

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das IGF-Vorhaben 16217 BR der Forschungsvereinigung Forschungsgesellschaft Stahlverformung e.V. wurde über die AiF im Rahmen des 'Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF)' vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Die Langfassung des Abschlussberichtes kann bei der FSV, Goldene Pforte 1, 58093 Hagen, angefordert werden.

Abschlusszusammenfassung

Projektnummer: IGF 16217BR
Projekttitel: Funktions- und fertigungsrelevante Kennwerte von Federstahldraht und Federband (Federstahldraht- und Federbandkennwerte)
Laufzeit: 01.09.2009 – 31.08.2011
Gesamtmittel: 408.550,00€
Forschungsstelle: TU Ilmenau, Fakultät Maschinenbau
Fachgebiet Rechneranwendung im Maschinenbau, Prof. Dr.-Ing. habil. M. Weiß
Fachgebiet Maschinenelemente, Prof. Dr.-Ing. Ulf Kletzin
Max-Planck-Ring 12 (Haus F)
98693 Ilmenau
Projektleiter: Dr.-Ing. Veronika Geinitz Tel.: 03677-69 1855
Sekretariat: Tel.: 03677-69 2478 Fax: 03677-69 1823

Problemstellung

Materialkennwerte von Federstahldrähten und –bändern sind in der Literatur schwer zu finden. Das trifft insbesondere auf Torsions- und Biegekennwerte zu. Noch seltener sind Aussagen zur Veränderung dieser Kennwerte durch die Arbeitsgänge der Federherstellung wie Wärmebehandlung, Kugelstrahlen mit nachfolgender Wärmebehandlung und Vorsetzen. Diese Kennwerte werden jedoch benötigt für die Dimensionierung von Federn, für das Festlegen von Fertigungsprozessparametern und für die Optimierung von Federn und deren Herstellung. Insbesondere die Hersteller von Federn für die Automobilindustrie und den Maschinenbau stellen immer höhere Anforderungen an die eingesetzten Federn, die genauere Kenntnisse des Materials erfordern.

Zur Ermittlung von Torsionskennwerten fehlte für Drähte mit $d > 4,5$ mm ein entsprechender Torsionsversuchsstand. Zur Auswertung von Biegekennlinien fehlten die theoretischen Grundlagen bei großen Verformungen und vorgekrümmten Proben.

Ziele

- die Zug- und Torsionseigenschaften an Drähten mit $4,5 \leq d \leq 10$ mm bestimmen (Parameter: d , Material, Wärmebehandlung, Vorsetzen),
- das Relaxationsverhalten an Drähten unter Torsionsbelastung bestimmen und mit der Relaxation an Druckfedern aus diesen Drähten vergleichen (Parameter: d , Material, Wärmebehandlung, Vorsetzen, Kugelstrahlen),
- die Auswirkungen des Kugelstrahlens mit nachfolgender Wärmebehandlung auf die Zug- und Torsionseigenschaften bei ölschlussvergüteten Drähten bestimmen,
- das Biegeverhalten an Drähten untersuchen (Parameter: d , Material, Wärmebehandlung)
- das Zug- und Biegeverhalten an Bändern untersuchen (Parameter: Banddicke, Wärmebehandlung, Festigkeit, Probe längs/quer zur Walzrichtung),
- eine Datenbank mit den Federdraht- und -bandkennlinien und -kennwerten bei Zug-, Torsions- und Biegebeanspruchung erstellen, die über das Internet abrufbar ist,
- die Berechnungsgrundlagen zur Dimensionierung von Federn so weiter entwickeln, dass das nichtlinear-elastische Werkstoffverhalten von Federstahldraht und dessen Veränderungen während der Federherstellung berücksichtigt werden kann,
- die theoretischen Grundlagen zur Auswertung von Biegeversuchen zur Bestimmung des E-Moduls an vorgekrümmten Drähten und zur Bestimmung der Federbiegegrenze unter Verwendung der nichtlinearen Biegetheorie entwickeln.

Vorgehensweise

1. Bereitstellen der Federstahldrähte und –bänder, Festlegen materialspezifischer Parameter für die Wärmebehandlung, das Vorsetzen und Kugelstrahlen und Definition weiterer Versuchsparameter
2. Inbetriebnahme und Anpassung der Versuchstechnik
3. Weiterentwicklung der Datenbank für die Berücksichtigung der Ergebnisse an Federstahlbändern sowie der Kugelstrahlbehandlung und der Relaxation von Federstahldrähten
4. Durchführen und Auswerten von Zug- und Torsionsversuchen an Federstahldrähten mit $d = 6 / 8 / 10$ mm aus verschiedenen Materialien mit verschiedenen Bearbeitungszuständen
5. Durchführen und Auswerten von Zug- und Torsionsversuchen an kugelgestrahlten ölschlussvergüteten Federstahldrähten mit verschiedenen Bearbeitungszuständen
6. Ermittlung der Relaxation unter Torsionsbeanspruchung an Federstahldraht unterschiedlicher

- Durchmesser aus verschiedenen Materialien mit verschiedenen Bearbeitungszuständen
7. Herstellen von Federn aus ausgewählten Versuchsdrähten mit Variation der Prozessparameter zwecks Überprüfung der Ergebnisse aus den Materialuntersuchungen und Bestimmen der statischen Federkennwerte (Federkennlinie, Relaxation)
 8. Exemplarische Zug- und Biegeversuche an Federbändern und Federstahldrähten, Überprüfung der Ergebnisse der nichtlinearen Biegetheorie durch Biegeversuche
 9. Herstellen von exemplarischen Biegeteilen und Bestimmen der Geometrie- und Funktionsparameter
 10. Entwickeln analytischer Berechnungsmodelle für Federn unter Berücksichtigung des nichtlinear-elastischen Werkstoffverhaltens von Federstahl und seiner Veränderungen während der Federherstellung sowie deren Überprüfung anhand danach gefertigter Federn
 11. Zusammenfassung der Ergebnisse in einem Abschlussbericht, Vorbereiten der Ergebnispräsentation im Projektausschuss und vor den Mitgliedsfirmen des Verbandes der Deutschen Federindustrie.

Ergebnisse

Erwärmungskurven für die Drähte:

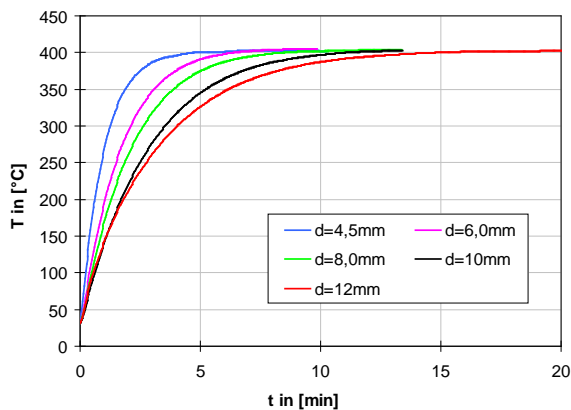


Bild 1: Erwärmungskurven für Drähte mit $4,5 \text{ mm} \leq d \leq 12 \text{ mm}$ auf 400°C

Um die Parameter der Wärmebehandlungen an Drähten mit $4,5 \text{ mm} \leq d \leq 12 \text{ mm}$ sinnvoll festlegen zu können, wurde zunächst die Zeitdauer ermittelt, die notwendig ist, um die Drähte vollständig zu durchwärmen. Bild 1 zeigt die Erwärmung der verschieden dicken Drähte im Umluftkammerofen auf 400°C . Bei der Anwendung dieser Erwärmungskurven auf die in den Firmen zum Einsatz kommenden Ofentechnik müssen die Verhältnisse im jeweils verwendeten Ofen berücksichtigt werden (Anströmbedingungen, Wärmeübertragungsmedium, Füllgrad,...).

Zug-, Torsions- und Biegeversuche an Drähten:

Die Änderungen der **Zug**versuchskennwerte der ölschlussvergüteten Drähte mit $d = 6 / 8 / 10 \text{ mm}$ durch die Wärmebehandlung sind deutlich geringer als bei den Drähten mit kleinerem Drahtdurchmesser. Der E-Modul ist unabhängig von der Wärmebehandlungstemperatur. Die Gleichmaßdehnung A_g fällt vom unbehandelten zum mit $T_A = 300^\circ\text{C}$ wärmebehandelten Draht leicht ab und steigt ab $T_A = 350^\circ\text{C}$ wieder an. Die Zugfestigkeit R_m der patentiert gezogenen Drähte steigt bei mit einer Wärmebehandlungstemperatur T_A von 200°C behandelten Drähten um bis zu 150 MPa im Vergleich zum nicht wärmebehandelten Draht an und fällt ab da wieder ab. Die Zugdehngrenze $R_{p0,2}$ (Bild 2) steigt vom unbehandelten Draht bis bei $T_A = 200^\circ\text{C}$ wärmebehandelten Draht deutlich um bis zu 400 N/mm^2 und fällt bei größeren Temperaturen wieder deutlich ab. Der E-Modul steigt vom unbehandelten zum bei $T_A = 200^\circ\text{C}$ und höherer Temperatur wärmebehandelten Draht um bis zu 15 kN/mm^2 an.

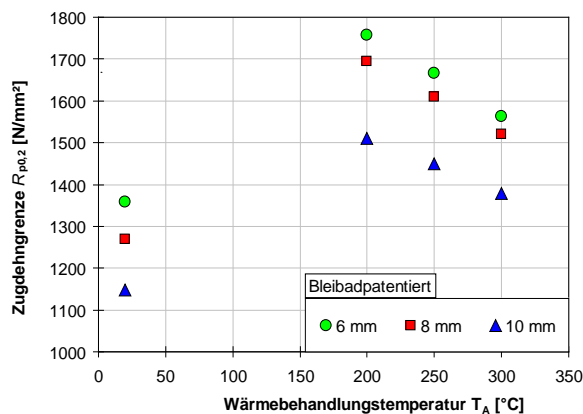


Bild 2: Zugdehngrenze $R_{p0,2}$ in Abhängigkeit von der Wärmehandlungstemperatur für $d = 6 / 8 / 10 \text{ mm}$, patentiert gezogene Drähte

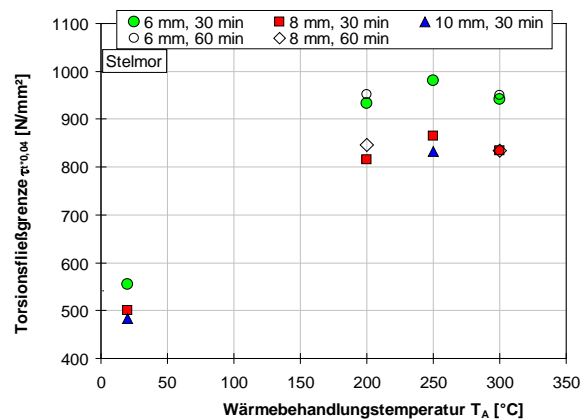


Bild 3: Torsionsfließgrenze $\tau_{0,04}$ in Abhängigkeit von der Wärmehandlungstemperatur und -dauer für $d = 6 / 8 / 10 \text{ mm}$, patentiert gezogene Drähte

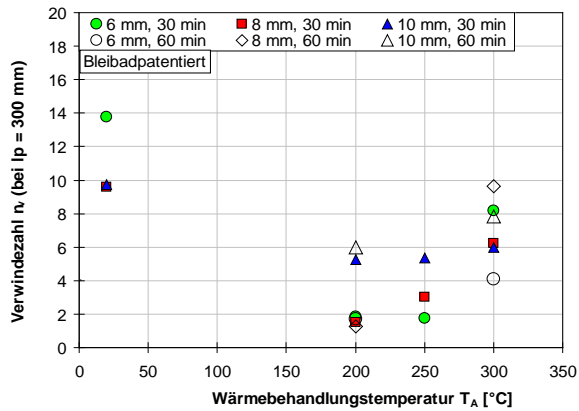


Bild 4: Verwindeszahl n_v (bezogen auf 300mm Drahtlänge) in Abhängigkeit von Temperatur und Dauer der Wärmebehandlung für $d = 6 / 8 / 10$ mm, patentiert gezogene Drähte

Durch die unterschiedlichen Wärmebehandlungen haben sich die **Torsionsfestigkeits-** und **-verformungskennwerte** bei den ölschlussvergüteten Drähten im erwarteten Umfang wenig geändert. Bei den patentiert gezogenen Drähten erhöht sich die Torsionsfließgrenze (Bild 3) durch eine Wärmebehandlung im Vergleich zum unbehandelten Draht um ca. 300 N/mm² bis 400 N/mm² sehr deutlich. Die G-Moduln steigen von 80 kN/mm² am unbehandelten Draht auf 82...83 kN/mm² am wärmebehandelten Draht an. Bei den bleibadpatentierten Drähten mit $d = 6$ mm und $d = 8$ mm verringert sich nach einer Wärmebehandlung von 200°C bis 250°C die Verwindeszahl (Bild 4) massiv. Diese Drähte brechen nicht mehr senkrecht zur Drahtachse, sondern mit langezogenen, zur Drahtachse stückweise parallelen Bruchflächen. Die Stelmor-Drähte sind alle regulär senkrecht zur Drahtachse gebrochen.

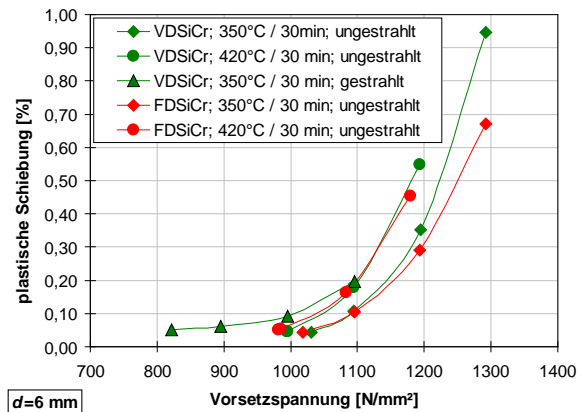
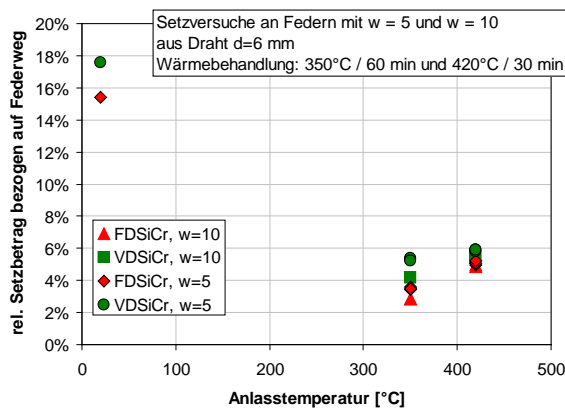


Bild 5: Relativer Setzbetrag von Federn (links) und plastische Schiebung als Funktion der Belastungsspannung (Vorsetzspannung) (rechts) in Abhängigkeit von der Temperatur der Wärmebehandlung und dem Drahtmaterial für $d = 6$ mm, ölschlussvergütete Drähte

An allen ölschlussvergüteten und patentiert-gezogenen Drähten wurden nach verschiedenen Wärmebehandlungen Torsionsversuche mit Be- und Entlasten durchgeführt. Der Vergleich der viereckigen Symbole mit den runden Symbolen im Bild 5-rechts z.B. bei einer Spannung von 1200 N/mm² zeigt, dass der 350°C / 30 min wärmebehandelte Draht eine geringere plastische Schiebung aufweist als der bei höherer Temperatur wärmebehandelte Draht. Die ebenso wärmebehandelten Federn lassen deshalb einen geringeren Setzbetrag erwarten als die bei 420°C / 30 min wärmebehandelten. Bild 5 links bestätigt genau diese Annahme. Weiterhin haben auch die Federn aus dem FDSiCr-Draht einen geringeren Setzbetrag beim Vorsetzen als die Federn aus dem VDSiCr-Draht (Bild 5) (nicht verallgemeinerbar!).

Auswirkungen des Kugelstrahlens:

Die Untersuchungen wurden zunächst am Draht VDSiCr, $d = 4,5$ mm durchgeführt. Für die Zug- und Torsionsversuche bis Bruch wurde der Draht wie folgt präpariert:

- Anlieferungszustand [A]
- Wärmebehandelt 350°C / 30 min [B]
- Wärmebehandelt 350°C / 30 min, kugelgestrahlt [C]
- Wärmebehandelt 350°C / 30 min, vortordiert bis $\tau_t = 1200$ N/mm², kugelgestrahlt [D]
- Wärmebehandelt 350°C / 30 min, kugelgestrahlt, wärmebehandelt 240°C / 30 min [E]
- Wärmebehandelt 350°C / 30 min, vortordiert $\tau_t = 1200$ N/mm², kugelgestrahlt, wärmebehandelt 240°C / 30 min [F]
- Wärmebehandelt 350°C / 30 min, kugelgestrahlt, vortordiert $\tau_t = 1200$ N/mm², [G]

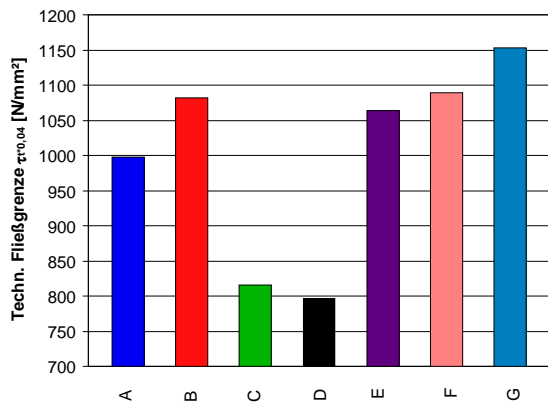


Bild 6: Torsionsfließgrenze nach verschiedenen Bearbeitungsschritten

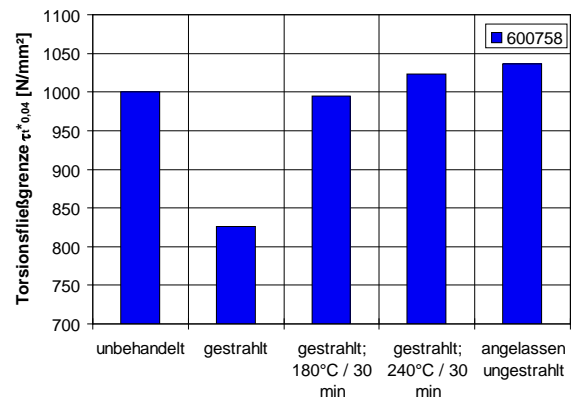


Bild 7: Torsionsfließgrenze an kugelgestrahlten Drähten unterschiedlich wärmebehandelt

Die Bruchfestigkeitswerte R_m bzw. $\tau_{t,max}^*$ verändern sich trotz der unterschiedlichen Fertigungszustände A-G nahezu nicht. Die Zugdehnung $R_{p0,2}$ verändert sich durch die Drahtvorbehandlungen um ca. 50 N/mm². Die deutlichsten Änderungen sind bei der Torsionsfließgrenze (Bild 6) zu verzeichnen. Durch die erste Wärmebehandlung wird $\tau_{t0,04}^*$ leicht erhöht. Das Kugelstrahlen führt zu einer deutlichen Verringerung von $\tau_{t0,04}^*$, die durch eine nachfolgende Wärmebehandlung vollständig aufgehoben wird. In Bild 7 ist zu sehen, dass nach einer Wärmebehandlung von 180°C / 30 min nach dem Kugelstrahlen die Torsionsfließgrenze noch nicht wieder so stark angestiegen ist, wie nach 240°C / 30 min.

Zug- und Biegeversuche an Bändern aus 1.4310

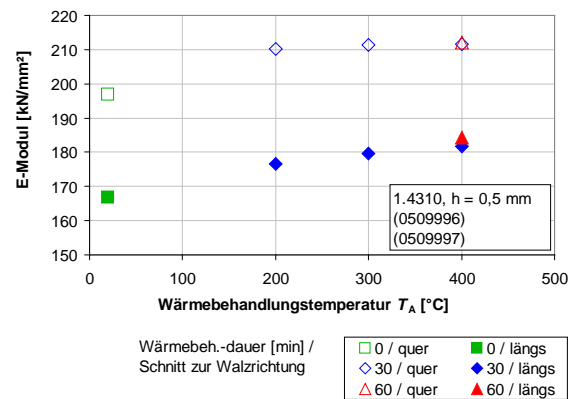
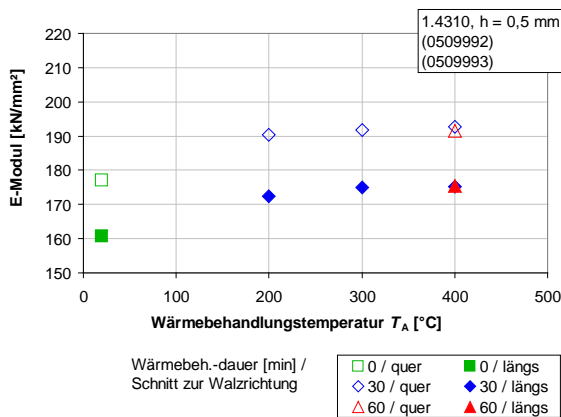


Bild 8: E-Modul in Abhängigkeit von Temperatur und Dauer der Wärmebehandlung sowie vom Schnitt zur Walzrichtung für Band $h = 0,5$ mm: niedrige Festigkeit (links), hohe Festigkeit (rechts)

Bild 8 zeigt den Unterschied im E-Modul an den längs bzw. quer zur Walzrichtung geschnittenen Proben. Die Unterschiede betragen beim Band mit der hohen Festigkeit ca. 15 %, beim Band mit der niedrigen Festigkeit zwischen 4 % und 10 %.

Relaxationsuntersuchungen an Drähten und Druckfedern

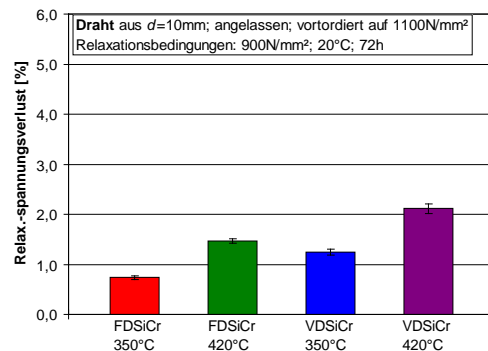
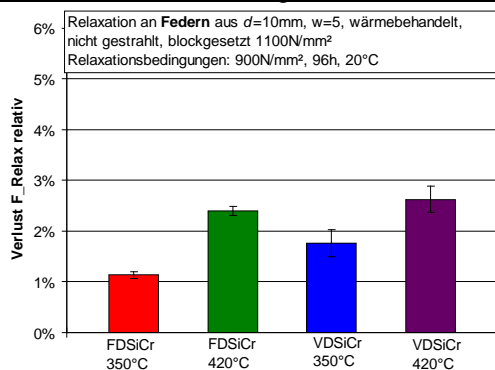


Bild 9: Relaxationsverlust an der Feder (links) und am Draht (rechts) mit $d = 10$ mm

Bild 9 zeigt erstmalig Relaxationsverluste von torsionsbeanspruchten ölschlussvergüteten Drähten in Abhängigkeit von der Wärmebehandlung und dem Drahtmaterial. Die parallel durchgeführten Relaxationsuntersuchungen an Federn zeigen sehr ähnliche Verluste.

Praktischer Nutzen / Wirtschaftlichkeit

- Mit dem Torsionsversuchsstand bis 500 Nm mit Feinschiebungsaufnehmer können erstmals auch an Drähten bis $d = 12$ mm (bzw. bis 500 Nm) die Torsionsfließgrenze, Torsionsdehngrenzen und der G-Modul ermittelt werden. Diese Kenngrößen werden zur Dimensionierung von Federn benötigt, die auf Torsion beansprucht werden. Damit ist eine exaktere Dimensionierung möglich.
- Anhand der Ableitungskurve des Spannungs-Dehnungs-Diagramms aus dem Zugversuch kann überprüft werden, ob die zur Standard-Materialkontrolle verwendete Zugversuchstechnik mit Feindehnungsaufnehmer zur Ermittlung von E-Modul und Fließgrenzen geeignet ist.
- Alle Federn herstellenden Firmen müssen diese auch wärmebehandeln. Die aufgenommenen Erwärmungskurven bieten eine sofort nutzbare Orientierung zur Festlegung der Wärmebehandlungsdauer.
- Die Veränderungen der Zug- und Torsionskennwerte durch die verschiedenen Federfertigungsschritte können bereits im Musterprozess beim Festlegen der Prozessparameter berücksichtigt und damit der Musterprozess verkürzt werden (Zeiteinsparung). Außerdem werden damit Entscheidungshilfen für Optimierungen des Fertigungsprozesses gegeben.
- Durch die Ermittlung der Veränderung der Zug- und Torsionskennwerte nur durch das Kugelstrahlen und nachfolgende Wärmebehandlungen am Draht (nicht erst an der Feder) stehen wichtige Erkenntnisse zur Optimierung dieses Arbeitsgangs zur Verfügung.
- Torsionsversuche mit Be- und Entlasten gestatten das detaillierte Untersuchen des elastisch-plastischen Übergangsbereiches und ermöglichen Rückschlüsse auf zu erwartende Setzbeträge an Federn aus diesen Drähten.
- Bisher gab es Relaxationsversuche bei Torsionsbeanspruchung nur an Federn und damit eine Vermengung der Einflüsse von Drahteigenschaften und Federherstellung. Mit Relaxationsuntersuchungen bereits am Draht kann das Relaxationsverhalten verschiedener Drähte und Materialien miteinander verglichen werden. Federhersteller können damit Materialien auswählen, die zur Herstellung von Federn mit hohen Relaxationanforderungen geeignet sind, Drahthersteller den Draht gezielt optimieren.
- Die Relaxationsverluste von Schraubendruckfedern werden außer durch den in der Norm enthaltenen Kenngrößen durch ihr Wickelverhältnis, die Wärmebehandlung und die Vorsetzspannung beeinflusst.
- Der deutliche Unterschied der mechanischen Kennwerte, besonders vom E-Modul, an Bändern aus 1.4310, die längs bzw. quer zur Walzrichtung geschnitten wurden, muss bei der Dimensionierung von Federn aus Band berücksichtigt werden.
- Die Lösung der nichtlinearen Biegedifferentialgleichung für vorgekrümmte Stäbe und bei großer Verformung ermöglicht die Bestimmung des E-Moduls an vorgekrümmten und geraden Drähten aus der Kennlinie des 3-Punkt-Biegeversuches mit Hilfe einer leicht anwendbaren Polynomapproximation.
- Ein Algorithmus und eine Polynomapproximation zur Berechnung der Biegespannung auch bei sehr großen Verformungen ermöglicht die Bestimmung der Federbiegegrenze.
- Die Berücksichtigung des nichtlinear-elastischen Werkstoffverhaltens bei der Dimensionierung von Schraubenfedern ist insbesondere sinnvoll bei Federn aus nicht rostendem Material, vielen Windungen und sehr hohen Anforderungen an das Einhalten der Kraft-Weg-Kennlinie. Der G-Modul wird dabei durch eine Funktion ersetzt, die aus der Torsionsversuchskennlinie errechnet wird.
- Durch die Internet-Datenbank mit den Draht- und Bandkennwerten sind die ermittelten Kennwerte für die Federdimensionierung und zum Festlegen der Parameter der Federherstellung schnell verfügbar.

Alle genannten Ergebnisse können nach Anpassung auf die betrieblichen Besonderheiten sofort genutzt werden. Die Nutzung dieser Ergebnisse führt zu Materialeinsparungen durch optimale Werkstoffauslastung (Dimensionierung mit realen Werkstoffkennwerten), zu Energieeinsparungen durch optimierte Wärmebehandlungsprozesse sowie zu Zeiteinsparungen.

Umsetzung und Ergebnistransfer

Die Zusammensetzung des PA mit 17 Teilnehmern aus leitenden Mitarbeitern der Federn- und Federstahldraht- bzw. -bandindustrie sowie einem namhaften Maschinenhersteller, dem Verband der Deutschen Federindustrie (VDFI) und der Eisendraht- und Stahldrahtvereinigung e.V. (ESV) garantiert bereits das Bekanntmachen von Untersuchungsergebnissen in einem großen Anwenderkreis.

- Schriftlicher Bericht und ausführlicher Vortrag zu den laufenden Forschungsaktivitäten und -ergebnissen (PA-Treffen) Tischvorlagen verschickt am 09.09.2009, 17.02.2010, 28.09.2010, 17.03.2011, 24.08.2011

- Zwischenbericht im Forschungsreport der FSV: FSV-Report 2010, FSV-Report 2011
- Kurzbericht im Tätigkeitsbericht der VDFI-Jahreshauptversammlung: VDFI-Bericht JHV 2010, VDFI-Bericht JHV 2011
- Vortrag auf Sitzung des technischen Ausschusses des ESV: Vortrag Herr Fölber 28.10.10 (Vorsitzender des techn. Ausschusses und PA-Mitglied), Vortrag am 27.10.2011
- Ausführliche Ergebnispräsentation (Tagesveranstaltung) durch Forschungsstelle über Ziele, Ergebnisse und deren industrielle Nutzungsmöglichkeiten, Diskussion zur Überführungsstrategie am 14.02.2012
- Abschlussbericht über die Homepage der Forschungsgesellschaft Stahlverformung
- VDFI- Kurzdarstellung bis 12/2011
- Online-Datenbank mit den Materialkennwerten und Verformungskennlinien der untersuchten Federstahldrähte und -bänder
- Vortrag auf VDFI-Jahreshauptversammlung 2012
- TA Esslingen: Vortrag: Veränderung der Federdrahtparameter im Federherstellprozess 20.09.-22.09.2010
- Vortrag im Stahlzentrum Düsseldorf auf einer Sitzung mit mehreren Forschungsinstituten und Fachverbänden: 30.09.2010
- Präsentation auf der VDI-Fachtagung zu Federn: Ilmenauer Federntag 2010, 03.-04.11.2010 Ilmenau (Leistungsfähige Federntechnik, Laborführungen)
- 3 Vorträge: Internationales Wissenschaftliches Kolloquium Ilmenau 2011, 13.09.2011
- Vortrag WAI Düsseldorf 2011: 07.-08.11.2011
- Vortrag Tagung "Werkstoffprüfung Berlin 2011": 01.-02.12.2011
- Workshop Federntechnik TU Ilmenau
- Präsentation auf der WIRE Düsseldorf (weltweit größte Messe für Drähte, ...): Poster auf der wire 2010 Stand VDFI, Poster auf der wire 2012 Stand VDFI
- Veröffentlichung in „DRAHT 06/2011: 3-Seitige Veröffentlichung
- Veröffentlichung in „Stahl u. Eisen“
- Präsentation bei MEFORM (BA Freiberg)
- Übernahme in die akademische Lehre

Dokumentation

Geinitz, V.; Kletzin, U.; Weiß, M.: Draht und Band im Blick. DRAHT (62) 6, 2011, S. 34-36

Geinitz, V.; Weiß, M.; Kletzin, U.; Beyer, P.: Relaxation of Helical Springs and Spring Steel Wires. Tagung Internationales Wissenschaftliches Kolloquium Ilmenau (IWK) 2011. URN: urn:nbn:gbv:ilm1-2011iwk-064:6

Weiß, M.; Steigenberger, J.; Geinitz, V.; Beyer, P.: Extreme Bending of Spring Steel Wire – Theory and Experiment. Tagung Internationales Wissenschaftliches Kolloquium Ilmenau (IWK) 2011. URN: urn:nbn:gbv:ilm1-2011iwk-020:5

Braunschweig, M.; Weiß, M.; Liebermann, K.: Supply of Measurement Results of Spring Wire Tests on the Internet. Tagung Internationales Wissenschaftliches Kolloquium Ilmenau (IWK) 2011. URN: urn:nbn:gbv:ilm1-2011iwk-026:2

Geinitz, V.; Weiß, M.; Kletzin, U.; Beyer, P.; Liebermann, K.: Anstieg der elastischen Kennlinie aus dem Zug- und Torsionsversuch. Tagung Werkstoffprüfung Berlin 2011

Geinitz, V.; Weiß, M.; Kletzin, U.; Beyer, P.: Determination of Parameters Characterising the Functional Behaviour of Spring Steel Wire in Helical Springs. Cab Wire World Conference 2011 Düsseldorf, 7.-8.11.2011

Ansprechpartner

[Dr.-Ing. Veronika Geinitz](#), TU Ilmenau, Fak. für Maschinenbau, [Forschungsgruppe Draht und Federn](#), Max-Planck-Ring 12, 98693 Ilmenau, Tel.: +49 3677 - 69 18 55, Fax: +49 3677 - 69 12 59, <mailto:veronika.geinitz@tu-ilmenau.de>