Projektdaten:

Projekttitel:	Kriech- und Relaxationsverhalten von Federdrahtstählen in Schraubenfedern
Projektnummer:	IGF 18992 BR
Laufzeit:	01.01.2016 – 30.06.2018
Berichtszeitraum:	01.01.2016 – 30.06.2018
Gesamtmittel:	213.840,00 €

Forschungseinrichtung:	TU Ilmenau, Fakultät Maschinenbau Fachgebiet Maschinenelemente Max-Planck-Ring 12 98693 Ilmenau
Leiter der Forschungs-einrichtung:	Prof. Dr.-Ing. Ulf Kletzin
Sachbearbeiter:	M. Sc. Johannes Schleichert Tel.: (03677) 69-1258

Inhaltsverzeichnis

		Seite
1	Thema	1
2	Problemstellung	1
3	Ziele	2
4	Vorgehensweise	2
5	Ergebnisse	3
6	Praktischer Nutzen/Wirtschaftlichkeit	5
7	Umsetzung und Ergebnistransfer	5
8	Dokumentation	6

1 Thema: Kriech- und Relaxationsverhalten von Federdrahtstählen in Schraubenfedern

2 Problemstellung

Der wirtschaftliche Stellenwert von Metallfedern wird erheblich dadurch erhöht, dass die durch die Federfunktion beeinflussten Bauteile erheblich kostspieliger sind als die Federn selbst [Scho10]. Aus diesem Grund ist es entscheidend, dass die spezifischen Funktionen stets erfüllt werden. Kriechvorgänge im Material haben allerdings zur Folge, dass dies nicht mehr gewährleistet ist oder Federn sogar vollständig ausfallen können. Solche Prozesse treten bei Beanspruchungen auf, die noch vollständig im elastischen Bereich liegen, meist im Zusammenspiel mit erhöhten Umgebungstemperaturen. Die resultierenden plastischen Verformungen führen dazu, dass sich die Federkraft (Relaxation) bzw. die ursprüngliche Einbaulänge (Kriechen) während des Betriebs ändert. Für beide Phänomene sind Kriechprozesse im Material die Ursache, die sowohl bei statisch als auch bei dynamisch eingesetzten Federn auftreten können.

Der Stand der Wissenschaft und Technik hinsichtlich Kriecheffekten an Federn und Federstahldrähten ist sehr gering und wird den steigenden Anforderungen an das Maschinenelement „Feder“ nicht mehr gerecht:

- Die aktuell für die Abschätzung des statischen Relaxationsverlustes verwendeten Schaubilder [EN 13906-13] wurden vor mehr als 50 Jahren abgeprüft. Die damals verwendeten Materialien entsprechen nicht mehr dem Stand der Technik und auch die damaligen Versuchsbedingungen sind weitestgehend unbekannt.
- Neuere Relaxationsversuche aus den 2000er Jahren [Kai02] variierten und kombinierten die zahlreichen Einflüsse von Drahtmaterial, Federgeometrie und -herstellung sowie die Einflüsse durch die Einsatzbedingungen nicht ausreichend, sodass eine zielgerichtete Optimierung der Federn auf deren Basis nicht möglich ist.
- Federn weisen im Gegensatz zu anderen Maschinenelementen ein ausgeprägtes Niedrigtemperaturkriechverhalten auf (hochfester, stark eigenspannungsbehafteter Draht, der hoch beansprucht wird).

- Das Kriechverhalten von Metallen wird allgemein als einachsiger Zeitstandszugversuch von spannungsarmen Normproben durchgeführt. Hiermit lassen sich keine Rückschlüsse auf das Kriechverhalten von Federstahldrähten unter Biege- bzw. Torsionsbeanspruchung ziehen.
- Untersuchungen zum Kriechverhalten von Federstahldrähten für kalt geformte Federn existieren weder bei Zug- noch bei Torsions- oder Biegebeanspruchung.

3 Ziele

Die zuvor angeführten Punkte verdeutlichen, dass aktuell eine wichtige Grundlage zur gezielten Verbesserung von Federn im Hinblick auf Relaxation und Kriechen fehlt. Ziel des Projektes ist es deshalb, das Kriech- und Relaxationsverhalten von Federstahldrähten nach verschiedenen Bearbeitungsschritten vorhersagen zu können, um schließlich auch die Relaxationsverluste daraus hergestellter Schraubenfedern abschätzen und gezielt (regelbasiert) verringern zu können. Hierfür sollten im Rahmen des Forschungsprojekts Methoden entwickelt und in einfach nutzbarer Form aufbereitet werden, sodass grundlegendes Wissen bereit gestellt werden kann, um die Federauslegung und -herstellung zu optimieren. Folgende, allgemeine Ziele wurden im Einzelnen formuliert:

1. Optimierung von Federstahldraht und Federn bzgl. Relaxation und Kriechverlusten
2. Erhöhung der Bauteilsicherheit, besonders bei Überlastschutz/Sicherheitstechnik
3. Bessere Vorausbestimmung der Relaxation in Abhängigkeit von Arbeitsschritten der Federfertigung, damit höhere Sicherheit bei und Verbesserung der Federauslegung
4. Verbesserung der Produkte/Verfahren: Herstellung von Federstahldraht und Federn

Die hierzu erforderlichen langwierigen Versuche können kleine und mittlere Unternehmen (KMU) weder finanziell noch personell leisten. Gerade diese Firmen machen allerdings den größten Teil der Firmen in der Herstellungskette von Federn aus. Die Weiterentwicklung des Wissensstands auf diesem Gebiet kommt daher insbesondere den KMU zugute, womit u.a. die Wettbewerbsfähigkeit deutscher Federdraht- und Federhersteller gegenüber Konkurrenten mit Tiefstpreisen durch qualitativ hochwertigere Produkte und bessere Beratungskompetenz gestärkt wird.

Die wirtschaftliche Bedeutung der Forschungsergebnisse – speziell im Hinblick auf KMU – lässt sich durch nachfolgende Punkte zusammenfassen:

5. Deutliche Verringerung der Anzahl von langwierigen Relaxationsversuchen an Federn, dadurch kürzere Produktentwicklungs- und Rüstzeiten sowie geringere Kosten
6. Höhere Materialausnutzung durch in Bezug auf Kriechen/Relaxation optimierte Federherstellung und Materialauswahl (Leichtbau, Einsparung von Material)
7. Erhöhung der Motoreffizienz: Einsparung von Treibstoff und damit Reduzierung des CO_2-Ausstoßes
8. Schaffen von Voraussetzungen zur Weiterentwicklung von Normen und Standards

Die formulierten Projektziele sind unternehmensübergreifend und branchenweit nutzbar; sowohl von Federdrahtherstellern und Herstellern kaltgeformter Federn als auch von den zahlreichen Anwendern von technischen Federn, die hohe und höchste Anforderungen bzgl. Funktion, Genauigkeit und Lebensdauer an ihre Federn haben. Schraubendruck-, -zug- sowie Drehstabfedern sind aufgrund ihres hohen Artnutzwertes die am häufigsten eingesetzten Federtypen, weshalb das Projekt daher zunächst auf torsionsbeanspruchte Drähte und daraus hergestellte Federn beschränkt war.

4 Vorgehensweise

1. Anpassen und Inbetriebnahme der Versuchstechnik, Festlegen der Versuchsparameter
2. Herstellung (vAW) und Präparation der Versuchsdrähte und -federn
3. Zug- und Torsionsversuche sowie Eigenspannungsmessungen (vAW) an den Versuchsdrähten, Aufnahme von Federkennlinien
4. Statische Kriechuntersuchungen an Federstahldrähten unter Torsionsbeanspruchung mittels einer neu konstruierten Torsionskriechvorrichtung (TKV)
5. Stichprobenartige zyklische Kriechuntersuchungen an Federstahldrähten unter Torsionsbelastung
6. Statische und zyklische (vAW) Relaxationsversuche an Schraubendruckfedern (SDF)
7. Entwicklung eines mathematischen Modells zur Berechnung des Relaxationsverhaltens einer Feder aus dem Kriechverhalten am Draht
8. Modellvalidierung und -verbesserung
9. Exemplarische statische Relaxationsversuche an Zug- und Drehstabfedern
10. Ableiten von Dimensionierungsregeln, Modellaufbereitung
11. Zwischenberichte, Abschlussbericht, Vorträge, Organisation des Projekts

5 Ergebnisse

Im Rahmen des Forschungsprojekts konnten u.a. die nachfolgenden Ergebnisse erzielt werden:

- Ableitung eines mathematisches Modells auf Basis des Norton-Bailey-Kriechgesetzes zur Beschreibung des Kriechens und der Relaxation von Torsionsstab- und Schraubenfedern
- Aufnahme von Kriechkurven (Kriechverformung in Abh. der Kriechzeit) an Federstahldrähten verschiedener Sorten, Durchmesser und Vorbehandlung unter unterschiedlichen Torsionsspannungen und Kriechtemperaturen (beispielhaft **Abbildung 1**) → Versuchsdatenbasis zur Bestimmung von Werkstoffkriechparametern und zur Verallgemeinerung des mathematischen Modells. In diesem Zusammenhang wurde auch das Kriech- und Relaxationsverhalten für große Zeiten abgeprüft bzw. die Grundlage für fundierte Abschätzungen geschaffen.

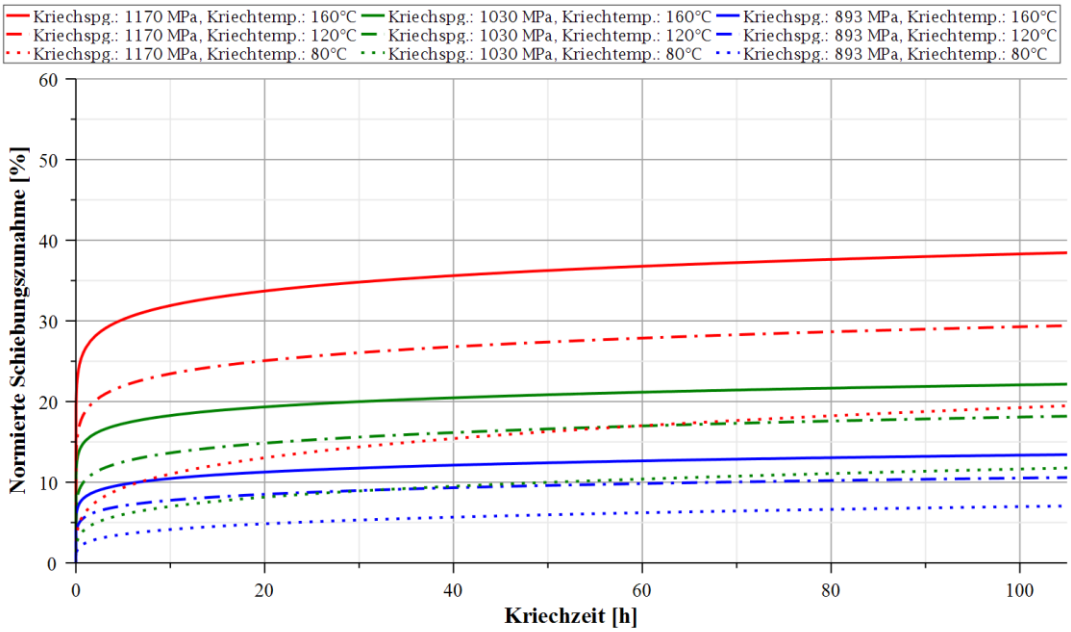

Abbildung 1: Kriechkurven eines **VDSiCrV**-Drahts (d=3mm), **350°C/30min** wärmebehandelt und mit **1450 MPa vortordiert** für verschiedene Kriechspannungen und -temperaturen

- Einordnung der Kriechprozesse bei Federstahldrähten und daraus gefertigten SDF zu Kriechmechanismus (Versetzungskriechen, speziell: Niedrigtemperaturkriechen) und Kriechphase (primäre Kriechphase)
- Relaxationsversuche für mehrere zeitliche Stützpunkte an Drähten (→ Ableitung von Werkstoffrelaxationsparametern als Basis der Gegenüberstellung von Relaxation und Kriechen an Drähten/Torsionsstabfedern) und Federn unterschiedlicher Wickelverhältnisse (beispielhaft in **Abbildung 2**) aus demselben Material und vergleichbarer Vorbehandlung der Proben, an denen die Kriechversuche durchgeführt wurden. (→ damit Möglichkeit der Gegenüberstellung von Relaxation an Draht und Federn); Ermittlung von Übertragungsfaktoren
- Grundlegende Erkenntnisse hinsichtlich des Einflusses von Geometrie und Vorbehandlung auf das Kriech-/Relaxationsverhalten von Drähten und Federn:
  - Bei ölschlussvergütetem und nicht-rostendem Material zeigte sich nahezu kein Einfluss des Drahtdurchmessers; bei patentiert gezogenem Material konnte grob zwischen dicken (d>5mm) und dünnen (d≤5mm) Drähten unterschieden werden, wobei die dicken Drähte deutlich höhere Kriech-/Relaxationsverluste aufwiesen.
  - Eine 30-minütige Wärmebehandlung (Temperatur je nach Material zwischen 200°C und 420°C) von Drähten und Federn reduziert die Verluste erheblich. Beim nicht-rostenden Material verringern sich die Verluste mit steigender Wärmebehandlungstemperatur nochmals signifikant.
  - Das Kalt-Vorsetzen (bei Drähten/Torsionsstabfedern: Vortordieren) führt beim ölschlussvergüteten und nicht-rostenden Material zu einem weiteren, merklichen Rückgang der Verluste; beim patentiert gezogenem Material hingegen kaum.
  - Es konnte nicht nachgewiesen werden, dass die Relaxation von Schraubenfedern vom Wickelverhältnis abhängig ist.
- Ableitung von Relaxationsschaubildern (nach 48h Relaxationszeit) für Schraubendruckfedern aller untersuchten Drahtsorten (Pb-pat., Stelmor-pat., FD/VDSiCr, VDSiCrV, 1.4310) und ihrer jeweiligen Vorbehandlungen für unterschiedliche Relaxationstemperaturen sowie Unterteilung in

verschiedene Drahtdurchmesserbereiche. Damit ist die Voraussetzung geschaffen, die aktuellen Relaxationsschaubilder der Norm hinsichtlich der Vorbehandlung der dort verwendeten Federn besser einordnen zu können und Abweichungen im Vergleich zu heutigen Werkstoffen aufzuzeigen (beispielhaft in **Abbildung 3**). Darüber hinaus wurden z. T. auch in der Norm nicht abgedeckte Relaxationsbedingungen untersucht, womit sich erstmals auch zu diesen Bereichen fundierte Aussagen zum Relaxationsverhalten von Schraubendruckfedern treffen lassen.
Zusätzlich wurden auch erstmals Relaxationsschaubilder in neuen Darstellungsformen über der Relaxationszeit (bis zu 1500 h) und über der Relaxationstemperatur erzeugt – jeweils für verschiedene Beträge der übrigen Einflussfaktoren.

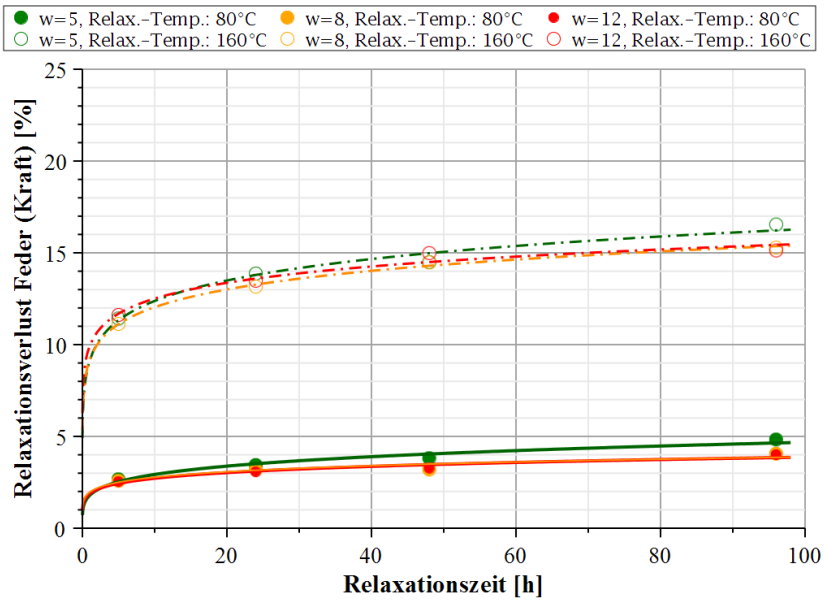

Abbildung 2: Relaxationskurven von **200°C/30min** wärmebehandelten und auf **800 MPa (w=5) bzw. 860 MPa (w=8, 12) vorgesetzten** Schraubendruckfedern aus **1.4310** (d=3mm) verschiedener Wickelverhältnisse und bei verschiedenen Relaxationstemperaturen für eine (unkorrigierte) Relaxationsspannung von **700 MPa**

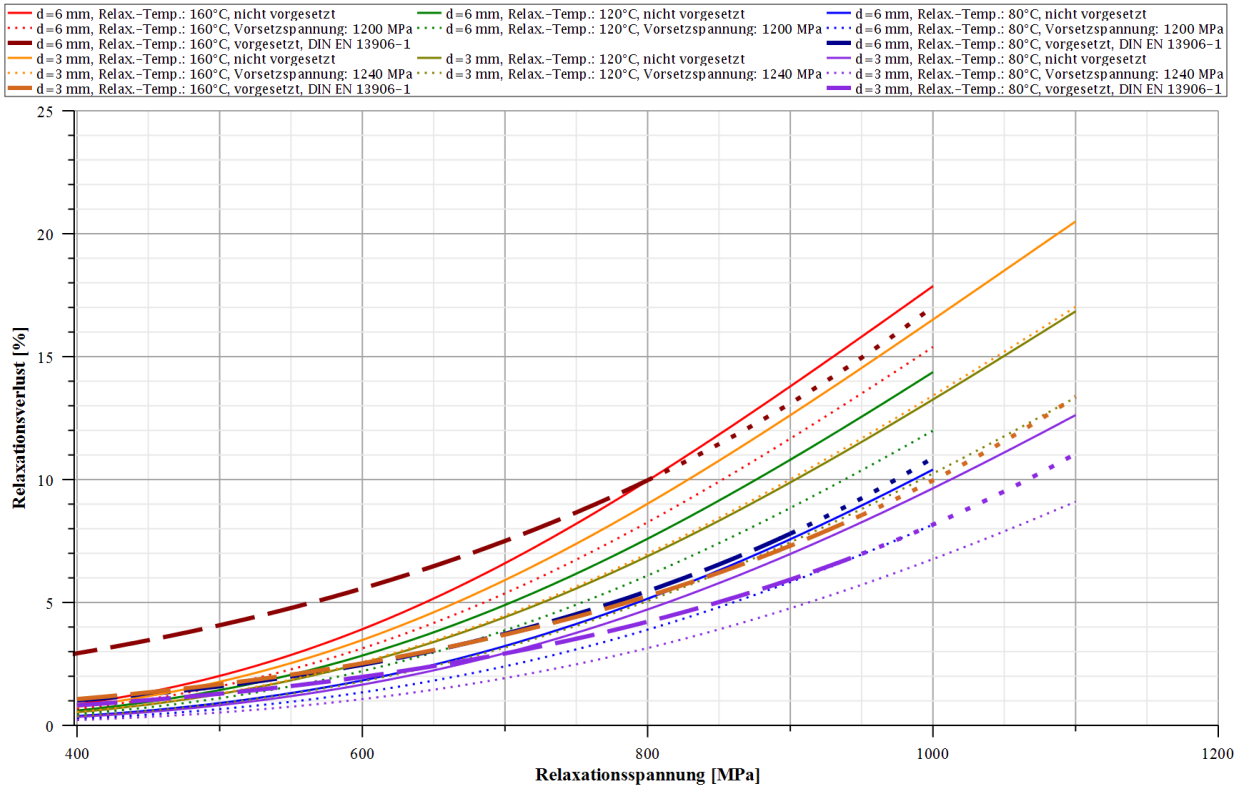

Abbildung 3: Vergleich des Relaxationsverlusts von berechneten mit Normkurven (in Abhängigkeit der Relaxationsspannung für Schraubendruckfedern aus **SiCr**-Draht mit einer Wärmebehandlung von **350°C/30min** nach einer Relaxationszeit von **48h** für verschiedene Relaxationstemperaturen)

- Erstmals wurden Kriechkurven für sehr viel größere Zeiten als 48h aufgenommen (bis zu 330h). Die entwickelten mathematischen Methoden erwiesen sich als gut geeignet, das Kriech- bzw. Relaxationsverhalten für Zeiten bis zu mehreren Monaten (konservativ) abzuschätzen.
- Das mathematische Modell, die ermittelten Kriech- und Relaxationsparameter sowie die Übertragungs- und Korrekturfaktoren wurden in einem einfach zu bedienenden EXCEL-Berechnungstool für die praktische Anwendung nutzbar gemacht. Hierbei wird in Abhängigkeit der Eingabewerte (Drahtsorte und -durchmesser, Vorbehandlung, …) ein Schätzwert für den zu erwartenden Kriech- bzw. Relaxationsverlust ausgegeben.
- Bündelung der gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich geringer Neigung zu Relaxation von SDF in einer bewusst einfach gehaltenen Empfehlungstabelle, die einen Beitrag zur Optimierung des Kriech- und Relaxationsverhaltens bei der Fertigung und Nachbehandlung von Schraubenfedern leisten kann.
- Exemplarische Relaxationsversuche an Schraubenzugfedern aus demselben Material wie die untersuchten Schraubendruckfedern ermöglichen eine Gegenüberstellung der Verluste bei identischen Relaxationsbedingungen und somit erste Erkenntnise hinsichtlich des Einflusses der eingewundenen Vorspannung bei Zugfedern.
- Exemplarische zyklische Relaxationsversuche an SDF bei kleinem Spannungshub. Damit wurden Vorarbeiten für die Abschätzung von zyklischer Relaxation an SDF geleistet.

6 Praktischer Nutzen / Wirtschaftlichkeit

Mit den Ergebnissen aus diesem Projekt werden die Federnhersteller in die Lage versetzt, durch eine entsprechende Anpassung der ohnehin stattfindenden Vorbehandlungsschritte der Drähte und Federn, d. h. ohne nennenswerten Mehraufwand, ihre Produkte z. T. erheblich beständiger gegen Kriechen und Relaxation zu gestalten Der Beitrag des Projektes zur Steigerung der Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit der KMU der Draht und Federnindustrie kommt u. a. wie folgt zum Ausdruck (vgl. auch Punkte 5-8 aus Abschnitt 2 bezüglich der insbesondere für KMU wirtschaftlichen Bedeutung):

- Optimierung entscheidender Vorbehandlungsprozesse und damit der Produktqualität von Schraubenfedern
- Erhöhung der Bauteilsicherheit
- Kostenreduzierung durch Energieeinsparung infolge optimierter Vorbehandlung von Drähten und Federn
- Verbesserung der Gebrauchseigenschaften von kalt geformten Federn durch Reduzierung der Kriech- und Relaxationsverluste

Neben dem Aufzeigen von Optimierungspotential bei der Herstellung, können mit den erarbeiteten mathematischen Zusammenhängen und den ermittelten Kriechparametern und Übertragungsfaktoren auch erstmals aussagekräftige Schätzwerte für die zu erwartenden Relaxationsverluste in Abhängigkeit von Drahtsorte und Relaxationsbedingungen berechnet oder aus Schaubildern abgelesen werden (auch für sehr viel größere Betriebsdauern der Federn als bisher möglich). Das eigens hierfür entwickelte, einfach zu bedienende EXCEL-Tool wird allen Mitgliedsfirmen des Verbands der Deutschen Federnindustrie (VDFI) kostenfrei zur Verfügung gestellt.

Alle aktiv beteiligten Industriepartner haben mit der Umsetzung der Ergebnisse bereits begonnen bzw. sind mit entsprechenden Planungen zur Umsetzung befasst. Die erarbeiteten Ergebnisse können von allen Federn herstellenden Firmen, insbesondere auch von den zahlreichen KMU, unmittelbar umgesetzt und genutzt werden.

7 Umsetzung und Ergebnistransfer

Die Zusammensetzung des PA mit 22 teilnehmenden Firmen garantiert bereits das Bekanntmachen von Untersuchungsergebnissen in einem großen Anwenderkreis. Zusätzlich sollen die nachfolgenden Transfermaßnahmen umgesetzt werden bzw. wurden bereits umgesetzt:

Transfermaßnahme	Personenkreis	Zeitraum
während der Projektlaufzeit (01.01.2016 - 30.06.2018)		
Kurzbericht im Tätigkeitsbericht der VDFI-Jahreshauptversammlung VDFI-Bericht JHV 2016 VDFI-Bericht JHV 2017 VDFI-Bericht JHV 2018 sowie Vortrag auf der JHV 2018 zum Stand des Forschungsprojekts	VDFI-Mitgliedsfirmen, assoziierte Mitglieder, ca. 100 Teilnehmer ca. 100 Teilnehmer ca. 100 Teilnehmer	 Berlin 09.-10.06.2016 Stuttgart 18.-19.05.2017 Dresden 07.-08.06.2018
Information auf Sitzung des technischen Ausschusses des ESV durch PA-Mitglied	ESV-Mitgliedsfirmen ca. 20 Teilnehmer	III. Quartal 2017
Internat. Wiss. Kolloquium Ilmenau, Vortrag	ca. 20 Teilnehmer	Ilmenau, 11.9.-14.09.2017
Präsentation auf der WIRE 2018 (weltweit größte Messe für	jeder	Düsseldorf, 16.04. - 20.04.2018