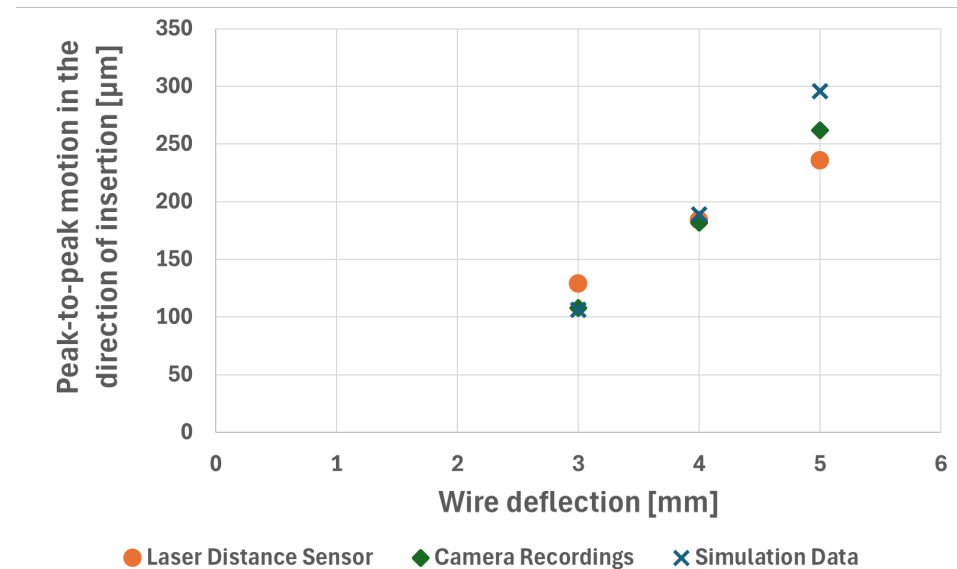


Versuchsaufbau des Mini-Shakers für die Leitungsauslenkung

Vergleich der Ergebnisse aus Simulation und Laborversuch

- Darstellung der Ergebnisse für die drei Untersuchungsmethoden und unterschiedlichen Leitungsauslenkungen
- Beider Validierungsmethoden zeigen nur geringe Abweichungen vom Simulationsergebnis

Mittlere Kontaktbewegung für unterschiedliche Leitungsauslenkungen			
Leitungsauslenkung	Simulation	Kameraauswertung	Laserabstandssensor
± 5 mm	296 µm	-11 %	-20 %
± 4 mm	189 µm	-4 %	-3 %
± 3 mm	107 µm	+1 %	+21 %



Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Validierungsversuchen

Fazit der Ergebnisse

- Daten der Mikrobewegungen aus der Steckverbinder-Leitungssystem-Simulation
 - Daten aus Reibverschleiß- und Reibkorrosionsprüfungen
 - Rechenmodelle für Reibverschleiß und Reibkorrosion
- Virtuelle Ermittlung der resultierenden Beschädigung für jedes Steckverbinder-Leitungssystem unter einer gegebenen Belastung

Agenda

1. Motivation
2. Einfluss unterschiedlicher Bewegungsformen auf Steckverbinder (StRobA)
3. Simulation von Vibrationsbelastungen an Steckverbinder-Leitungssystemen (ViSVib)
- 4. Zusammenfassung und Ausblick**

Zusammenfassung - Reibverschleiß, Reibkorrosion und Vibration

- Erkenntnisse aus den Tests zu Reibverschleiß bzw. Reibkorrosion:
 - Translatorische Gleitbewegung in Steckrichtung am kritischsten
 - Verschleiß bei Rotation und Torsion sichtbar, allerdings deutlich weniger ausgeprägt
- Erkenntnisse aus den Vibrationsprüfungen:
 - Verschleißbilder bei Prüfung in Y- und Z-Richtung (orthogonal zu Steckrichtung) zeigen stärkeren Verschleiß
 - Belastung in X-Richtung (Steckrichtung) weniger kritisch
- Die Bewegungsarten können durch das Zusammenspiel zwischen Verlauf der Leitung und der Richtung der Vibration bestimmt werden
- Leitfaden als Empfehlung für die Einbaurichtung elektrischer Steckverbinder

Zusammenfassung - Steckverbinder-Leitungssystem-Simulation

- Simulation der Leitungsbewegung an vereinfachtem Modell zur Ermittlung der Relativbewegung
- Simulationsmodell durch Laborversuche validiert
- Reibverschleiß-Reibkorrosionsversuche mit verschiedenen Bewegungsamplituden durchgeführt

Ausblick

- Leitungssimulation auf weitere Leitungsverlegungsarten ausweiten
- Unterschiedliche Richtungen der Leitungsvibration berücksichtigen
- Validierung der Simulationsmodelle durch Ergebnisse aus Vibrationsprüfungen von Steckverbinder-Leitungssystemen
- Vervollständigung der Daten aus Reibverschleiß- und Reibkorrosionsprüfungen
- Erweiterung der Rechenmodelle auf alle Bewegungsarten

5. Trendausblick: Technologische Ansätze und Technologische Trends

Danke für Ihre Aufmerksamkeit!

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

28.01.2025
