

# Kriech- und Relaxationsverhalten von Federstahldrähten in Schraubenfedern

## Kaum erforscht aber hoch relevant

Bei der Auslegung von Schraubenfedern, die stetig wachsende Qualitätskriterien erfüllen müssen, stellt das Kriech- und Relaxationsverhalten einen bisher oftmals vernachlässigten, für die spätere Funktionserfüllung allerdings entscheidenden Faktor dar. Kriechvorgänge im Material 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. Kriechprozesse, die für beide Phänomene die Ursache sind und durch thermisch aktivierte Platzwechselfvorgänge ausgelöst werden, können sowohl bei statisch als auch bei dynamisch eingesetzten Federn auftreten.

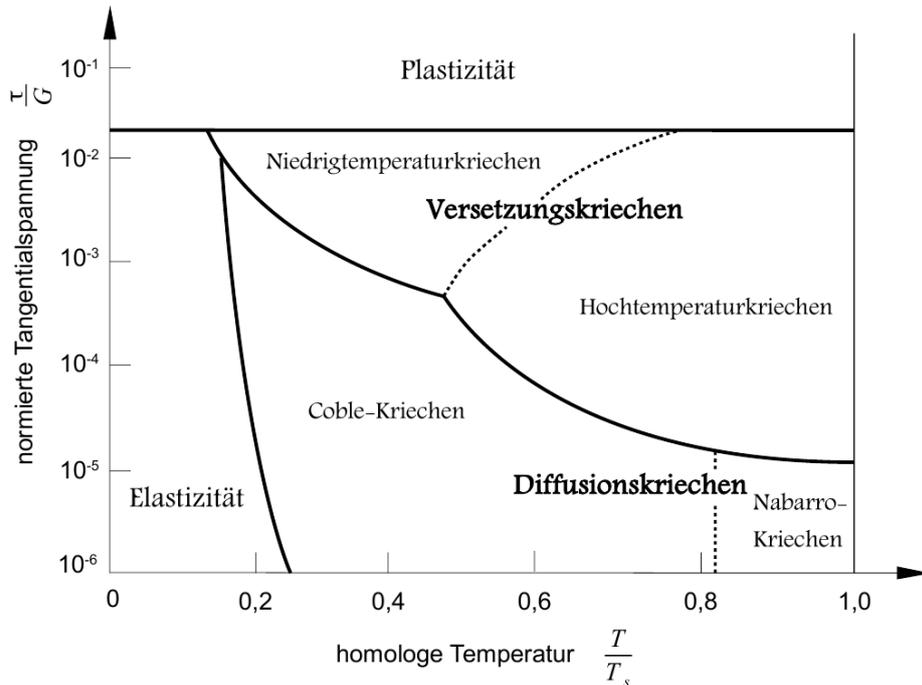
Der Stand der Wissenschaft und Technik hinsichtlich Kriecheffekten an Federn und Federstahldrähten ist äußerst dürftig und wird den steigenden Anforderungen an das Maschinenelement „Feder“ nicht mehr gerecht. So ist die einzige Quelle, um (statische) Relaxationsverluste von Schraubendruckfedern (SDF) abzuschätzen, in der entsprechenden Norm [1] hinterlegte Schaubilder, die vor über 50 Jahren bei weitestgehend unbekanntem Vorbehandlungs- und Versuchsbedingungen abgeprüft wurden. Nur spärlich vorhandene, neuere Untersuchungen wie in [7] sind aufgrund der nicht ausreichenden Variation der Versuchsparameter für eine zielgerichtete Optimierung ebenfalls ungeeignet.

Ziel des kürzlich abgeschlossenen Forschungsprojekts IGF 18992BR war es daher, eine Grundlage für die gezielte Optimierung und Vorhersage von Relaxation und Kriechen von Schraubenfedern (vornehmlich SDF) zu schaffen. Hierzu galt es die einzelnen Einflussgrößen zu separieren und deren Auswirkungen auf das Kriech- und Relaxationsverhalten von Drähten und daraus gefertigten Federn zu untersuchen. Der Großteil der experimentellen Untersuchungen setzte sich aus Kriech- und Relaxationsversuchen an Drähten sowie Relaxationsversuchen an SDF zusammen. Die betrachteten Drahtsorten umfassten dabei Federstahl aus ölschlussvergütetem (SiCr und SiCrV), patentiert gezogenem (Bleibad- und Stelmor-patentiert) sowie korrosionsbeständigem Material 1.4310 im Drahtdurchmesserbereich von 2 bis 6 mm – mit Schwerpunkt bei  $d = 3$  mm. Variierte Vorbehandlungsschritte waren u.a. die Wärmebehandlung nach der Kaltformgebung sowie die Spannung, mit der die Federn vorge-setzt (respektive „vortordiert“ bei Drähten) wurden.

## Einteilung von Kriechvorgängen

Kriecheffekte lassen sich in drei grundsätzliche Mechanismen unterteilen [2]:

- Versetzungskriechen (Versetzungen können Hindernisse/Blockierungen durch Klettern (Anlagern/Aussenden von Leerstellen) umgehen)
- Korngrenzengleiten (Aufeinandergleiten von Körnern)
- Diffusionskriechen (Wandern von Leerstellen im Material)



**Abbildung 1:**  
Qualitatives Verformungsmechanismusschaubild  
[2][3]

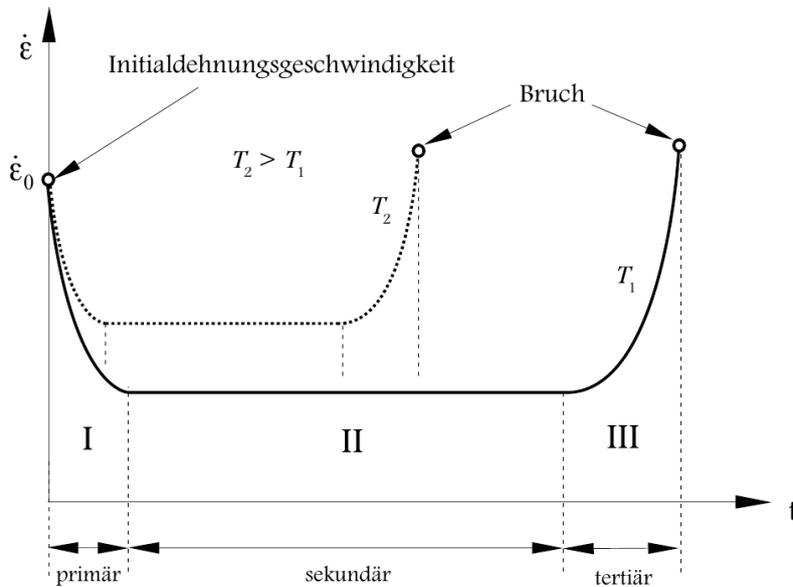
Im dargestellten ASHBY-Diagramm (**Abbildung 1**) wird die vorliegende Tangentialspannung auf den Schubmodul normiert und über dem Verhältnis der Kriech-/Relaxationstemperatur  $T$  zur Schmelztemperatur  $T_s$  dargestellt. Eine in der Literatur häufig genannte Temperaturgrenze bezogen auf die Schmelztemperatur  $T_s$ , oberhalb der metallische Werkstoffe zu kriechen beginnen, beträgt  $0,4 \cdot T_s$ .

Während dies für viele Metalle als Richtwert ausreichend ist, kann es für einige Materialien – zu denen auch Federstahladrähte gehören – jedoch bereits bei deutlich kleineren Temperaturen zu ausgeprägten Kriecherscheinungen kommen [4]. Federdrahtstähle können somit dem Niedrigtemperaturkriechen zugeordnet werden, welches im Bereich des Versetzungskriechens liegt.

Der zeitliche Verlauf von Kriechvorgängen wird üblicherweise mit Hilfe der sich einstellenden Kriechrate (Dehnungsgeschwindigkeit)  $\dot{\epsilon}$  dargestellt, die zu Beginn des Kriechvorgangs der Initialdehnungsgeschwindigkeit  $\dot{\epsilon}_0$  entspricht. Der Verlauf der Kriechrate, dargestellt in **Abbildung 2**, lässt sich in drei charakteristische Bereiche unterteilen, die von unterschiedlicher Dauer und praktischer Relevanz sind [2][5]:

- Primäres Kriechen (die zunächst hohe Kriechrate nimmt durch Verfestigungsprozesse immer weiter ab)
- Sekundäres Kriechen (die Kriechgeschwindigkeit nimmt einen Minimalwert an, dynamisches Gleichgewicht zwischen Ver- und Entfestigungsprozessen)
- Tertiäres Kriechen (Kriechrate nimmt aufgrund irreversibler Schädigungsprozesse immer weiter zu bis zum Bruch, in Praxis kaum von Bedeutung)

Die in **Abbildung 2** eingezeichnete Verschiebung dieser sogenannten «Kriechkurve» für höhere Temperaturen hin zu größeren Dehnungsbeträgen, entspricht in etwa auch dem Verhalten, das bei steigender Spannung zu beobachten ist.



**Abbildung 2:**  
Verlauf der Dehnungsgeschwindigkeit (Kriechrate) über der Zeit für Kriechprozesse bei konstanter Spannung [2]

Dabei ist zunächst der primäre Kriechbereich von Bedeutung, der sich unmittelbar an die elastische Verformung anschließt. Wie schnell dieser Bereich vom Nachfolgenden abgelöst wird, hängt neben dem betrachteten Werkstoff sowohl von der Umgebungstemperatur als auch von der vorhandenen mechanischen Spannung ab.

## Modellbildung

Zur mathematischen Beschreibung von Kriecheffekten – als Grundlage der Modellbildung und -anpassung – existieren verschiedene Ansätze. Die drei gebräuchlichsten wurden in [5] und [6] für den Beanspruchungsfall Torsion, der für Schraubenfedern den relevanten Beanspruchungsfall darstellt, formuliert. Hierauf basierend werden die Beziehungen des NORTON-BAILEY-Gesetzes, welches das mit Abstand am häufigsten verwendete Gesetz darstellt und mit dem ein großer Spannungs- und Temperaturbereich erfasst werden kann, genutzt und auf die erzielten Versuchsergebnisse angewandt. Für Kriechvorgänge an Drähten unter Torsionsbeanspruchung stellt sich eine mit der Zeit zunehmende Verdrehung des Drahts  $\varphi(t)$  ein, die gemäß

$$\varphi(t) = \frac{t^k}{k} \cdot l \cdot c_\tau \cdot \frac{2^{2m+3}}{d^{3m+4}} \cdot \left( \frac{M_t^0}{\pi} \cdot \frac{3m+4}{m+1} \right)^{m+1} \quad (1)$$

beschrieben werden kann [8].  $l$  steht dabei für die Länge des tordierten Drahtstücks,  $d$  für den Drahtdurchmesser und  $M_t^0$  für das zeitlich konstante Torsionsmoment, welches den Draht belastet.  $m$  und  $k$  sind kriechtechnische Konstanten, die material- bzw. versuchsabhängig sind und experimentell bestimmt werden müssen.  $k$  richtet sich nach der vorherrschenden Kriechphase (**Abbildung 2**) und nimmt in der sekundären Phase den Wert 1 an, wohingegen in der Primären  $0 < k < 1$  gilt. Die Variable  $m$  gibt Auskunft über den vorliegenden Kriechmechanismus. Für Diffusionskriechen ist  $m = 0$ , bei Korngrenzengleiten gilt  $0 < m < 1$  und beim Versetzungskriechen liegt  $m$  zwischen 3 und 6 (vgl. **Abbildung 1**) [5].  $c_\tau$  ist eine Hilfsgröße, die drei weitere materialabhängige Kriechkonstanten zusammenfasst. ihrerseits zudem noch von  $m$  und  $k$  abhängt sowie den Temperatureinfluss erfasst [8]:

$$c_{\tau}(k, m, T) = \frac{\bar{\gamma}}{\bar{t}^{k-1} \cdot \bar{\tau}^{m+1}} \cdot e^{\left(-\frac{Q_c}{R_c \cdot T}\right)} \quad (2)$$

In Gleichung 2 sind:

- $\bar{\gamma}$  – kriechtechnische Schiebungskenngröße
- $\bar{t}$  – kriechtechnische Zeitkenngröße [s]
- $\bar{\tau}$  – kriechtechnische Spannungskenngröße [Pa]
- $Q_c$  – Aktivierungsenergie von Kriechvorgängen [J/mol]
- $R_c$  – allgemeine Gaskonstante [1/mol K]
- $T$  – absolute Temperatur [K]

Werden hingegen Relaxationsvorgänge betrachtet, so gilt es das bei konstant gehaltenem Verdrehwinkel mit der Zeit abnehmende Torsionsmoment des Drahts  $M_t(t)$  zu beschreiben. Für Torsionsbeanspruchung liefert das NORTON-BAILEY-Kriechgesetz die hypergeometrische Funktion

$$M_t(t) = {}_2F_1\left(\frac{1}{m}, \frac{4}{m}; \frac{4+m}{m}; -\frac{c_{\tau} \cdot G \cdot \tau_0^m \cdot m \cdot t^k}{k}\right) \cdot M_t^0 \quad (3)$$

in Abhängigkeit des Torsionsmoments vor Beginn des Relaxationsvorgangs  $M_t^0$  [6].  $G$  steht hierbei für den Schubmodul und  $\tau_0$  für die maximale Schubspannung vor Beginn der Relaxation. Dieser Ausdruck lässt sich für bestimmte, feste Werte von  $m$  zu einer elementaren Gleichung vereinfachen. Im Rahmen der ausgewerteten Experimente hat  $m = 4$  zu einer guten Übereinstimmung zwischen Versuchsergebnissen und mathematischem Modell geführt. Die zugehörige, nun von  $m$  unabhängige Funktion lautet [8]:

$$M_t(t) = M_t^0 \cdot \frac{k}{3} \cdot \frac{\left(1 + \frac{4 \cdot c_{\tau} \cdot G \cdot \tau_0^4 \cdot t^k}{k}\right)^{\frac{3}{4}} - 1}{c_{\tau} \cdot G \cdot \tau_0^4 \cdot t^k} \quad (4)$$

$m = 4$  ist gleichbedeutend damit, dass der vorherrschende Kriechmechanismus das Versetzungskriechen ist, was mit Blick auf **Abbildung 1** angesichts der hohen vorhandenen Spannungsbeträge sinnvoll erscheint.

Für Schraubendruckfedern bedeutet Relaxation, dass die Feder um einen festen Federweg  $s$  gestaucht wird und in der Folge die axiale Federkraft  $F(t)$ , welche die Feder auf ihre Kontaktkörper ausübt, abnimmt. Die Federkraft und das den Draht belastende Torsionsmoment sind dabei direkt proportional zueinander und idealisiert (ohne Berücksichtigung der unsymmetrischen Torsionsspannungsverteilung im Drahtquerschnitt einer Schraubendruckfeder) in Abhängigkeit des mittleren Windungsdurchmessers  $D$  über die folgende Beziehung miteinander verknüpft:

$$F(t) = \frac{2M_t(t)}{D} \quad (5)$$

Aufgrund dessen besitzen die Zusammenhänge, die sich für Relaxationsvorgänge an Schraubendruckfedern mit konstantem Draht- und Windungsdurchmesser ergeben, eine sehr ähnliche Gestalt wie diejenigen für Drähte unter Torsionsbeanspruchung. Die allgemeine Funktion der mit der Zeit abnehmenden Federkraft  $F(t)$  in Abhängigkeit der vor dem Relaxationsvorgang vorliegenden Federkraft  $F_0$  lautet [5][6]:

$$F(t) = {}_2F_1\left(\frac{1}{m}, \frac{4}{m}; \frac{4+m}{m}; -\frac{c_{\tau} \cdot G \cdot \tau_0^m \cdot m \cdot t^k}{k}\right) \cdot F_0 \quad (6)$$

Für  $m = 4$  ergibt sich entsprechend [5][6]:

$$F(t) = F_0 \cdot \frac{k}{3} \cdot \frac{\left(1 + \frac{4 \cdot c_\tau \cdot G \cdot \tau_0^4 \cdot t^k}{k}\right)^{\frac{3}{4}} - 1}{c_\tau \cdot G \cdot \tau_0^4 \cdot t^k} \quad (7)$$

## Versuchsergebnisse und -auswertung

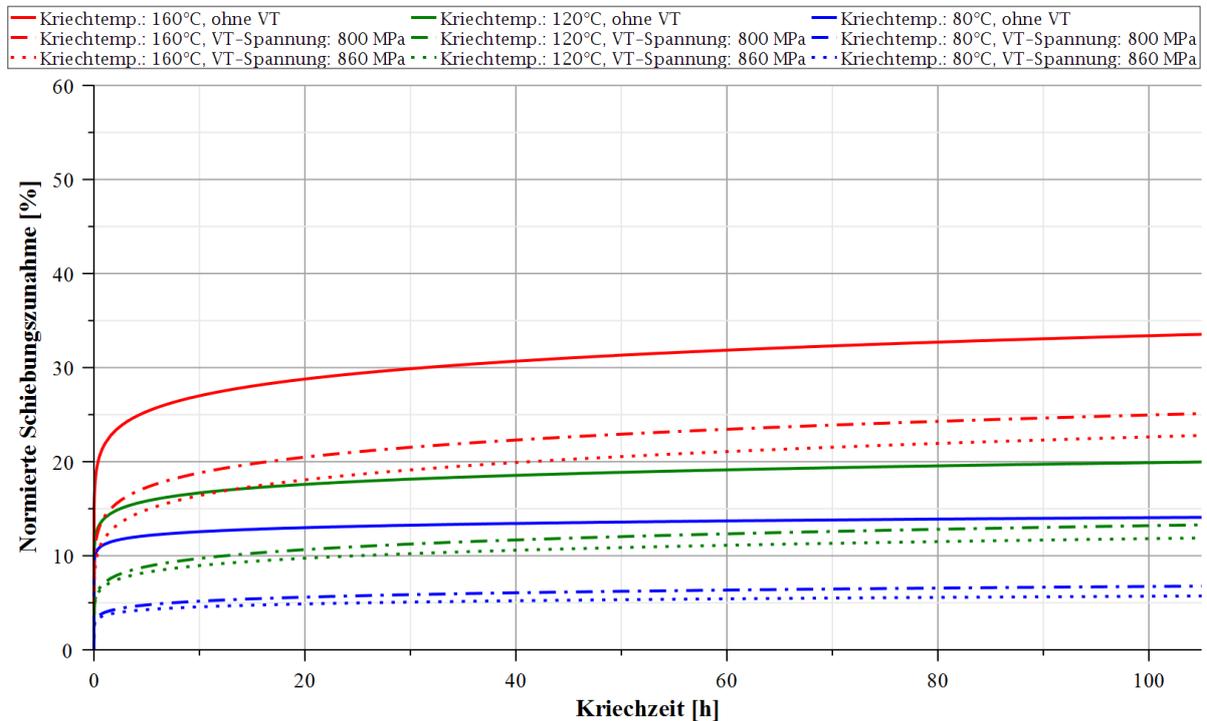
Im Rahmen der Versuchsauswertung hat sich das NORTON-BAILEY-Gesetz als sehr gut geeignet herausgestellt, um das Kriech- und Relaxationsverhalten von Federstählen bei Torsionsbeanspruchung abzubilden. Die entsprechenden Formulierungen des NORTON-BAILEY-Gesetzes aus dem vorherigen Abschnitt wurden im Laufe des Forschungsprojekts verwendet, um auf Basis der Versuchsergebnisse kriechtechnische Werkstoffkonstanten zu bestimmen und die Abhängigkeiten der einzelnen Einflussgrößen zu erfassen.

Den Schwerpunkt der experimentellen Untersuchungen stellten Kriechversuche am Ausgangsmaterial Draht dar, die mit einer speziell zu diesem Zweck konzipierten Kriechvorrichtung realisiert wurden (**Abbildung 3**). Hierbei wird die Verformungszunahme über der Kriechzeit annähernd kontinuierlich gemessen. **Abbildung 4** zeigt beispielhaft Kriechkurven des korrosionsbeständigen Drahtmaterials 1.4310 ( $d = 3 \text{ mm}$ ,  $200^\circ\text{C}/30\text{min}$  wärmebehandelt) für verschiedene Kriechtemperaturen und Vortorsionsspannungen als Ergebnis eines nichtlinearen Kurvenfits der Modellgleichung an die Messwerte.

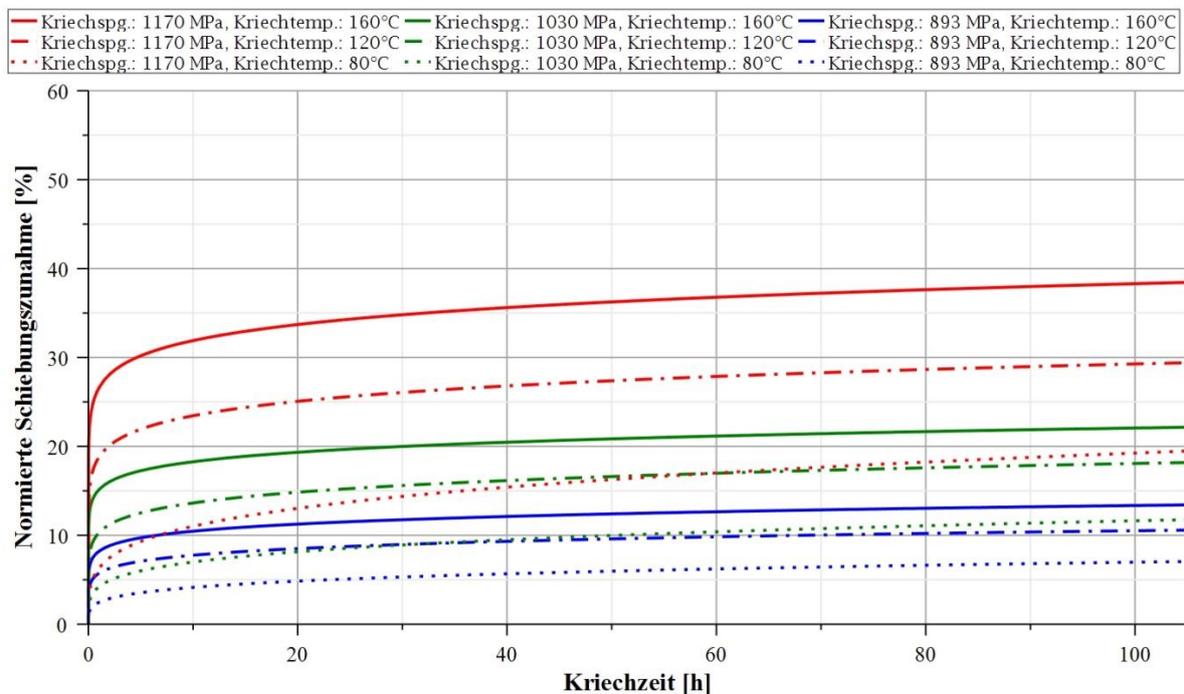


**Abbildung 3:**  
Kriechvorrichtung im Betrieb (Wärmekessel mit zu prüfenden Drähten geschlossen)

Zum einen erhöht sich die resultierende Kriechverformung mit steigender Kriechtemperatur, andererseits sinkt sie mit steigender Vortorsionsspannung, aufgrund des zunehmenden Betrags günstig gerichteter Eigenspannungen, die durch das Vortordieren (beanspruchen der Drähte über die Elastizitätsgrenze hinaus) eingebracht werden.



**Abbildung 4:** Kriechkurven des **1.4310-Drahts** ( $d = 3 \text{ mm}$ ), **200°C/30min** wärmebehandelt, unterschiedlich stark vortordiert, bei verschiedenen Kriechtemperaturen für eine **Kriechspannung von 686 MPa**

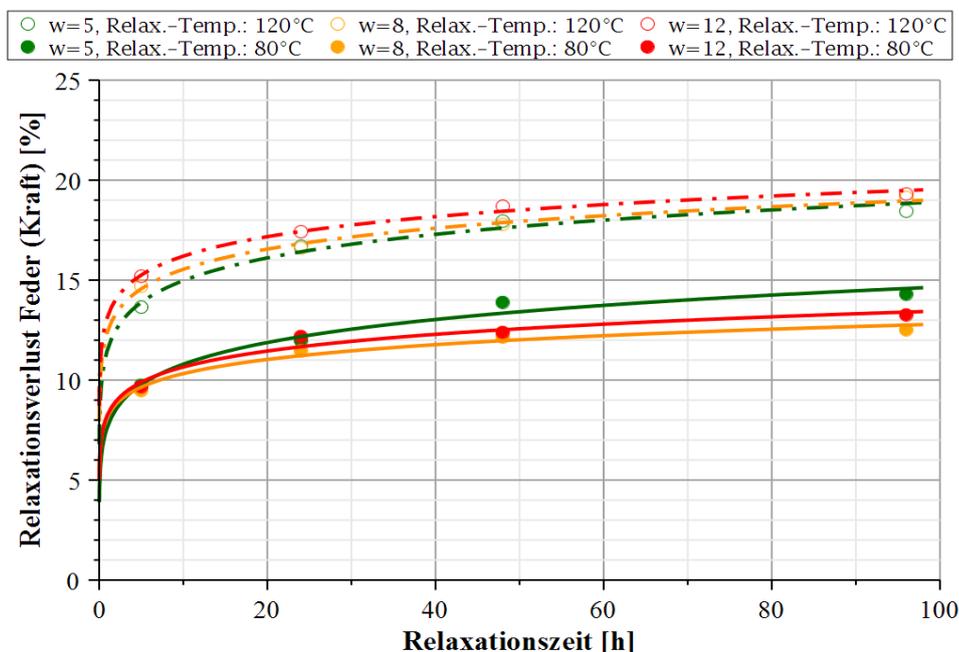


**Abbildung 5:** Kriechkurven eines **VDSiCrV-Drahts** ( $d = 3 \text{ mm}$ ), **350°C/30min** wärmebehandelt und mit **1450 MPa vortordiert** für verschiedene Kriechspannungen und -temperaturen

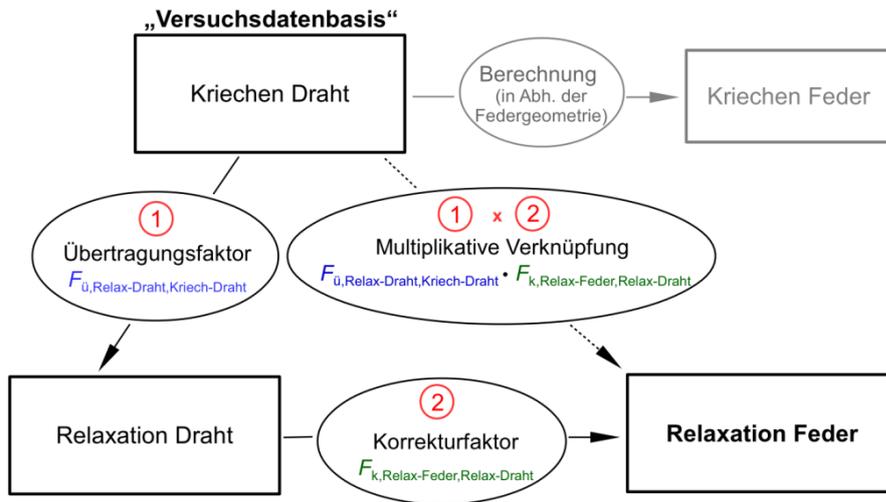
**Abbildung 5** zeigt Kriechkurven des SiCrV-Drahts ( $d = 3 \text{ mm}$ ,  $350^\circ\text{C}/30\text{min}$  wärmebehandelt) für verschiedene Kriechtemperaturen und -spannungen (unkorrigiert bzw. Nennspannungen). Die sich einstellende Kriechverformung nimmt für eine Erhöhung von beiden Größen zu, wobei der Einfluss der Kriechspannung überwiegt.

Ergänzende Relaxationsversuche für mehrere zeitliche Stützpunkte an identisch vorbehandelten Drähten und daraus gefertigten Federn unterschiedlicher Wickelverhältnisse (**Abbildung 6**) bildeten die Grundlage für eine Gegenüberstellung von Kriech- und Relaxationsparametern und damit für die Ermittlung von Übertragungsfaktoren (**Abbildung 7**). Unter anderem konnten die folgenden Erkenntnisse hinsichtlich des Einflusses von Geometrie und Vorbehandlung auf das Kriech- / Relaxationsverhalten von Drähten und Federn gewonnen werden:

- Bei ölschlussvergütetem und korrosionsbeständigem Material zeigte sich nahezu kein Einfluss des Drahtdurchmessers; bei patentiert gezogenem Material konnte grob zwischen dicken ( $d > 5\text{mm}$ ) und dünnen ( $d \leq 5 \text{ mm}$ ) Drähten unterschieden werden, wobei die dicken Drähte deutlich höhere Kriech-/Relaxationsverluste aufwiesen.
- Eine 30-minütige Wärmebehandlung (Temperatur je nach Material zwischen  $200^\circ\text{C}$  und  $420^\circ\text{C}$ ) von Drähten und Federn reduziert die sich einstellenden Verluste erheblich. Beim nicht-rostenden Material verringern sich die Verluste mit steigender Wärmebehandlungstemperatur nochmals signifikant.
- Das Kalt-Vorsetzen (respektive Kalt-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 (vgl. **Abbildung 6**).



**Abbildung 6:** Relaxationskurven von  $250^\circ\text{C}/30\text{min}$  wärmebehandelten und auf  $1200 \text{ MPa}$  vorgesetzten SDF aus **Pb-pat.**-Draht ( $d = 3 \text{ mm}$ ) verschiedener Wickelverhältnisse und bei verschiedenen Relaxationstemperaturen für eine (unkorrigierte) Relaxationsspannung von  $1000 \text{ MPa}$

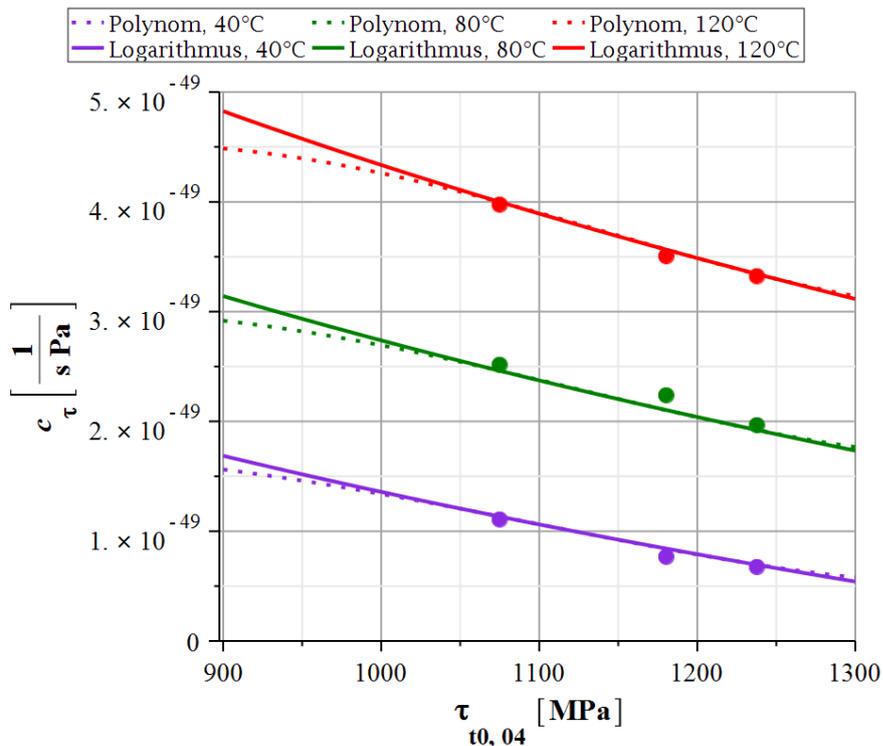


**Abbildung 7:** Vorgehensweise zur Übertragung von Kriechparametern für das Kriechen von Federstahldrähten auf Kriechparameter für die Relaxation und das Kriechen von Schraubendruckfedern

Insgesamt konnten die Kriechprozesse bei sämtlichen untersuchten Federstahldrähten und den daraus gefertigten SDF dem Kriechmechanismus Versetzungskriechen ( $m = 4$ , speziell: Niedrigtemperaturkriechen) und der primären Kriechphase ( $k < 1$ ) zugeordnet werden. Weiterhin wurde jeder Kombination aus Drahtsorte und Wärmebehandlung über einen Iterationsprozess auch ein fester Wert für  $k$  zugewiesen, was die Voraussetzung für die nachfolgend beschriebenen Parametrisierungen ist.

### Ableitung von Relaxationsschaubildern und Berechnungsvorschriften

Aufbauend auf den untersuchten Vortorsions- und Kriech-/Relaxationstemperaturniveaus wurden für alle untersuchten Drahtsorten mit ihren jeweiligen Wärmebehandlungsniveaus Gesetzmäßigkeiten bezüglich des zusammenfassenden Kriechparameters  $c_{\tau}$  abgeleitet, um die Abhängigkeit der Kriechverformung / Relaxationsverluste von diesen Einflussgrößen formelmäßig erfassen und damit auch die

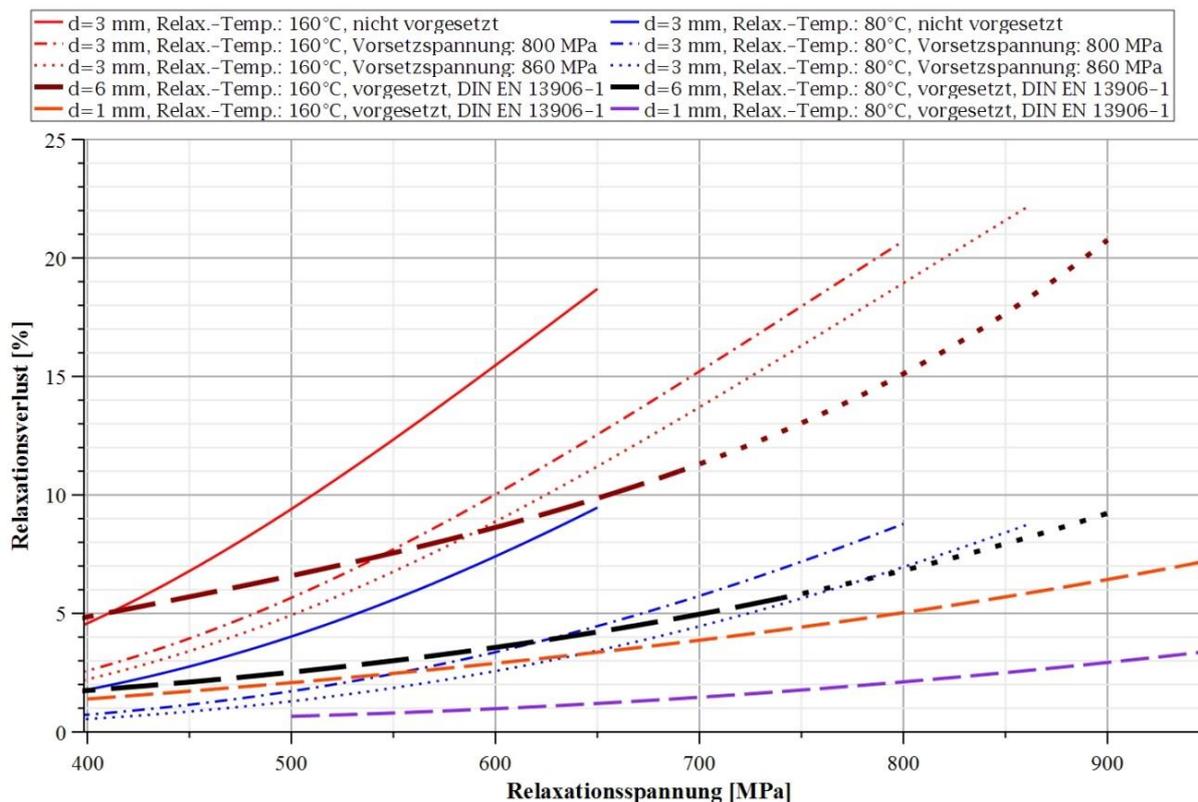


**Abbildung 8:** Kriechparameter  $c_{\tau}$  über  $\tau_{t0,04}$  für verschiedene Kriechtemperaturen zusammen mit Kurven verschiedener Ansatzfunktionen (beispielhaft für eine Drahtsorte-Wärmebehandlungs-Kombination)

zugehörigen Zwischenbereiche in guter Näherung beschreiben zu können (Kriech-/Relaxationszeit sowie -spannung sind direkte Eingangsgrößen in das math. Modell). **Abbildung 8** zeigt dies beispielhaft für die Vortorsionsspannung in Form der sich nach dem Vortordieren einstellenden Torsionsfließgrenze  $\tau_{t0,04}$ . Auch ist es auf diese Weise möglich über die untersuchten Bereiche der Vortorsion und der Versuchsbedingungen hinaus zu extrapolieren und auch hierfür Kriech- und Relaxationsschätzwerte zu generieren.

Für die direkte Möglichkeit der praktischen Anwendung der Forschungsergebnisse wurden u.a. Relaxationsschaubilder nach 48h Relaxationszeit – entsprechend der Darstellung der Norm als Funktion der Relaxationsspannung – für SDF aller untersuchten Drahtsorten und ihrer jeweiligen Vorbehandlungen für unterschiedliche Relaxationstemperaturen sowie Unterteilung in verschiedene Drahtdurchmesserbereiche abgeleitet. Damit ist zudem die Möglichkeit gegeben, die Schaubilder der Norm hinsichtlich der Vorbehandlung der dort verwendeten Federn besser einordnen und Abweichungen im Vergleich zu heutigen Werkstoffen aufzeigen zu können (beispielhaft dargestellt in **Abbildung 9** für den 1.4310-Draht mit einer 200°C/30min-Wärmebehandlung). Weiterhin wurden auch in der Norm nicht abgedeckte Relaxationsbedingungen untersucht, womit sich erstmals auch zu diesen Bereichen fundierte Aussagen zum Relaxationsverhalten von SDF treffen lassen.

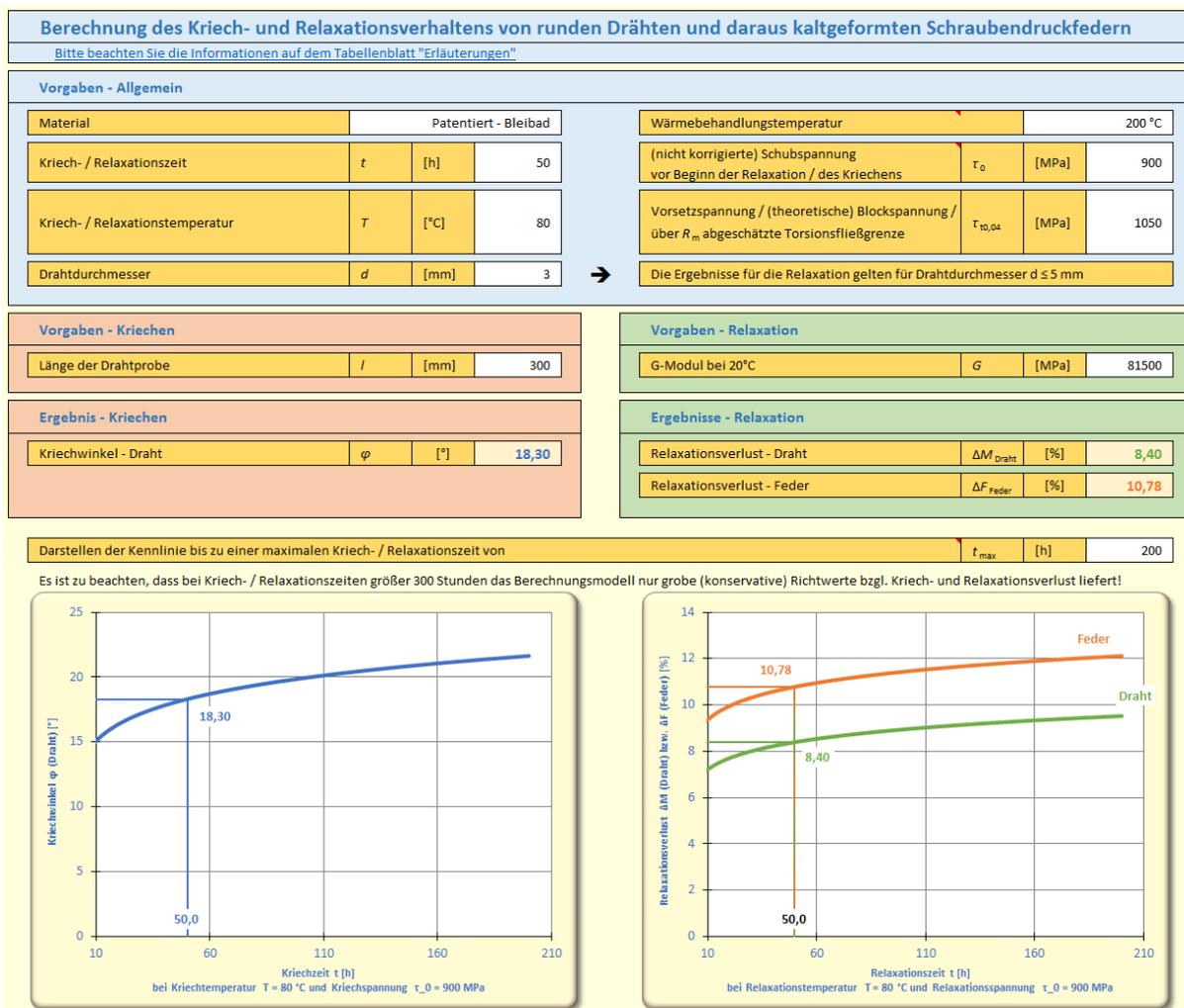
Zusätzlich entstanden erstmals Relaxationsschaubilder in neuen Darstellungsformen: über der Relaxationszeit (bis zu 1500h) und über der Relaxationstemperatur – jeweils für verschiedene, konstante Beiträge der übrigen Einflussfaktoren.



**Abbildung 9:** Vergleich des Relaxationsverlusts von berechneten mit Normkurven (in Abhängigkeit der Relaxationsspannung für Schraubendruckfedern aus 1.4310-Draht mit einer Wärmebehandlung von 200°C/30min nach einer Relaxationszeit von 48h für verschiedene Relaxationstemperaturen)

Die den Schaubildern zugrunde liegenden Berechnungsvorschriften wurden schließlich in einem einfach zu bedienenden EXCEL-Berechnungstool gebündelt. Hier wird in Abhängigkeit der Eingabewerte (Drahtsorte und -durchmesser, Vorbehandlung, ...) ein Schätzwert für den zu erwartenden Kriech- bzw. Relaxationsverlust ausgegeben sowie graphisch als Funktion von Kriech-/Relaxationszeit, -temperatur und -spannung dargestellt – erneut jeweils für verschiedene, konstante Beträge der übrigen Einflussfaktoren. **Abbildung 10** zeigt einen Ausschnitt aus der Benutzeroberfläche.

Auf einem höheren Abstraktionslevel wurden die gewonnen Erkenntnisse hinsichtlich einer möglichst geringen Neigung zur Relaxation von SDF in einer bewusst einfach gehaltenen Empfehlungstabelle zusammengefasst, die einen Beitrag zur Optimierung des Kriech- und Relaxationsverhaltens bei der Fertigung und Nachbehandlung von Schraubendruckfedern leisten kann (**Tabelle 1**) [8].



**Abbildung 10:** Ausschnitt der Benutzeroberfläche des im Rahmen des Forschungsprojekts IGF 18992BR entwickelten EXCEL-Tools zur Berechnung von Relaxationsverlust und Kriechverformung verschiedener Sorten Federstahldraht und Schraubendruckfedern

**Tabelle 1: Empfehlungen hinsichtlich günstigen Kriech- und Relaxationsverhaltens in Abhängigkeit der Drahtsorte**

VDSiCr / VDSiCrV		1.4310	
(Für sämtliche Relaxationsspannungs/-temperaturbereiche gültig)		(Für sämtliche Relaxationsspannungs/-temperaturbereiche gültig)	
<b>Wärmebehandlung:</b>	350°C/30min	<b>Wärmebehandlung:</b>	400°C/30min
<b>Vorspannung:</b>	so hoch wie möglich wählen	<b>Vorspannung:</b>	so hoch wie möglich wählen

Bleibad-/Stelmor-patentiert		
<b>Vorspannung:</b> so hoch wie möglich wählen		
für vorgesetzte Federn		
$T_{\text{Relax}} = 40^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{Relax}} = 80^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{Relax}} = 120^{\circ}\text{C}$
Wärmebehandlung: 200°C/30min	Wärmebehandlung: 200°C/30min <b>oder</b> 250°C/30min	Wärmebehandlung: 250°C/30min

**Anmerkung:** Tabelle basierend auf den im Rahmen des Projekts untersuchten Vorspannungs- und Wärmebehandlungsniveaus;

Vorspannung max. bis:  $\tau_{\text{vorgesetzte Feder}}/R_m \approx 0,65$  möglich und sinnvoll!

## Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsprojekts IGF 18992BR wurde eine Vielzahl von Kriech- und Relaxationsversuchen an Drähten verschiedener Federstahlsorten und daraus gefertigten Schraubendruckfedern unter Torsionsbeanspruchung durchgeführt. Die Versuchsergebnisse wurden mit Hilfe eines mathematischen Modells hinsichtlich der Bestimmung kriechtechnischer Materialkonstanten ausgewertet. Diese konnten auf Basis geeigneter Ansatzfunktionen für die verschiedenen Einflussgrößen verallgemeinert werden, was die Generierung von Berechnungsvorschriften und Relaxationsschaubildern ermöglichte. In diesen beiden aufbereiteten Darstellungsformen sind die Ergebnisse des Forschungsprojekts sowohl für Draht- und Federhersteller als auch für Federanwender direkt nutzbar. Zudem ist so eine mögliche Grundlage zur Weiterentwicklung vorhandener Normen und Standards gegeben.

Das IGF-Vorhaben 18992BR 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 Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Langfassung des Abschlussberichtes kann bei der FSV, Goldene Pforte 1, 58093 Hagen, angefordert werden.

## Literatur

- [1] DIN EN 13906 Teil 1-3: Zylindrische Schraubenfedern aus runden Drähten und Stäben. Berechnung und Konstruktion Teil 1: Druckfedern, Teil 2: Zugfedern; Teil 3: Drehfedern. 11/2013
- [2] Rösler, J., Harders H., und Bäker, M.: Mechanisches Verhalten der Werkstoffe, 4., überarbeitete und erweiterte Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013
- [3] Ashby M. F., und Frost H. J.: Deformation-Mechanism Maps – The Plasticity and Creep of Metals and Ceramics, URL: <http://engineering.dartmouth.edu/defmech/>, Zugriffsdatum: 20.06.2017
- [4] Graves, G.B. und O'Malley, M.: Relaxation bei Schraubendruckfedern, Draht 34 – Nr. 3, S. 109–112, 1983

- [5] Kobelev, V: Mathematisches Modell für das Kriechen und Relaxation von Federn, Ilmenauer Federntag, Forschungsgruppe Draht und Federn der TU Ilmenau, Ilmenau, 2015
- [6] Kobelev, V.: Relaxation and creep in twist and flexure, Multidiscipline Modeling in Materials and Structures 10, Nr. 3, S. 304–323, Oktober 2014
- [7] Kaiser, B.: Ermittlung von Dauerfestigkeits- und Relaxationsschaubildern für hochbeanspruchte Schraubendruckfedern. Abschlussbericht zum gleichnamigen AiF-Projekt 12287N. TU Darmstadt, 2002
- [8] Schleichert, J. und Kletzin, U.: Kriech- und Relaxationsverhalten von Federstahldrähten in Schraubenfedern. Abschlussbericht zum gleichnamigen AiF-Projekt IGF 18992BR. TU Ilmenau, 2018

Technische Universität Ilmenau  
Institut für Maschinen- und Gerätekonstruktion  
Fachgebiet Maschinenelemente  
Max-Planck-Ring 12  
98693 Ilmenau  
Ansprechpartner: Johannes Schleichert  
Tel.: +49 3677 69-1258  
[johannes.schleichert@tu-ilmenau.de](mailto:johannes.schleichert@tu-ilmenau.de)  
[stz-federn@tu-ilmenau.de](mailto:stz-federn@tu-ilmenau.de)  
[www.tu-ilmenau.de/maschinenelemente](http://www.tu-ilmenau.de/maschinenelemente)