

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das IGF-Vorhaben 14306 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: AiF 14306BR
Projekttitel: Ermittlung von funktions- und fertigungsrelevanten Federdrahtkennwerten (E- und G-Modul)
Laufzeit: 01.02.2005 - 30.09.2007
Gesamtmittel: 228.400,00 €
Leiter der Forschungsstelle:
TU Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau
Fachgebiete Rechneranwendung im Maschinenbau und Maschinenelemente
Prof. Dr.-Ing.habil. Mathias Weiß, Prof. Dr.-Ing. Ulf Kletzin
Projektleiter: Dr.-Ing. Veronika Geinitz
Tel.: 03677-69 1855
Sekretariat: Tel.: 03677-69 2478
Fax: 03677-69 1823

1 Problemstellung

Die genaue Kenntnis des Werkstoffverhaltens ist für die Dimensionierung und Fertigung von Federn eine wesentliche Grundlage. Federstahldraht als Ausgangsmaterial für die Federfertigung ist aufgrund seiner Herstellung weder homogen noch isotrop. Außerdem werden das Verformungsverhalten der Federstahldrähte und damit die Funktion der Feder von den Arbeitsschritten beeinflusst, die der Formgebung der Feder (z.B. Federwinden) nachgelagert sind, wie z.B. das Anlassen und Vorsetzen. Deshalb sind Rückschlüsse auf das Verformungsverhalten des Federstahldrahtes in Torsions- und Biegerichtung aufgrund durchgeführter Zugversuche am unbehandelten Draht nur unzureichend möglich. Demzufolge muss das Materialverhalten bei Zug-, Torsions- und Biegebelastung getrennt untersucht werden und zwar auch an angelassenen und durch Vortordieren „vorgesetzten“ Drähten.

Die Bestimmung der Kennwerte bzw. der Verformungskennlinien der Federwerkstoffe ist weiterhin notwendig, weil

- von der Federdrahtindustrie neue Materialien bereitgestellt werden;
- die momentan angewendeten Werte für E- und G-Modul dagegen vor ca. 50 Jahren messtechnisch ermittelt wurden;
- Federn im Bereich großer Formänderungen eingesetzt werden und das Federmaterial in diesem Bereich ein nichtlinear-elastisches Verhalten aufweist;
- für eine optimale Auslastung des Federmaterials die Fließgrenzen bei Torsions- und Biegebeanspruchung bekannt sein müssen, während bisher meist nur die Zugfestigkeit bestimmt wird;
- die dem Federwinden nachgelagerten Arbeitsgänge Anlassen und Vorsetzen die Materialeigenschaften des Federstahldrahtes deutlich verändern;
- numerische Berechnungsverfahren (Finite Elemente Methode, FEM) den gesamten Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Kennlinien zur Berechnung besonders großer Verformungen benötigen.

2 Ziele

Das wichtigste Forschungsziel war die Entwicklung von Methoden und Verfahren zur Ermittlung, Speicherung und Auswertung von Verformungskennlinien von Drähten. Aus den Kennlinien sollten statische Drahteigenschaften wie der E- und G-Modul sowie weitere Kennwerte des Materialverhaltens entsprechend den Anforderungen der Nutzer dieser Daten berechnet werden (Bruch- und Fließfestigkeit sowie Dehngrenze bei Zug-, Torsions- und Biegebeanspruchung, Rückfederung) und in einer Datenbank bereitgestellt werden.

Im Einzelnen sollten folgende wissenschaftlich-technische Ergebnisse erzielt werden:

- Messverfahren und Messeinrichtungen zur Aufnahme von Verformungskennlinien;
- Richtlinien zum Messablauf und zur Durchführung der Messungen mit den Versuchsständen;
- Methoden zur Ermittlung der Drahtkennwerte aus den Verformungskennlinien;
- Angaben zu E- und G-Modul bei Raumtemperatur in Abhängigkeit vom Federdrahtmaterial, vom Drahtdurchmesser und von der Weiterverarbeitung (Einfluss von Anlassen und Vorsetzen);
- Angaben zu den Fließ- und Bruchfestigkeiten (Zug, Torsion, Biegung) in Abhängigkeit vom Federdrahtmaterial, Durchmesser und von der Weiterverarbeitung (Anlassen und Vorsetzen);

- Aussagen zum Rückfederungsverhalten des Drahtes in Abhängigkeit von Material und Durchmesser;
- Datenbank zur Verwaltung funktions- und fertigungsrelevanter Materialkennwerte und Verformungskennlinien.

3 Vorgehensweise

Theoretische und experimentelle Untersuchungen wurden in folgenden Arbeitsschritten durchgeführt:

1. Bereitstellen der zu untersuchenden Federdrähte sowie Festlegen von Versuchsparametern.
2. Erarbeiten der Anforderungen an die Versuchsstände für Zug-, Torsions- und Biegeversuche und an die jeweiligen Messabläufe.
3. Vorbereiten der Versuchsstände und weiterer notwendiger Messeinrichtungen.
4. Entwickeln der Software zur Steuerung der Versuchseinrichtungen und zur automatisierten Erfassung und Auswertung der Messdaten.
5. Entwickeln einer Datenbankstruktur zum Verwalten der Verformungskennlinien und Werkstoffkennwerte für Federdrähte.
6. Durchführen und Auswerten von Zug-, Torsions- und Biegeversuchen an den ausgewählten Federdrähten mit verschiedenen Ausgangszuständen (unbehandelt, angelassen, vorgesetzt) und Speichern der Ergebnisse in der Datenbank.
7. Überprüfung der ermittelten Drahtkennwerte durch Fertigen und Prüfen von Versuchsfedern.
8. Anfertigen eines Abschlussberichtes und Vorbereitung eines Nachfolgeprojektes zur Messung der Drahtparameter an häufig verwendeten Drähten.

Zunächst war es notwendig, Messverfahren und Versuchsstände für Zug-, Torsions- und Biegebelastung zu entwickeln und aufzubauen bzw. anzupassen und verschiedene Messtechnik- und Einspannkomponenten der Versuchsstände zu untersuchen und zu vergleichen. Ein weiterer Schwerpunkt bestand in der Entwicklung von Auswertalgorithmen zur Ermittlung der statischen Drahtkennwerte aus den Zug-, Torsions- und Biegekennlinien und der Konzeption einer Datenbank zur Speicherung der Kennlinien und daraus ermittelter Drahtparameter.

Ein nächster großer Aufgabenkomplex beinhaltete die Aufnahme der Spannungs-Verformungskennlinien bei Zug-, Torsions- und Biegebeanspruchung und die Ermittlung der Kennwerte für patentiert gezogenen, nicht rostenden und ölschlussvergüteten Federstahldraht mit jeweils drei verschiedenen Drahtdurchmessern ($d = 1,0 / 3,0 / 4,5$ mm). Dabei wurden die Versuche sowohl an nicht vorbehandelten Drahtproben wie auch an mit verschiedenen Anlassregimen angelassenen Drähten vorgenommen. Als weiterer Variationsparameter wurden die Auswirkungen des Arbeitsganges Vorsetzen auf das Verformungsverhalten der Federstahldrähte untersucht, indem an unterschiedlich plastisch vortordierten Drähten, Torsionsversuche durchgeführt wurden. Das Vortordieren entspricht dem Arbeitsgang Vorsetzen der Schraubenfeder. Außerdem wurden aus den Probedrähten Schraubendruck- und -zugfedern hergestellt und deren Kennlinien und Setzeträge in Abhängigkeit von variierten Bearbeitungszuständen und Geometrieparametern der Federn aufgenommen.

4 Ergebnisse

4.1 Erreichte Ergebnisse

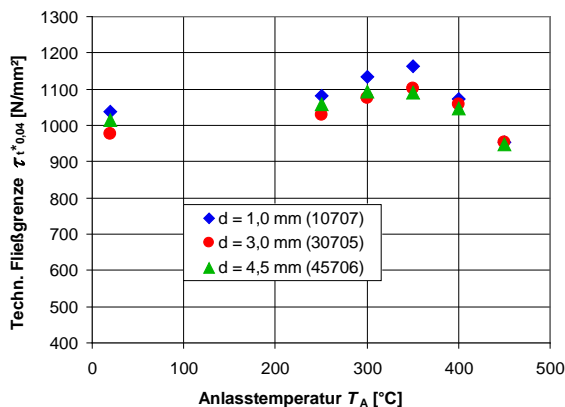


Bild 1: Technische Torsionsfließgrenze $\tau_{t_{0,04}}^*$ in Abhängigkeit von der Anlasstemperatur T_A für verschiedene ölschlussvergütete Federdrähte VDSiCr, Anlassedauer: 60 min

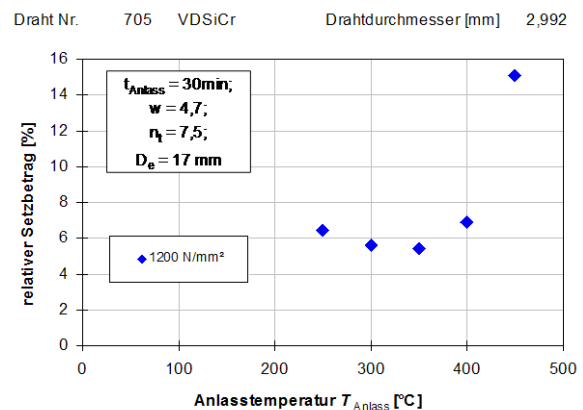


Bild 2: Relativer Setzbeitrag von Federn aus VDSiCr-Draht mit $d = 3,0$ mm (30705)

Die Torsionsversuche an den Probedrähten haben ergeben, dass die Veränderung der Torsionsfließgrenze in Abhängigkeit vom Anlassregime gut übereinstimmt mit der Veränderung des Vorsatzbetrages an ebenso angelassenen Schraubendruckfedern, die aus diesen Probedrähten hergestellt wurden. Je größer die Torsionsfließgrenze, umso kleiner der Setzbetrag im Arbeitsgang Vorsetzen (Bild 1). Die Torsionsfließgrenze des Drahtes bzw. die Auslastbarkeit der Feder kann also über den Anlassprozess eingestellt bzw. verbessert werden. Auch das im Torsionsversuch festgestellte nicht linear elastische Verhalten der Drähte wurde an den Kennlinien der Schraubendfedern wiedergefunden. Die Anlasstemperaturen für eine maximale Torsionsfließgrenze sind bei ölschlussvergüteten und patentiert gezogenen Federstahldrähten geringer und bei nicht rostendem Federstahldraht höher als bisher üblich.

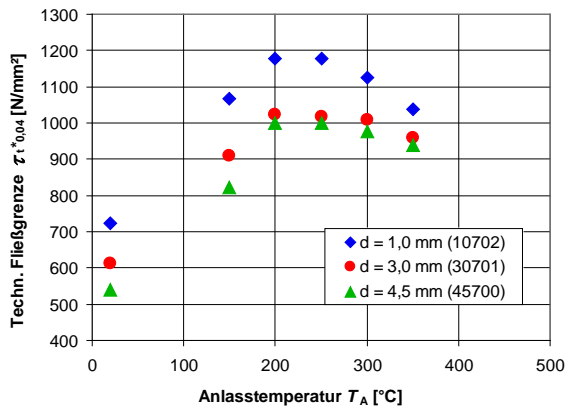


Bild 3: Technische Torsionsfließgrenze $\tau_{t,0,04}^*$ in Abhängigkeit von der Anlassstemperatur T_A für verschiedene patentiert gezogene Federdrähte SH, Anlassdauer: 60 min

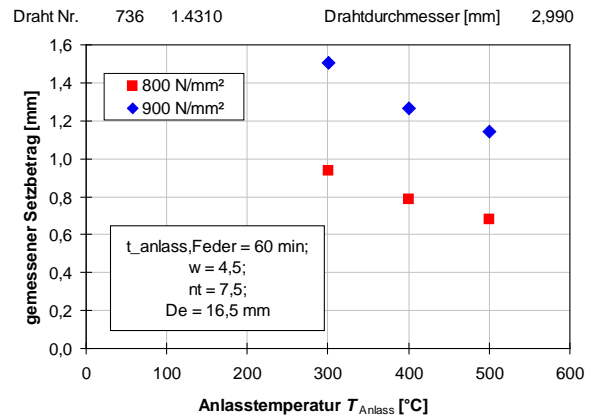


Bild 4: Mittelwert der gemessenen Setzbeträge an den industriell gefertigten Druckfedern in Abhängigkeit von der Anlassstemperatur T_A bei zwei verschiedenen Belastungsspannung $\tau_{t,Last}^*$

An einer Serie industriell hergestellter Federn aus nicht rostendem Material 1.4310 konnte festgestellt werden, dass die im Torsionsversuch ermittelte Anlassstemperatur von 500 °C, die zur größten Torsionsfließgrenze führte, bei ebenso angelassenen Druckfedern zu den kleinsten Setzbeträgen im Arbeitsgang Vorsetzen (Bild 4) und damit zur höchsten Auslastbarkeit, zum besten Relaxationsverhalten (Bild 5) und zur höchsten Lebensdauer im Dauerschwingversuch (Bild 6) führte. Diese Anlassstemperatur wird in der Praxis normalerweise aufgrund der Versprödungsgefahr durch Karbidbildung nicht angewendet.

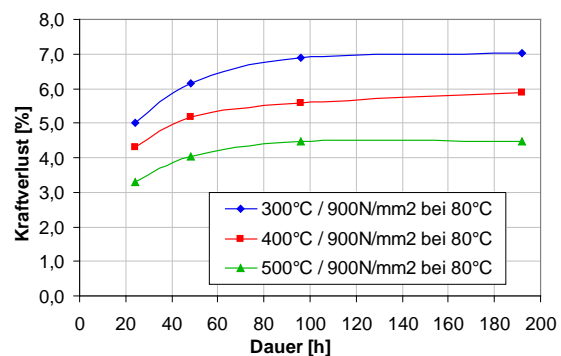
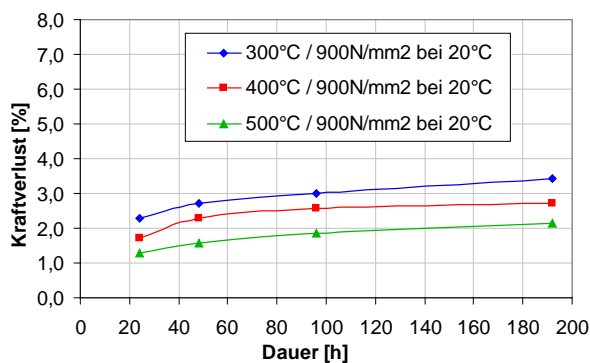


Bild 5: Ergebnis des Relaxationsversuches an den industriell gefertigten Druckfedern in Abhängigkeit von der Anlassstemperatur T_A für Raumtemperatur (links) bzw. 80 °C Relaxationstemperatur

Zur Speicherung, Verwaltung und industriellen Nutzung der aufgenommenen Federdrahtkennlinien und -kennwerte wurde eine webbasierte Datenbank entwickelt. Diese beinhaltet momentan die Ergebnisse aus den Zug-, und Torsionsversuchen an den neun exemplarisch ausgewählten Drähten mit verschiedenen Bearbeitungszuständen. Der Zugriff erfolgt über das Internet. Zugangsberechtigungen ermöglicht die Forschungsstelle.

Erste Anwendungen der erzielten Ergebnisse sind bereits erfolgt:

- Die festgestellte mögliche Reduzierung der Anlassstemperatur führte bei einer Firma zu deutlichen Energieeinsparungen beim Arbeitsgang Anlassen bei gleichzeitiger Verbesserung des Setzverhaltens der so hergestellten Federn.
- Die Ergebnisse der Torsionsversuche werden von mehreren Firmen zur gezielten Optimierung von hoch ausgelasteten Schraubendfedern genutzt.

- Weitere Firmen verwenden die aufgenommenen Verformungskennlinien zur verbesserten Vorausberechnung des Funktionsverhaltens von hoch ausgelasteten Federn und zur Dimensionierung von Federn mittels FEM.
- Eine Firma entwickelte aufgrund der Untersuchungen im Forschungsprojekt einen eigenen Biegeversuchsstand.

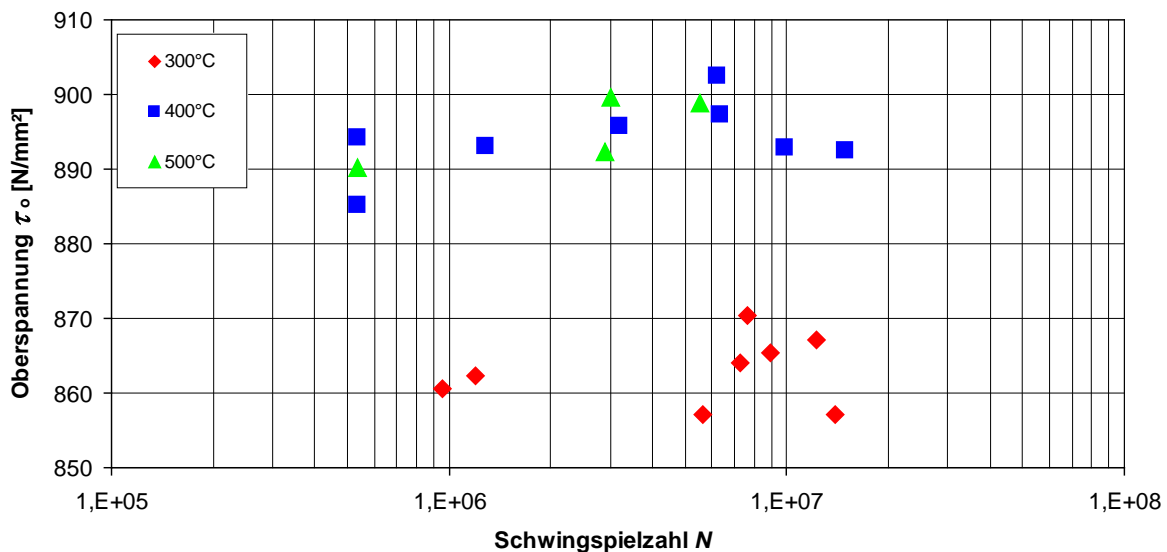


Bild 6: Ergebnis des Dauerschwingversuches an den industriell gefertigten Druckfedern in Abhängigkeit von der Anlasstemperatur T_A . Vier bei 500°C angelassene Federn sind nach 15 Mio. Lastwechseln nicht gebrochen.

Weitere Ergebnisse sind:

- Das Forschungsprojekt liefert günstige Prozessparameter für den Arbeitsgang Anlassen zur Herstellung von statisch (oder auch dynamisch) hoch auslastbaren Federn. Dadurch ist eine Bauraum- und Massereduzierung möglich.
- Das optimierte Anlassen gestattet das Einsparen von Energie.
- Die ermittelten Materialkennndaten und die Berücksichtigung ihrer Veränderung während der Federherstellung führen zu einer wesentlich genaueren Auslegung der Federn im Entwurfstadium und damit wird eine Verkürzung der Bemusterungsphase erreicht.
- Mit Hilfe des hier beschriebenen Verfahrens ist unter Verwendung der gemessenen Torsionsfließgrenze eine wesentlich verbesserte Auslegung von Schraubenfedern mit geringen Setzbeträgen möglich.
- Mit Hilfe des hier beschriebenen Verfahrens ist unter Verwendung der gemessenen Kennlinien an vordrillierten Drähten eine wesentlich verbesserte Auslegung von Schraubenfedern mit deutlichen Setzbeträgen und damit hoher Auslastung möglich.
- Eine Verbesserung der Zusammenarbeit mit den Kunden hinsichtlich der Federauslegung auf der Grundlage realitätsnaher Materialkennwerte und Berechnungsmethoden wird damit möglich.
- Die ermittelten Kennndaten und Kennlinien der Zug- und Torsionsversuche stehen in der entwickelten Web-Datenbank zur Nutzung zur Verfügung. In Abhängigkeit von der Anlasstemperatur und Vorsetzspannung werden Werte für den E-Modul und G-Modul sowie für die Fließgrenzen bei Zug und Torsion zur Nutzung bei der Dimensionierung und Analyse von Federn bereitgestellt.
- Es wurde ein Prototyp eines Feinschiebungsaufnehmers entwickelt und aufgebaut, der es ermöglicht, die Torsionsspannungs-Schiebungs-Kennlinie in der erforderlichen Genauigkeit aufzunehmen.
- Die Versuchsstände zur Ermittlung der Materialkennlinien und die Verfahren zu ihrer Auswertung stehen zur Nutzung in der Forschungsstelle und über das Steinbeis-Transferzentrum „Federntechnik“ zur Verfügung.
- Die Beurteilung der verschiedenen Versuchstechnik zur Durchführung von Zugversuchen an dünnen hochfesten Drähten kann in den Firmen zur Überprüfung der selbst verwendeten Versuchstechnik verwendet werden.
- Es wurde eine Strategie entwickelt zur Dimensionierung von Federn auf der Grundlage von Versuchen am Ausgangsmaterial, bei denen sowohl die Belastungsart im Versuch als auch die Vorbehandlung des Materials von der herzustellenden Feder abhängen.

4.2 Nicht erreichte Ergebnisse

Neben Zug- und Torsionsversuchen wurden auch zahlreiche Biegeversuche an den Probedrähten durchgeführt. Ziel war die Bestimmung der Rückfederung und des Biege-E-Moduls. Der Bestimmung des Biege-E-Moduls liegt die Frage zugrunde, ob der E-Modul aus dem Zugversuch und der Biege-E-Modul gleich groß sind und damit das elastische Verhalten des Drahtmaterials bei Zug- und Biegebeanspruchung gleich ist.

Der laut Projektantrag für die Biegeversuche genutzte Versuchsaufbau eines querkräftarmen Biegeversuches hat sich für die Biege-E-Modul-Bestimmung als ungünstig erwiesen, da die momentan nutzbare Drahtlänge zu gering ist und sich deshalb der Einfluss der Einspannstellen auf die Spannungsverteilung im Draht sehr stark auswirkt. Während der Projektlaufzeit wurde deshalb ein weiterer Biegeversuchsstand aufgebaut, der das Vierpunkt-Biegeversuchsprinzip umsetzt. Die mit diesem Versuchsstand ermittelten Werte für den Biege-E-Modul lagen für ölschlussvergütete Drähte im Bereich der Ergebnisse aus dem Zugversuch, bei vorgekrümmten Drähten gab es aber große Differenzen. Es lassen sich somit keine Schlüsse ziehen auf die tatsächlichen elastischen Materialkennwerte E im Zugversuch und E_b im Biegeversuch. Auch die Frage, ob diese beiden Größen gleich groß sind, ist anhand der durchgeführten Versuche derzeit nicht zu beantworten. Die beiden genutzten Biegeversuche müssen daher in einem Nachfolgeprojekt überarbeitet und die Versuche zur Vergleichbarkeit von Zug- und Biege-E-Modul erneut durchgeführt werden.

5 Praktischer Nutzen / Wirtschaftlichkeit

Die Nutzung der angestrebten Forschungsergebnisse erfolgt in den im AiF-Leitfaden genannten Fachgebieten Konstruktion und Produktion bzw. Wirtschaftszweigen Maschinenbau, Fahrzeugbau sowie Metallherzeugung und -bearbeitung und Herstellung von Metallerzeugnissen.

Die Dimensionierung und Fertigung von Federn und Drahtbiegeteilen werden durch die Schaffung anwendungsbezogener Grundlagen zur Beschreibung des Materialverhaltens verbessert. In wirtschaftlicher Hinsicht wird durch die bessere Kenntnis der Werkstoffbelastbarkeit eine verbesserte Werkstoffauslastung und eine Optimierung der dem Federwinden nachgelagerten Arbeitsgänge erzielt.

So führte beispielsweise die festgestellte mögliche Reduzierung der Anlasstemperatur (bei einer Firma aus dem projektbegleitenden Gremium um 80°C) zu deutlichen Energieeinsparungen beim Arbeitsgang Anlassen bei gleichzeitiger Verbesserung des Setzverhaltens der so hergestellten Federn.

Die ermittelten Materialkenndaten und die Berücksichtigung ihrer Veränderung während der Federherstellung führen zu einer wesentlich genaueren Auslegung der Federn im Entwurfstadium und einer Verkürzung der Bemusterungsphase. In der Web-Datenbank werden in Abhängigkeit von der Anlasstemperatur und dem Vorsetzen Angaben zu E-Modul und G-Modul, den Fließgrenzen bei Zug und Torsion und die Kennlinien der Zug- und Torsionsversuche zur Nutzung bereitgestellt. Die entwickelten Versuchsstände zur Ermittlung der Materialkennlinien und die Verfahren zu ihrer Auswertung stehen zur Nutzung in der Forschungsstelle zur Verfügung.

Die angestrebten Forschungsergebnisse werden bei den Draht- und Federherstellern sowie beim Federanwender wirksam. Sie führen bei allen Beteiligten zur Steigerung der Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit, da mit Kenntnis der genauen Materialkennwerte eine sicherere Berechnung bezüglich der Funktion von Federn und Drahtbiegeteilen möglich wird. Außerdem kann die Fertigung, insbesondere der Musterprozess, effektiver gestaltet werden.

Mit diesen Effekten sind in der deutschen drahtverarbeitenden Industrie, mit einem Umsatzvolumen von allein ca. 1 Mrd. €/a für Schraubenfedern, sowie bei ihren Kunden erhebliche Einsparungen zu erwarten, die zur Preisreduzierung und Qualitätssteigerung deutscher Produkte beitragen werden.

6 Umsetzung und Ergebnistransfer

Die Ergebnisse der Torsionsversuche werden bereits von mehreren Firmen zur gezielten Optimierung, zur verbesserten Vorausberechnung des Funktionsverhaltens von hoch ausgelasteten Schraubenfedern und zur Dimensionierung von Federn mittels FEM genutzt. Eine Firma entwickelte aufgrund der Untersuchungen im Forschungsprojekt einen eigenen Biegeversuchsstand.

Während der Projektlaufzeit wurden die erzielten Ergebnisse halbjährlich in ausführlichen Berichten dargestellt, die jedem Mitglied des projektbegleitenden Gremiums vor einem Projekttreffen zugeschickt werden. Bei den gemeinsamen Forschungsbesprechungen sind die Ergebnisse des vergangenen halben Jahres vorgestellt, ihre Bedeutung für die Industrie diskutiert und das weitere Vorgehen festgelegt worden.

Zum Abschluss des Projektes fand in Offenbach eine Projektpräsentation mit mehr als 30 Teilnehmern statt, zu der alle Mitglieder des VDFI und über eine Ankündigung in der Fachzeitschrift „Draht“ weitere Interessenten eingeladen wurden.

Die Forschungsergebnisse wurden und werden außerdem bei den jährlich stattfindenden Jahreshauptversammlungen des VDFI vorgelegt und bei Informations- und Weiterbildungsseminaren (z.B. VDI-Tagung „Federn- Unverzichtbare Bauteile der Technik“ 2006 in Fulda) bzw. Symposien des Verbandes und der TU Ilmenau (z.B. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium IWK in Ilmenau) präsentiert. Zum IWK 2008 ist ein spezieller Workshop zum Thema „Federntechnik“ geplant. Ein besonderes Forum zur Verbreitung der Ergebnisse ist die im Zweijahresrhythmus in Düsseldorf stattfindende Messe „WIRE“, bei der die Forschungsstelle auf dem Stand des VDFI ihre Ergebnisse präsentiert.

Die Ergebnisse fließen ein in Weiterbildungsseminare und Workshops, die die Forschungsstelle bei Mitarbeitern der Federnindustrie und bei Anwendern von Federn durchführt (z.B. Lehrgang „Kaltgeformte Federn“ an der TA Esslingen), sowie in die akademische Lehre. Darüber hinaus erarbeitet der VDFI nach Abschluss des Forschungsvorhabens eine Kurzdarstellung zur Information der Mitgliedsfirmen und für deren Kunden. Außerdem werden die Ergebnisse auf Fachtagungen und in mindestens einer Fachzeitschrift vorgestellt.

Ansprechpartner

[Dr.-Ing. Veronika Geinitz](mailto:veronika.geinitz@tu-ilmenau.de), 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>