

Liebermann, Kersten :

Optimierung von Schraubendruckfedern

Publikation entstand im Rahmen der Veranstaltung:
Seminar Kaltgeformte Federn - Vortrag 10. Technische Akademie
Esslingen. Ostfildern-Nellingen, 25. und 26. September 2006 -
Leitung: Prof. Dr.-Ing. habil. Hans-Jürgen Schorcht

Optimierung von Schraubendruckfedern

Inhalt

1	Einführung	2
2	Rechnerunterstütztes Dimensionieren und Optimieren von Schraubenfedern durch Extremwertermittlung von Federparametern.....	3
2.1	Grundlagen.....	3
2.2	Parameteranalyse als diskretes Dimensionierungsverfahren.....	5
2.3	Dimensionieren von Schraubendruckfedern mittels Parameteranalyse.....	5
2.4	Federdimensionierungsprogramm FedPro.....	8
3	Federrelevante Drahtkennwerte und ihr Nutzen für die Federdimensionierung und -fertigung.....	9
3.1	Verwenden von Messwerten für $\tau_{0,04}$ anstelle des τ / R_m – Verhältnisses	10
3.2	Berücksichtigung des Ausgangszustandes des Federstahldrahtes und des Einflusses der Fertigungsschritte bei der Federherstellung auf die Federeigenschaften	11
3.3	Bestimmen der beim Winden zu erreichenden Federlänge L_0 zum Ausgleichen der Setzverluste beim Fertigungsschritt Vorsetzen	13
4	Einfluss der End- und Übergangswindungen auf die Eigenschaften von Schraubendruckfedern.....	15
5	Zusammenfassung	18
6	Literatur	18

1 Einführung

Steigende Anforderungen an Schraubenfedern, z.B. bzgl. statischer und dynamischer Festigkeit oder dem Langzeitverhalten, der Wunsch des Kunden, Masse und Bauraum zu sparen, verlangen von den Federherstellern immer größere Anstrengungen.

Die Federdimensionierung dient als Grundlage der Federfertigung. Sie legt sowohl die Federgeometrie als auch die Werkstoffdaten fest, um eine geforderte Kraft-Weg-Kennlinie (Federfunktion) zu erreichen, aber auch die Angaben zur Federfertigung. Dimensionierungs- und Fertigungsprozess zeichnen sich in vielen Fällen durch einen iterativen Handlungsablauf aus. So ist es aufgrund der mathematischen Grundlagen nicht möglich, die Geometriewerte einer Schraubenfeder in einem einzigen Berechnungsdurchlauf zu ermitteln. Ebenso wird der Federherstellungsprozess durch das Fertigen von Musterfedern eingerichtet, um z.B. durch Winden längerer Federn den Verlust an Länge beim Fertigungsschritt „Vorsetzen“ zu kompensieren. Dieser Fertigungsschritt ist u.a. auch für die Fertigung von Federn mit größerem Energiespeichervermögen oder für Federn mit verringertem Materialeinsatz notwendig [1] [28].

Die Vermeidung des iterativen Ablaufs bei der Federdimensionierung durch Verwendung entsprechender Software und die Reduzierung des Aufwandes im Musterungsprozess durch Kenntnis der Eigenschaften und des Verhaltens des Federdrahtes bei Durchlaufen der Fertigungsschritte bei der Federherstellung führen zu beträchtlichen Kostensenkungen.

Darüber hinaus gibt es weitere Möglichkeiten, die Qualitätseigenschaften von Schraubenfedern zu verbessern und den Herstellungsprozess zu optimieren. Dieser Beitrag stellt einige Vorschläge genauer vor, wobei auch auf aktuelle Forschungsergebnisse zurückgegriffen wird:

1. Moderne Rechentechnik und speziell für die Schraubenfederdimensionierung erstellte Programme können die bei der Federdimensionierung iterative Vorgehensweise übernehmen, die notwendig ist, weil zur Berechnung aller Federparameter nur zwei unabhängige Bestimmungsgleichungen (s. Gl.(1) und Gl.(2)) zur Verfügung stehen. Die Software ist dabei so zu gestalten, dass auch die Optimierung der Federn nach beliebigen Kriterien erfolgen kann.
2. Die unter Punkt 1 verwendeten klassischen Bestimmungsgleichungen beinhalten eine Reihe vereinfachender Vereinbarungen. Eine Verbesserung dieser Bestimmungsgleichungen kann bspw. durch das Berücksichtigen aller in der Feder auftretenden Spannungsanteile erreicht werden (neben Torsion auch Biegung, Zug und Schubspannung senkrecht zur Drahtachse) [2].
3. Die messtechnische Ermittlung und rechentechnische Aufbereitung der federrelevanten Drahtkennwerte und ein genaueres Verständnis der Fertigungsschritte bei der Draht- und Federherstellung erlauben eine bessere Beurteilung der Draht- und damit der Federeigenschaften, was sich in einer besseren Federqualität widerspiegelt. Grundlagen hierfür sind u.a.:
 - Verwenden von Messwerten für die Torsionsfließgrenze τ_{F} zur Bestimmung der zulässigen Torsionsspannung τ_{zul} ;
 - Verwenden von kompletten, messtechnisch ermittelten Torsionsspannungs-Schiebungs-Kennlinien z.B. zur Nachbildung des Werkstoffverhaltens in FEM-Berechnungen oder auch zur Berechnung des Setzverlustes beim Fertigungsschritt „Vorsetzen“ während der Federherstellung;
 - Verwenden einer realen, meist nicht-linearen Federkennlinie durch Berücksichtigen des Anlegens der Übergangswindungen $n_{\text{Ü}}$ bei Belastung der Feder.

2 Rechnerunterstütztes Dimensionieren und Optimieren von Schraubendruckfedern durch Extremwertermittlung von Federparametern

2.1 Grundlagen

Grundlage jeder Dimensionierung ist ein mathematisches Modell, das den funktionellen Zusammenhang verschiedener Parameter eines Objektes beschreibt. Die Dimensionierung bzw. Optimierung beinhaltet das Finden einer Kombination dieser Parameter, damit das Objekt eine gegebene Aufgabenstellung erfüllen kann [4]. Dieses Finden erfolgt durch Anwendung geeigneter Algorithmen. Der Unterschied von Dimensionierung und Optimierung liegt nur im Abbruchkriterium der Berechnung. Beim Dimensionieren reicht das Finden **einer zulässigen Lösung** für die Parameterkombination aus. Bei der Optimierung möchte man die **beste Lösung** (beste Parameterkombination) ermitteln, mit der der Wert eines gewählten Kriteriums seinen günstigsten Wert erreicht.

Bei der Federdimensionierung werden vom Konstrukteur fast immer die Funktionsgrößen (Federkräfte F , -wege s , -längen L , Federrate R) vorgegeben und damit die funktionellen Charakteristika der Feder (Kraft-Weg-Zusammenhang $F = fkt(s)$) festgelegt. Aufgabe der Dimensionierung ist es, sowohl die Werkstoff- und Gestaltparameter zu bestimmen, als auch fertigungstechnische Aspekte zu berücksichtigen, mit denen die Feder die geforderte Funktion erfüllen kann [5]. Weiterhin besteht vielfach die Forderung, die Feder für ein bestimmtes Kriterium zu optimieren.

Für die Dimensionierung von Schraubendruckfedern bedeutet dies, dass ein Berechnungsmodell benötigt wird, welches das Gebilde Schraubendruckfeder beschreibt. Mit Hilfe von Algorithmen kann dieses Berechnungsmodell gelöst werden.

Das Modell der Schraubendruckfeder stützt sich auf die zwei bekannten Bestimmungsgleichungen

$$\text{– Funktionsnachweis} \quad R = \frac{F}{s} = \frac{G \cdot d^4}{8 \cdot n_f \cdot D^3} = konst. \quad (1)$$

$$\text{– und Festigkeitsnachweis} \quad \tau_t = \frac{8 \cdot D \cdot F}{\pi \cdot d^3} \leq \tau_{t \text{ zul}}, \quad (2)$$

die aber nicht ausreichen, die Gestaltparameter:

- Drahtdurchmesser d ;
- Windungsdurchmesser D ;
- Anzahl der federnden Windungen n_f und
- Federlänge L_0

in einem Berechnungsgang festzulegen. Zusätzlich müssen bei der Dimensionierung das verwendende Material und damit der G-Modul festgelegt sowie Plausibilitätstests durchgeführt und Restriktionen berücksichtigt werden (Bild 1).

Unter Federdimensionierung wird deshalb der Vorgang verstanden, bei dem für die Parameter d , D und n_f Werte ermittelt werden, die dem Funktions- und Festigkeitsnachweis genügen. Bei der Federoptimierung muss als zusätzlich berücksichtigt werden, dass mit den Parameterwerten für einen oder mehrere andere Federparameter ein Extremwert erreicht wird.

Vorschläge für Optimierungsziele sind in [6], [7] [8] aufgeführt. Die wichtigsten sind:

- die minimale Federmasse (das minimale Federvolumen);
- das minimale Einbauvolumen;
- die maximale Energie bei vorgegebenem Volumen;
- die minimale Auswirkung von Toleranzen;
- die maximale Knicksicherheit;
- die maximale Schalthäufigkeit;
- die maximale Lebensdauer;
- die minimale Einbaulänge L_1 und
- die minimale Blockfederlänge L_c .

All diese Punkte führen zwangsläufig zu einem mehrmaligen Durchlaufen der sogenannten „Gestaltungsphase“ nach Bild 2. Dabei handelt es sich um einen Begriff aus der Konstruktionslehre, der einen bestimmten Entwicklungszyklus innerhalb des konstruktiven Entwicklungsprozesses beschreibt [9], [10], [11].

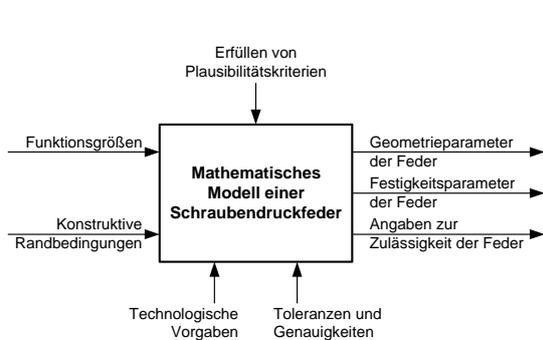


Bild 1: Darstellung des mathematischen Modells einer Schraubendruckfeder als Black-Box

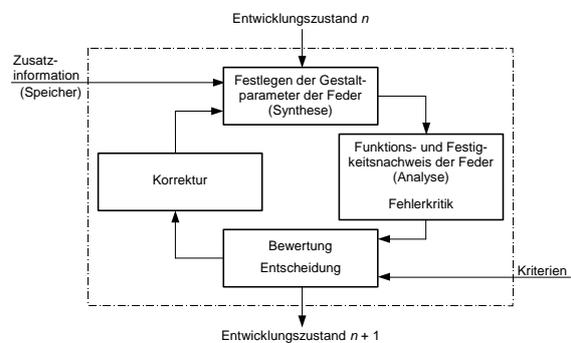


Bild 2: Entwicklungszyklus innerhalb der „Gestaltungsphase“ [10]

Für den Konstrukteur bedeutet das einen mehrmaligen Wechsel von Synthese- und Analysetätigkeiten. Das beinhaltet auch das Treffen von Entscheidungen zum Fortgang der Dimensionierung. Selbst wenn für die Dimensionierung Hilfsmittel wie Nomogramme, Federrechen-schieber oder eine spezielle Software eingesetzt werden, benötigt der Konstrukteur für eine effektive Entscheidungsfindung zumeist gute Kenntnisse des mathematischen Modells der Feder und unter Umständen auch des Berechnungs- bzw. Bedienalgorithmus des Hilfsmittels. Das Optimieren der Gestaltparameter zum Erzielen eines Maximums oder Minimums für ein bestimmtes Kriterium erhöht zudem den Arbeitsaufwand beträchtlich.

Beispiele zum Aufstellen der Berechnungsmodelle und der Entwicklung der zugehörigen Berechnungsalgorithmen für Schraubenfedern sind in der Literatur zahlreich beschrieben, wobei sich zwei grundsätzliche Lösungsansätze unterscheiden lassen:

Lösungsansatz 1:

Der Konstrukteur muss zunächst einen zusätzlichen Parameter vorgeben, der in der weiteren Berechnung gegebenenfalls angepasst wird. Die Autoren diverser Literaturstellen gehen häufig von einem speziellen Einsatzfall der Feder aus, dessen Gegebenheiten ihnen das Vorgeben eines zusätzlichen Parameters, meist in Form einer Restriktion (z. B. Einbauraum), ermöglicht. Beispiele hierfür sind in Tafel 1 aufgeführt.

Tafel 1: Beispiele für Parameter, die bei der Dimensionierung von Schraubendruckfedern vom Konstrukteur zusätzlich vorzugeben sind

Vorzugebender Parameter	Referenz- bzw. Literaturstelle
Windungsdurchmesser D	[12], [13]
Drahtdurchmesser d	[14]
Wickelverhältnis $w = D / d$	[15]
Äußerer Windungsdurchmesser D_e	[16], [17], [18]
Hülsendurchmesser D_H	[19], [20]

Charakteristisch für diesen Lösungsansatz ist der große Anteil manueller Arbeit für den Konstrukteur, die z.B. das Überprüfen verletzter Restriktionen und eine Nachrechnung beinhaltet.

Lösungsansatz 2:

Neben der Forderung der Funktionserfüllung der Feder soll diese häufig auch für ein oder mehrere Kriterien optimiert werden. Hierzu werden **Parameteroptimierungsverfahren** eingesetzt, deren Ablauf prinzipiell das systematische Variieren der Federparameter und das Überprüfen der Restriktionen beinhaltet. Der dazu erforderliche Rechenaufwand ist nur selten von Hand zu bewältigen, weshalb dieser Lösungsansatz sinnvollerweise immer einer rechen-technischen Umsetzung bedarf.

2.2 Parameteranalyse als diskretes Dimensionierungsverfahren

Prinzipiell können beide Lösungsansätze rechentechnisch umgesetzt werden, aber nur mit dem Einsatz eines Parameteroptimierungsverfahrens als Berechnungsalgorithmus ist eine effektive Dimensionierung optimal ausgelegter Feder möglich. Eine Analyse der bislang verwendeten Algorithmen führte zu zwei Fragen:

1. Warum wird in den meisten Dimensionierungsmodellen und -algorithmen der Drahtdurchmesser d berechnet und dann ein Normwert gesucht?
2. Warum werden zur Parameteroptimierung zumeist kontinuierliche (z. B. stochastische) Verfahren verwendet und nicht diskrete?

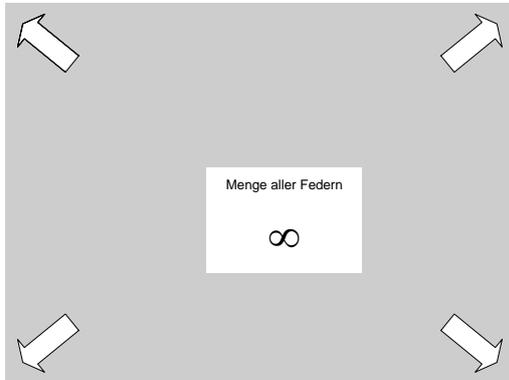
Die Antwort auf diese Fragen lautet, dass die Rechentechnik bisher nicht leistungsfähig genug war. In den letzten Jahren hat die Rechentechnik jedoch große Fortschritte erzielt. Dies erlaubt es, über andere Ansätze und damit andere Algorithmen für die Federdimensionierung nachzudenken. So ist es jetzt möglich, die sogenannte Parameteranalyse als Berechnungsalgorithmus einzusetzen. Dieses Verfahren berechnet alle Lösungen einer Lösungsmenge und wird deshalb auch als vollständige Enumeration [21] bezeichnet. Es zählt zu den Verfahren der ganzzahligen Optimierung. Liegen alle Parameter für die Dimensionierung in kontinuierlicher Form vor, entsteht eine unendliche Lösungsmenge. Existieren jedoch Parameter in diskreter Form, und das ist im Maschinenbau durch das Verwenden von Normen und Baureihen gegeben, dann ergibt sich eine endliche Lösungsmenge. Die Kenntnis aller Lösungen und das Definieren von Suchkriterien gestatten es, für eine gegebene Aufgabenstellung eine geeignete Lösung (Feder) zu finden.

2.3 Dimensionieren von Schraubendruckfedern mittels Parameteranalyse

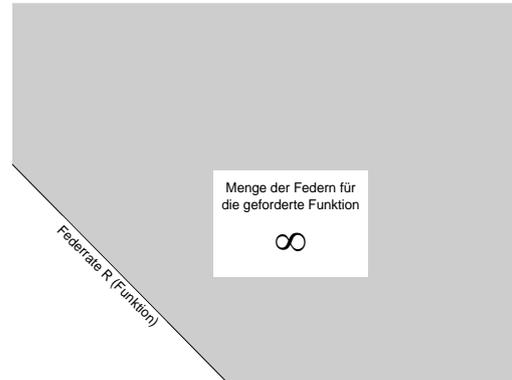
In der Federdimensionierung ist es üblich, mit kontinuierlichen Werten für die Federparameter zu rechnen. So wird häufig unter Verwendung von Annahmen für den Windungsdurchmesser D der Drahtdurchmesser d nach Gleichung (3) ausgerechnet:

$$d = \sqrt[3]{\frac{8}{\pi} \cdot \frac{F \cdot D}{\tau_{zul}(d)}} \tag{3}$$

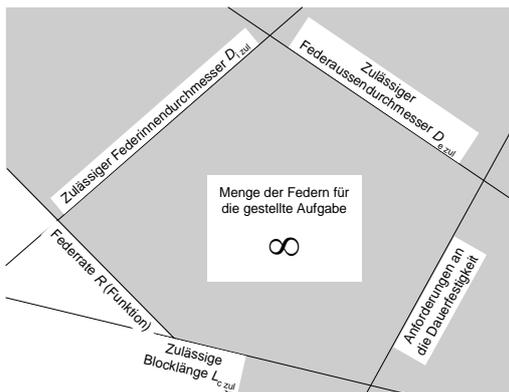
Anschließend wird ein genormter Drahtdurchmesser d ausgewählt und eine Nachrechnung durchgeführt. Auch wenn jetzt noch weitere Randbedingungen berücksichtigt werden, ist die vorhandene Lösungsmenge unendlich, solange zu restriktive Randbedingungen nicht zu einer leeren Lösungsmenge führen (Bild 3 Phase 1 bis 3).



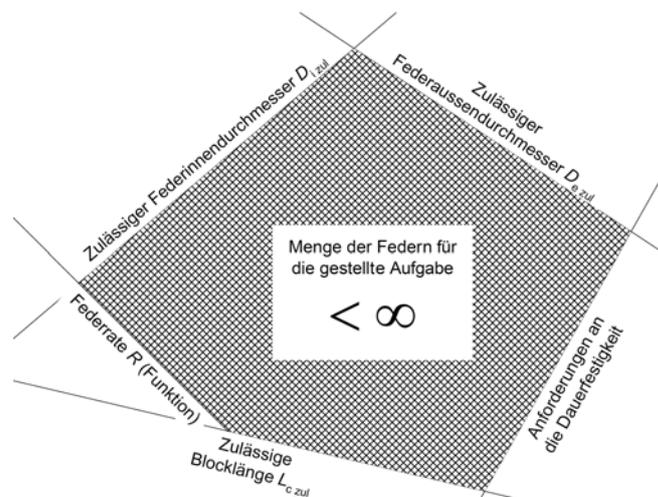
Phase 1: Die Lösungsmenge umfasst alle Federn, auch die nicht tauglichen.



Phase 2: Der von der Feder geforderte Kraft-Weg-Zusammenhang verkleinert die Lösungsmenge.



Phase 3: Weitere Randbedingungen grenzen die Menge der für die gestellte Aufgabe zulässigen Federn weiter ein. Die Lösungsmenge ist aber immer noch unendlich.



Phase 4: Durch Diskretisierung von Federkennwerten, wie den Drahtdurchmesser d und die Anzahl der federnden Windungen n_f ergibt sich eine endliche Lösungsmenge. Jeder Schnittpunkt der Schraffur symbolisiert eine zulässige Feder.

Bild 3: Eingrenzen der Lösungsmenge bei der Federdimensionierung

Die Diskretisierung der für die Federdimensionierung notwendigen Kennwerte führt zu einer endlichen Menge an zulässigen Federn, da nicht mehr jeder theoretisch denkbare Wert für die Federparameter verwendet wird (Bild 3 Phase 4).

Für die Auslegung von Schraubendruckfedern führen obige Aussagen zu folgenden Überlegungen. Gemäß Abschnitt 2.1 besteht das Ziel der Federdimensionierung darin, die Geometrieparameter d , D und n_f so festzulegen, dass die Feder eine geforderte Federrate R besitzt. Die Federrate ist damit als Konstante zu betrachten. Dies gilt auch für den Gleitmodul G^1 , da das zu verwendende Drahtmaterial in der Regel vor der Dimensionierung festzulegen ist. Zur Bestimmung von R dient Gl. (1), deren Umstellen zu drei möglichen Funktionen führt (Tafel 2).

Tafel 2: Mögliche Funktionen für die Parameteranalyse zum Dimensionieren von Schraubendruckfedern

	Vorgegebene, diskrete Parameter	Funktionen für Parameteranalyse
Variante 1	d, n_f	$D = \sqrt[3]{\frac{G \cdot d^4}{8 \cdot n_f \cdot R}} \quad (4)$
Variante 2	d, D	$n_f = \frac{G \cdot d^4}{8 \cdot R \cdot D^3} \quad (5)$
Variante 3	D, n_f	$d = \sqrt[4]{\frac{8 \cdot n_f \cdot D^3 \cdot R}{G}} \quad (6)$

Soll zum Lösen einer Gleichung die Parameteranalyse angewendet werden, darf der Term auf der rechten Seite des Gleichheitszeichens in den Gleichungen aus Tafel 2 nur Konstanten oder diskrete Parameter beinhalten.

Prinzipiell sind alle drei Varianten für die Parameteranalyse anwendbar. Eine nähere Betrachtung der Gegebenheiten bei der Dimensionierung von Schraubendruckfedern führt zum Favorisieren der Variante 1, weil der Drahtdurchmesser d und die Anzahl der federnden Windungen n_f sich besonders gut als diskrete Parameter eignen. Gründe hierfür sind:

- Der Drahtdurchmesser d wird in genormten, diskreten Abstufungen hergestellt.
- Für die Anzahl der federnden Windungen n_f wird nicht jeder mögliche Wert gefertigt. So ist es in der Praxis üblich, Federn auf eine halbe Windung ($5\frac{1}{2}$, $6\frac{1}{2}$ usw.) enden zu lassen, da dies nach [5], [22] u. a. eine axiale Krafteinleitung gewährleistet.
- Der Windungsdurchmesser D lässt sich an einer Windemaschine genauer einstellen und anschließend messen als dies für die Anzahl der federnden Windungen n_f möglich ist.

Das mathematische Modell basiert somit grundlegend auf der Berechnung des Windungsdurchmessers D nach Gl. (4), denn damit kann die gewünschte Funktion (Federrate R) der Feder gewährleistet werden. Somit ergibt sich für die Parameteranalyse, bei der Drahtdurchmesser d und die Anzahl der federnden Windungen n_f variiert werden, folgende Gleichung:

$$D_{ij} = \sqrt[3]{\frac{G \cdot d_i^4}{8 \cdot n_{fj} \cdot R}}; \quad d_i = d_1, \dots, d_m, \quad n_{fj} = n_{f1}, \dots, n_{fn} \quad (7)$$

¹ Der Gleitmodul wird gemeinhin als Konstante betrachtet, aber wie neuere Untersuchungen zeigen, besitzen speziell Federstahldrähte ein nichtlinear elastisches Verhalten in der Torsionsspannungs-Schiebungskennlinie. Die Untersuchungen sind noch nicht abgeschlossen [31].

2.4 Federdimensionierungsprogramm FedPro

Die beschriebene Vorgehensweise wird durch eine auf MS Excel basierende Dimensionierungssoftware für Schraubendruckfedern umgesetzt, die im weiteren unter der Programmbezeichnung **FedPro** behandelt wird. Die darin verwirklichte Parameteranalyse ermittelt zunächst unter der Berücksichtigung von Plausibilitäts- und Zulässigkeitskriterien alle mathematisch bestimmbaren Federn. Daran schließt sich eine Überprüfung der vom Anwender vorgegebenen Restriktionen an. Bei Verletzung von mindestens einer Restriktion wird eine Feder als nicht zulässig betrachtet. All dies geschieht ohne Eingriff des Anwenders. Dazu wurde der bisher übliche iterative Berechnungsablauf vollständig der Software übertragen. Die Entscheidung über die Auswahl der zu fertigenden Feder verbleibt aber weiterhin beim Anwender, wofür in **FedPro** diverse Entscheidungshilfen integriert sind.

Als ein Ergebnis der Berechnung werden die Federn aufgelistet, die für ein bestimmtes Optimierungskriterium ein Maximum bzw. Minimum erreichen (Bild 4). Derzeit sind das z.B. die Federn mit minimaler Masse oder minimalem Einbauvolumen. Prinzipiell kann aber für jedes Kriterium eine optimale Feder gesucht werden. Es gibt nur eine Einschränkung: Der zu optimierende Parameter darf im verwendeten Berechnungsmodell kein Vorgabeparameter sein.

			Nr.	d [mm]	n_f	D [mm]	n_s	L_0 [mm]
Optimale Federn mit								
<input checked="" type="radio"/>	Minimaler Masse	m_f	182	4,5	12,5	27,43	14,50	110,05
<input type="radio"/>	Minimalem Einbauvolumen	V_t	182	4,5	12,5	27,43	14,50	110,05
<input type="radio"/>	Maximaler Längseigenfrequenz	f_1	207	4,75	9,5	32,31	11,50	98,19
<input type="radio"/>	Minimalem Schlankheitsgrad	λ	235	5	9,5	34,59	11,50	101,45

Bild 4: Anzeige ausgewählter Parameter für optimal dimensionierte Federn

Neben der Möglichkeit der effizienten Federdimensionierung und –optimierung besitzt **FedPro** außerdem folgende wichtige Programmeigenschaften [23]:

- Wählen verschiedener Kombinationen von vorzugebenden Funktionsgrößen;
- Verwenden von zwei Datenbanken für Drahtmaterial, die auf Normen bzw. Messwerten basieren;
- Rechnen mit Messwerten für die zulässige Torsionsspannung $\tau_{t\text{zul}}$ (Messwert aus einem Torsionsversuch [24] – siehe auch Abschnitt 3);
- Festlegen von Grenzwerten, in denen die Federn zulässig sind bzw. ihr Optimum für verschiedene Kriterien besitzen sollen;
- Berechnen der Eigenfrequenzen (Längs-, Quer- und Dreheigenfrequenz) [25], [26];
- Berechnen der Feder für den statischen und, falls möglich, auch für den dynamischen Einsatzfall;
- Suchmöglichkeit nach Vergleichsfedern;
- Anzeigen einer ausgewählten Feder in einer frei beweglichen 3-D-Darstellung;
- Abspeichern von Kennwerten in Szenarien zwecks Variantenvergleich.

Weitere Informationen zu **FedPro** und die Möglichkeit des Herunterladens der kostenlosen Demo-Version sind auf den Seiten des Steinbeis-Transferzentrums Federntechnik zu finden.

3 Federrelevante Drahtkennwerte und ihr Nutzen für die Federdimensionierung und -fertigung

Die Kenntnis der Drahteigenschaften sind sowohl für die Federdimensionierung als auch für die Federfertigung notwendig. Als Auswahl zeigt dieses Kapitel

- die Bedeutung der technischen Torsionsfließgrenze $\tau_{10,04}$ für die Federdimensionierung (Abschnitt 3.1);
- die Beeinflussung der Eigenschaften ölschlussvergüteter Drähte durch den Vergüteprozess im Drahtwerk und die Fertigungsschritte bei der Federherstellung (Abschnitt 3.2);
- die Reduzierung des Aufwandes im Musterungsprozess, hervorgerufen durch Setzverluste in der Federfertigung durch Kenntnis der Torsionsspannungs-Schiebungskennlinie des verwendeten Federstahldrahtes (3.3).

Für den Funktionsnachweis von torsionsbeanspruchten Federn wird der G-Modul und die zulässige Torsionsspannung τ_{zul} benötigt. Die entsprechenden Werte werden normalerweise aus Normen entnommen oder über Beziehungen ermittelt, die nur bedingt das Materialverhalten von Federdraht widerspiegeln. Die genauere Kenntnis dieser Materialkennwerte und ihre Anwendung bei der Federdimensionierung führt zu einer besseren Übereinstimmung zwischen berechneter und gefertigter Feder sowie zu einer höheren Materialauslastung.

Um ein Setzen, also eine Verringerung der Länge der Schraubendruckfedern im Betrieb zu verhindern, werden die Federn in der Regel vorgesetzt [27]. Dieses Vorsetzen der Feder stellt zwar einen zusätzlichen Arbeitsschritt dar, ermöglicht aber durch das Einbringen günstig gerichteter Eigenspannungen eine bessere Werkstoffauslastung und damit eine höhere Belastung im späteren Einsatz [1] [28].

Beträchtliche Steigerungen im elastischen Formänderungsvermögen von Schraubendruckfedern und damit verbundene Material- sowie Bauraumeinsparungen sind möglich, wenn man beim Vorsetzen größere Setzbeträge zulässt [1] [28]. Weiterführende Erläuterungen vor allem bzgl. der Auswirkungen auf Federschiefstellung, Federrate, Querkräfte und andere Federeigenschaften sind in [29] zu finden.

Bislang ist es üblich, die Materialkennwerte für die verschiedenen Belastungsarten aus den Ergebnissen des Zugversuches zu ermitteln. Problematisch ist dabei, dass hierfür Materialeigenschaften vorausgesetzt werden, die auf Federmaterial nur bedingt zutreffen. Dieser Umstand verlangt eine kritische Betrachtung der Übertragung der Materialeigenschaften im Zugversuch auf andere Belastungsarten.

Im folgenden werden Möglichkeiten zur Verbesserung der Dimensionierung von Schraubendruckfedern vorgestellt, die sich durch Kenntnis der für Schraubendruckfedern relevanten Drahtkennwerten ergeben [28] [30] [31].

3.1 Verwenden von Messwerten für $\tau_{t0,04}$ anstelle des τ / R_m – Verhältnisse

Beim Festigkeitsnachweis von Schraubendrähten wird nach Gl.(2) überprüft, ob die im Federdraht infolge der Belastung durch die Kraft F entstehende Torsionsspannung τ_t kleiner ist als die zulässige Torsionsspannung $\tau_{t\text{zul}}$:

$$\tau_t = \frac{8 \cdot D \cdot F}{\pi \cdot d^3} \leq \tau_{t\text{zul}} \quad (2)$$

Bei der Auslegung von Maschinenelementen ist es üblich, die zulässige Spannung über ein Verhältnis aus ertragbarer Spannung und einem Sicherheitsfaktor S_F zu bestimmen. Im Falle der Schraubendruckfeder müsste daher als ertragbare Spannung die Torsionsfließgrenze τ_{tF} verwendet werden:

$$\tau_{t\text{zul}} = \frac{\tau_{tF}}{S_F} \quad (8)$$

Gebräuchlich ist in der Federntechnik aber die Beziehung

$$\tau_{t\text{zul}} = 0,56 \cdot R_m. \quad (9)$$

Beide Ansätze gehen davon aus, dass in einer belasteten Feder hauptsächlich Torsionsspannungen entstehen, was sich auch in der Beziehung für die Vergleichsspannung widerspiegelt:

$$\sigma_v = \sqrt{3 \cdot \tau_t^2} = \sqrt{3} \cdot \tau_t \leq \sigma_{\text{zul}} \quad (10)$$

Für die zulässige Vergleichsspannung $\sigma_v = \sigma_{\text{zul}}$ wird normalerweise die Streckgrenze R_e verwendet. Bei Werkstoffen ohne ausgeprägter Streckgrenze, wie z. B. bei Federstahldrähten, wird stattdessen die 0,2 % - Dehngrenze $R_{p0,2}$ eingesetzt [32]:

$$\tau_{t\text{zul}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_v = 0,577 \cdot \sigma_v = 0,577 \cdot R_{p0,2} \quad (11)$$

Dennoch wird in der Federntechnik die zulässige Torsionsspannung $\tau_{t\text{zul}}$ auf die Zugfestigkeit R_m der Drähte bezogen, da die Dehngrenze $R_{p0,2}$ und die Zugfestigkeit R_m bei Federdrähten relativ nah beieinander liegen ($R_{p0,2} \approx 0,9 R_m$) und die Zugfestigkeit ohne größeren messtechnischen Aufwand ermittelt werden kann. Werte für $R_{p0,2}$ lassen sich nur unter Verwendung eines Feindehnungsaufnehmers bestimmen. Auch in den Normen für Federdrähte (z. B. [33] oder [34]) wird nur die Zugfestigkeit der Drähte angegeben.

Zur Erhöhung der Dimensionierungsgenauigkeit ist es daher notwendig, die zulässige Torsionsspannung $\tau_{t\text{zul}}$ respektive die technische Torsionsfließgrenze $\tau_{t0,04}$ nicht mehr über die Zugfestigkeit R_m zu bestimmen, sondern aus Messwerten eines Torsionsversuches.

Eine Bestimmung der technischen Torsionsfließgrenze $\tau_{t0,04}$ erfolgt mittels eines Torsionsversuches, der, in Analogie zum Zugversuch, aus den Messwerten Drehmoment M_t und Drehwinkel φ eine Torsionsspannungs-Schiebungs-Kennlinie liefert. Aus dieser kann $\tau_{t0,04}$ und auch der für die Dimensionierung von Schraubendrähten wichtige G-Modul ermittelt werden [24] [31] [35].

3.2 Berücksichtigung des Ausgangszustandes des Federstahldrahtes und des Einflusses der Fertigungsschritte bei der Federherstellung auf die Federeigenschaften

Das Projekt „Optimierung des Festigkeits- und Umformverhaltens SiCr-legierter ölschlussvergüteter Federstahldrähte zwecks Verbesserung ihrer Verarbeitungs- und Anwendungseigenschaften“ [35] beschäftigte sich u.a. mit der Bestimmung der Abhängigkeit der technischen Torsionsfließgrenze $\tau_{10,04}$ von den bei der Drahtherstellung verwendeten Werten für die Vergüteparameter. Bild 5 zeigt Versuchsergebnisse, die eine deutliche Abhängigkeit von $\tau_{10,04}$ von der Durchlaufgeschwindigkeit v des Drahtes durch die Vergüteeinrichtung erkennen lassen. Auch die Vergüteeinrichtungsanlasstemperatur T_5 hat einen Einfluss auf $\tau_{10,04}$. Im Projekt wurden darüber hinaus auch verschiedene Materialgüten untersucht. Ihren Einfluss auf $\tau_{10,04}$ kann ebenfalls Bild 5 entnommen werden.

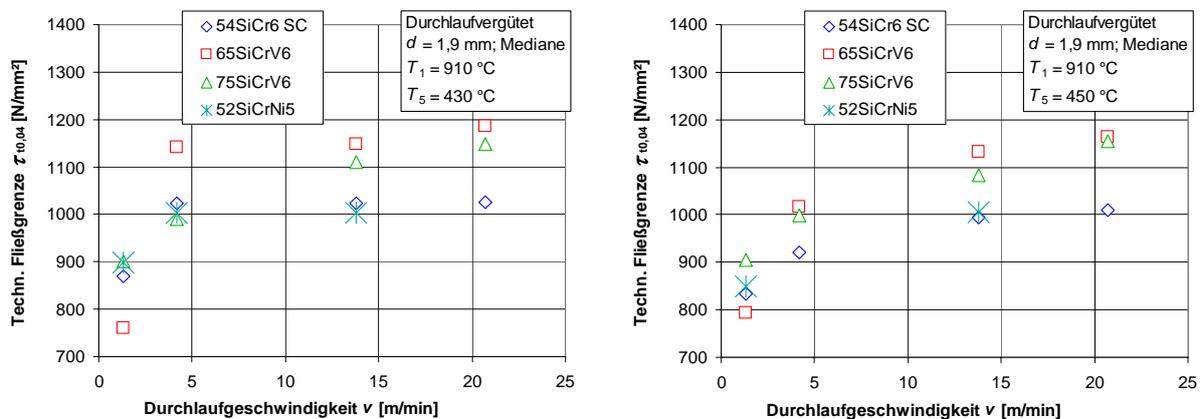
a) Vergüteeinrichtungsanlasstemperatur $T_5 = 430$ °Cb) Vergüteeinrichtungsanlasstemperatur $T_5 = 450$ °C

Bild 5: Technische Torsionsfließgrenze $\tau_{10,04}$ in Abhängigkeit von der Durchlaufgeschwindigkeit v und der Vergüteeinrichtungsanlasstemperatur ($d = 1,9$ mm)

Weiterhin wurde in diesem Projekt festgestellt, dass die verschiedenen Festigkeits- und Umformeneigenschaften der Drähte von den Vergüteparametern unterschiedlich beeinflusst werden. Das bedeutet unter anderem, dass das Verhältnis zwischen technischer Torsionsfließgrenze $\tau_{10,04}$ und Zugfestigkeit R_m nicht konstant ist, sondern von den im Drahtwerk verwendeten Werten für die Vergüteparameter abhängt (Bild 6).

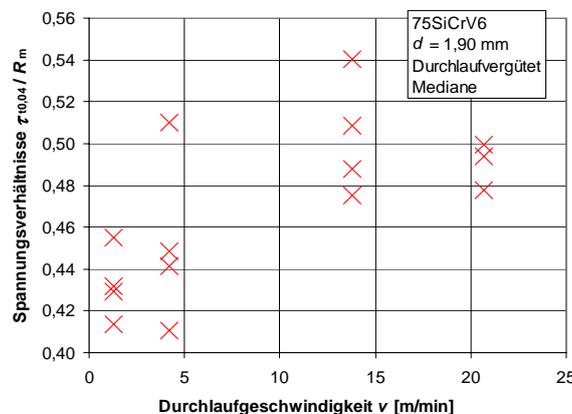


Bild 6: Veränderung des Spannungsverhältnisses $\tau_{10,04} / R_m$ durch die Prozessparameter bei der Drahtvergütung

Es kann also durchaus passieren, dass zwei unterschiedliche Drahtchargen derselben Drahtgüte eines Herstellers unterschiedliche $\tau_{10,04} / R_m$ – Verhältnisse aufweisen.

Die Drahteigenschaften verändern sich weiterhin durch die Fertigungsschritte bei der Federherstellung. Vor allem Wärmebehandlungen der Feder spielen hierbei eine große Rolle. Detaillierte Untersuchungen hierzu stehen noch aus und sollen in zukünftigen Forschungsprojekten erfolgen. Wie erste Stichversuche aber bereits gezeigt haben, besitzt das Anlassen nach dem Federwinden nicht nur den Effekt, die durch das Winden eingebrachten Biegeeigenstressungen zu reduzieren und die Streckgrenze wieder anzuheben. Auch die anderen Festigkeits- und Umformeigenschaften ändern sich. Bild 7 zeigt, wie von einem Drahtwerk unterschiedlich vergütete Probedrähte durch eine Wärmebehandlung, die in ihren Parametern dem Anlassen nach dem Federwinden entspricht, die technische Torsionsfließgrenze $\tau_{0,04}$ vergrößert und die Verwindzahl N_t reduziert.

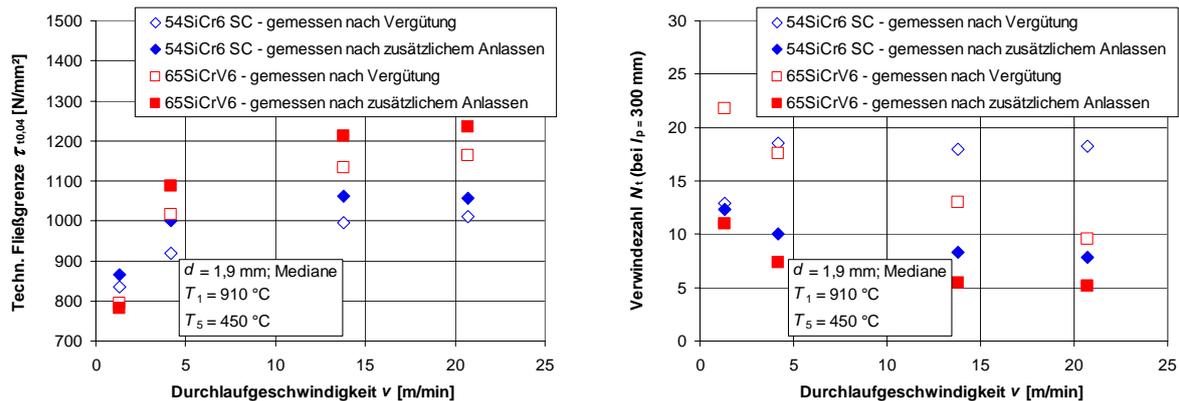
a) Technische Torsionsfließgrenze $\tau_{0,04}$ b) Verwindzahl N_t bei einer Prüflänge $l_p = 300$ mm

Bild 7: Veränderung der Festigkeits- und Verformungskennwerte von Probedrähten durch eine zusätzliche Wärmebehandlung, die dem Anlassen der Feder nach dem Winden entspricht

Das bedeutet, dass Aussagen zu den Anwendungseigenschaften von Federstahldrähten nicht allein durch den Lieferzustand ab Drahtwerk möglich sind, sondern es müssen die Drahteigenschaften nach jedem Fertigungsschritt bei der Federherstellung bekannt sein, damit diese bereits bei der Federdimensionierung berücksichtigt werden können.

Zusammenfassend kann festgestellt werden:

Zur genaueren Dimensionierung von Schraubendruckfedern ist die Kenntnis der Torsionskennwerte des verwendeten Federstahldrahtes notwendig.

Die Kenntnis der Torsionsspannungs-Schiebungs-Kennlinie eines Drahtes erlaubt eine verbesserte statische Dimensionierung und die Vorausberechnung des Längenverlustes beim Fertigungsschritt Vorsetzen (Abschnitt 3.3). Dabei muss die Ermittlung der Torsionsdrahteigenschaften an Drahtproben erfolgen, die den analogen Fertigungsschritten der Federnachbehandlung wie z.B. Anlassen und Kugelstrahlen unterzogen wurden.

Die Anwendung dieser und weiterer, hier nicht beschriebener Erkenntnisse in der Federfertigung führen zu einer Reduzierung des Aufwandes für den Musterungsprozess, da die berechneten Federkennwerte und die Federkennwerte der ersten Musterfeder viel näher beieinander liegen als bisher.

Das im Abschnitt 2.4 vorgestellte Federdimensionierungsprogramm **FedPro** bietet bereits die Möglichkeit, für alle Materialien die Torsionsfließgrenze τ_{TF} [31] in den dazugehörigen Drahtdatenbanken zu speichern.

3.3 Bestimmen der beim Winden zu erreichenden Federlänge L_0 zum Ausgleichen der Setzverluste beim Fertigungsschritt Vorsetzen [28]

Schraubendruckfedern werden nach dem Winden, Anlassen und ggf. Kugelstrahlen mehrmals zumeist bis auf ihr Blockmaß gesetzt, was zu einem Längenverlust (Vorsetzverlust) führt, um in der späteren Anwendung der Feder Längenänderungen zu minimieren. Durch Zulassen von merklichen bzw. großen Vorsetzverlusten sind höher auslastbare Schraubendruckfedern herstellbar. Die beim Vorsetzen auftretenden Längenverluste müssen bereits im Federwindeprozess berücksichtigt werden. Die Länge der gewundenen Feder bzw. die Summe der zu fertigenden Windungsabstände muss um diesen Betrag vergrößert werden [1]. Deshalb ist die Kenntnis des zu erwartenden Vorsetzbetrages ΔL_0 eine wichtige Voraussetzung für die Dimensionierung und effektive Herstellbarkeit von höher auslastbaren Federn. Gegenwärtig wird dieses Problem über das meist mehrmalige Durchführen des Musterprozesses gelöst.

Zur Bestimmung dieses Vorsetzbetrages ΔL_0 wird die Torsionsversuchskennlinie herangezogen, die an einem angelassenem Draht aufgenommen wurde. Das Drahtmaterial für den Torsionsversuch wird aus der Charge entnommen, aus dem später die Federn hergestellt werden. Die Anlasstemperatur des Drahtes und der zu fertigenden Feder sind gleich groß. Folgende Vorgehensweise ist zur Ermittlung des herzustellenden Windungsabstandes bzw. der daraus resultierenden Länge L_0 der ungesetzten, nicht angeschliffenen Schraubenfeder notwendig:

1. Vorgeben der zu erreichenden Blockspannung τ_C sowie der Geometrie- und Materialparameter der Schraubenfeder d, D, n_f, n_t, G, L_0 , die sich beim Entwurf der Feder für eine vorgegebene Funktion (Federkennlinie) und einem vorgegebenen Bauraum ergeben hat (Tafel 3).
2. Ermitteln der zu dieser Torsionsspannung τ_C gehörenden Gesamtschiebung γ in [%] aus dem Torsionsversuch (Bild 8).
3. Ermitteln der elastischen und der plastischen Schiebung γ_{el} und γ_{pl} in [%] aus dem Torsionsversuch, die diese Gesamtschiebung γ

$$\gamma = \gamma_{el} + \gamma_{pl} \quad (12)$$

ergeben.

4. Berechnen des zu erwartenden Vorsetzbetrages ΔL_0 der ungesetzten Feder aus der plastischen Schiebung γ_{pl}

$$\Delta L_0 = \frac{D^2 \cdot \pi \cdot n_f}{d \cdot 100} \cdot \gamma_{pl} \quad (13)$$

5. Nachrechnen des Blockfederweges s_C (bzw. der Blockspannung τ_C entsprechend Gl. (14)) der gesetzten Feder aus der elastischen Schiebung γ_{el} gemäß

$$s_C = \frac{D^2 \cdot \pi \cdot n_f}{d \cdot 100} \cdot \gamma_{el} \quad (14)$$

6. Berechnung der Länge der ungesetzten, nicht angeschliffenen Schraubenfeder L_0

$$L_0 = (n_t + 1) \cdot d + s_C + \Delta L_0 \quad (15)$$

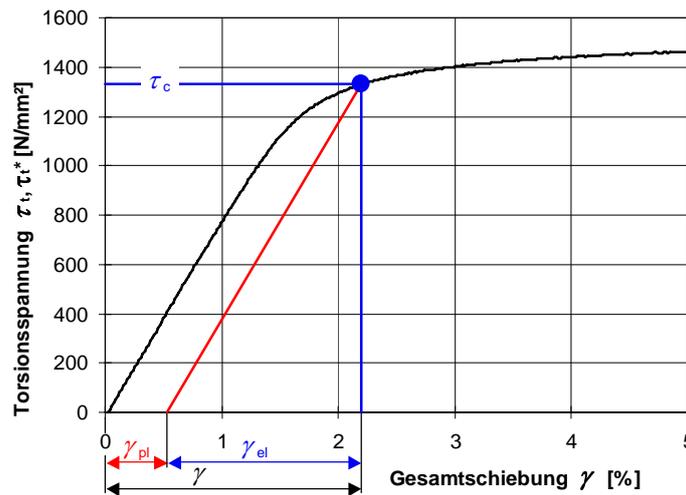


Bild 8: Kennlinie aus dem Torsionsversuch zur Ermittlung der Schiebungswerte γ , γ_{pl} und γ_{el} entsprechend der gegebenen Blocktorsionsspannung τ_c

Tafel 3: Vergleich der an Federn gemessenen Vorsetzbeträge und Blockfederwege mit den Vorsetzbeträgen und Blockfederwegen, die aus den Ergebnissen des Torsionsversuches berechnet wurden

$\eta_{\tau/Rm}$ unge- setzte Feder	Gege- benes τ_c	$\eta_{\tau/Rm}$ ge- setzte Feder	γ aus Torsions- versuch	γ_{pl} aus Torsions- versuch	γ_{el} aus Torsions- versuch	Block- weg s_C aus γ_{el}	Blockweg s_C an Feder gemessen	Vorsetz- betrag ΔL_0 aus γ_{pl}	Vorsetz- betrag ΔL_0 gemessen
	[N/mm ²]		[%]	[%]	[%]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
0,5	930	0,49	1,210	0,022	1,187	31,8	31,1	0,6	0,63
0,6	1089	0,57	1,456	0,063	1,386	37,1	36,7	1,7	1,4
0,73	1250	0,66	1,818	0,228	1,590	42,6	42,4	6,1	4,2
0,83	1312	0,69	2,082	0,417	1,665	44,6	44,8	11,1	8,6
1,05	1405	0,74	3,052	1,269	1,783	47,8	48,6	34,0	18,7

In Tafel 3 sind die an höher auslastbaren Schraubendruckfedern gemessenen Vorsetzbeträge ΔL_0 und Blockfederwege s_C aufgeführt. Zum Vergleich sind dann auch die Vorsetzbeträge und Blockfederwege mit angegeben, die sich aus den elastischen bzw. plastischen Schiebungswerten γ_{el} und γ_{pl} berechnen lassen, die aus dem Torsionsversuch an der Stelle der vorgegebenen Blocktorsionsspannung τ_c ermittelt werden.

Die Ergebnisse in Tafel 3 zeigen, dass durch die Nutzung der Torsionsspannungs-Schiebungskennlinie die Vorausberechnung der Länge der ungesetzten Feder von hoch auslastbaren Federn möglich ist. Die gemessenen und berechneten Blockfederwege stimmen für die Schraubendruckfedern aller hergestellten Auslastungsgrade $\eta_{\tau/Rm}$ sehr gut überein. Die Vorausberechnung des Vorsetzbetrages ΔL_0 aus der plastischen Schiebung γ_{pl} gelingt bis zu einem Spannungsverhältnis $\eta_{\tau/Rm}$ der gesetzten Feder von ca. 0,7 recht gut. Für noch stärker vorgesetzte Federn kann der Vorsetzbetrag nicht mehr aus dem Torsionsversuch über die plastische Schiebung γ_{pl} bestimmt werden, da der Anstieg der Torsionsspannungs-Gesamtschiebungskennlinie bei Gesamtschiebungswerten $\gamma > 3,0$ so gering wird, dass bereits kleinste Torsionsspannungsänderungen zu sehr großen Gesamtschiebungsänderungen führen und damit eine exakte Zuordnung von Torsionsspannung und Schiebung nicht mehr möglich ist.

4 Einfluss der End- und Übergangswindungen auf die Eigenschaften von Schraubendruckfedern

Als Übergangswindung $n_{\text{ü}}$ bezeichnet man den Teil der Schraubendruckfeder, der zwischen den nicht federnden Endwindungen und den Windungen mit konstanter Steigung im Federmittelteil liegt (Bild 9).



Bild 9: Schraubendruckfeder mit deutlich hervorgehobenen End- und Übergangswindungen [36]

In der Federfertigung ist es gemeinhin üblich, die Übergangswindungen $n_{\text{ü}}$ als Fertigungsausgleich zu benutzen, da sie für die Federdimensionierung laut Gl. (16) keine Rolle spielen.

$$F = \frac{G \cdot d^4}{8 \cdot D^3 \cdot n_f(s)} \cdot s \quad (16)$$

Dabei wird aber nicht berücksichtigt, dass sich im Einsatz beim Einfedern die Übergangswindungen sukzessiv anlegen, damit die federnde Windungszahl abnimmt und damit die Kraft-Weg-Kennlinie einen zumeist unerwünschten progressiven Verlauf aufweist. Dies wiederum hat immer Auswirkungen auf

- die Kennlinie der Schraubendruckfedern bzw. die Federrate R ;
- das Frequenzverhalten;
- die Kraftwirkungslinie;
- die Federschiefstellung und damit auf die Formmaße $e_{1 \text{ vorh}}$ und $e_{2 \text{ vorh}}$ sowie auf
- das Dauerschwingverhalten.

Die Schiefstellung einer Schraubenfeder kann durch zwei Parameter beschrieben werden:

- Schiefstellungswinkel β , aus dem bei Kenntnis der freien Federlänge L_0 das Schiefstellungsmaß $e_{1 \text{ vorh}}$ bestimmt werden kann (Bild 10);
- Richtungswinkel γ , der die Lage angibt, in der die Federachse der Endwindung gegenüber der Achse des Federmittelteils wegkippt. Bezugspunkt ist der Drahtanfang der Feder (Bild 10).

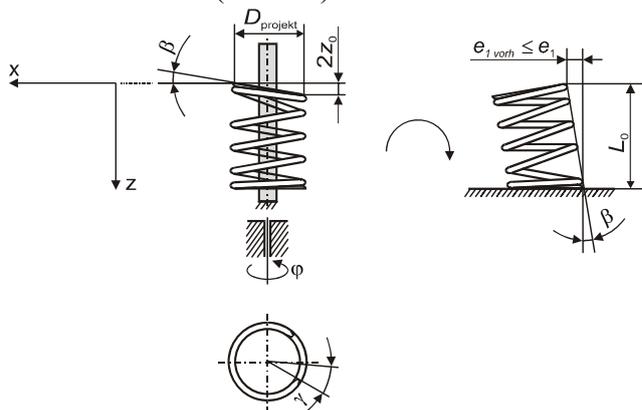


Bild 10: Geometrische Größen für die Beschreibung der Schiefstellung einer geschliffenen Endwindung

Zum Bestimmen der Schiefstellungsparameter von Federn muss ihr Windungsverlauf bekannt sein. Dieser kann z.B. über einen entsprechenden Bildverarbeitungsmessplatz (Bild 11), der eine automatisierte Messung des Windungsverlaufes gestattet, ermittelt werden [29].

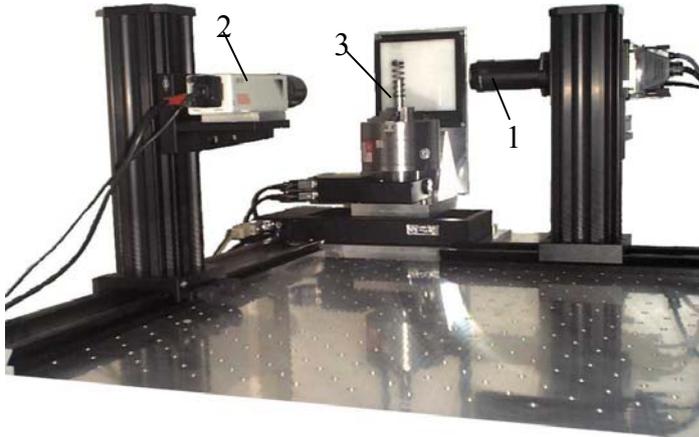


Bild 11:
Bildverarbeitungsmessplatz zum automatischen Bestimmen des Windungsdurchmessers und des Windungsverlaufes
1 – Zeilenkamera,
2 – Matrixkamera,
3 – Federaufnahmedorn

Bzgl. Endwindung und Schiefstellung ist es wichtig zu wissen, dass zwischen „innerer“ und „äußerer“ Schiefstellung unterschieden werden muss. „Außen“ und „Innen“ sind so definiert, dass die Drahtseite, die am Federende angeschliffen werden kann, als „außenliegend“ und die andere Drahtseite als „innenliegend“ bezeichnet wird. Bei nicht angeschliffenen Federn sind die Schiefstellungsparameter für beide Drahtseiten jeweils identisch (Bild 12), bei angeschliffenen Federn unterscheiden sie sich fast immer (Bild 13).

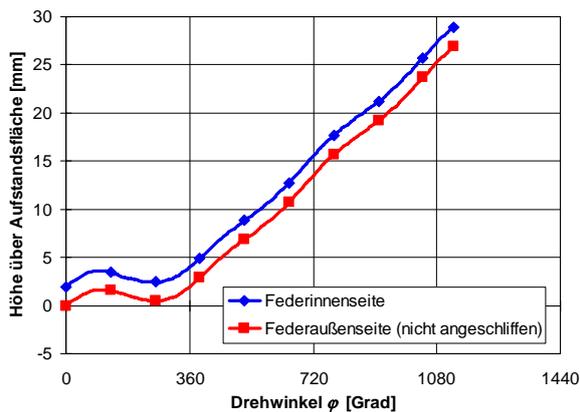


Bild 12: Gemessene Höhe über der Aufstandsfläche für eine nicht angeschliffene Feder

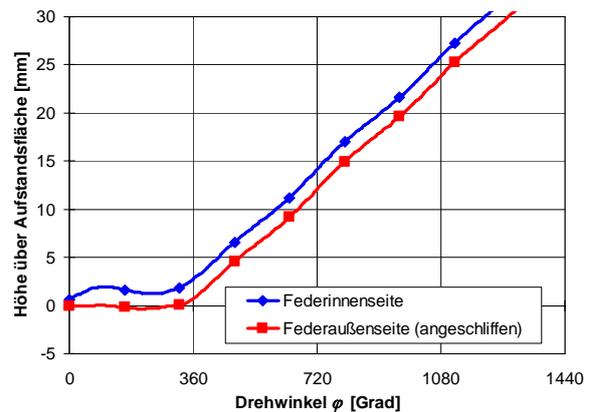


Bild 13: Gemessene Höhe über der Aufstandsfläche für eine angeschliffene Feder

Ist eine Feder nach dem Vorsetzen schief und besitzt somit eine „innere“ Schiefstellung, so kann dies durch den Anschliff **nicht** korrigiert werden. Anschleifen verändert nur die „äußere“ Schiefstellung. Es ist möglich, durch Anschleifen eine optisch gerade wirkende Feder (e_1 -Maß) zu erzeugen, aber nur mit einem zur Endwindung nicht senkrechten und damit nicht gleichmäßigen Anschliff.

Wird das Steigungswerkzeug mit einer linearen Bewegungsfunktion gesteuert, so ist die Schiefstellung der Feder direkt von der gefertigten Übergangswindungsanzahl abhängig. Außerdem beeinflussen die dem Winden nachgelagerten Arbeitsgänge die Schiefstellungsparameter (Bild 14). Daraus lässt sich unter anderem schlussfolgern, dass beim Federwinden eine Übergangswindungsanzahl gefertigt werden muss, die zu einer Feder mit minimaler Schiefstellung nach dem letzten Arbeitsschritt führt, was durchaus bedeuten kann, dass die Feder nach dem Winden schief sein muss.

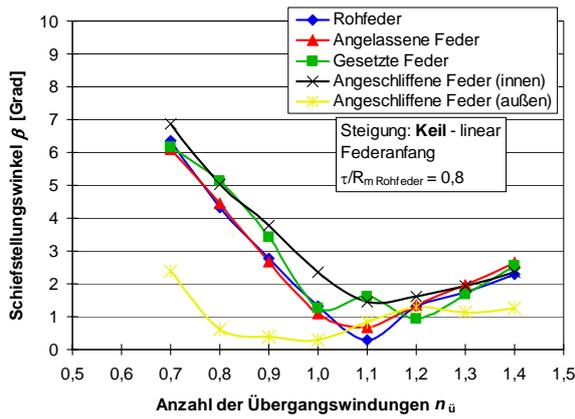


Bild 14: Schiefstellungswinkel β am Federanfang in Abhängigkeit von der Anzahl der Übergangswindungen n_u

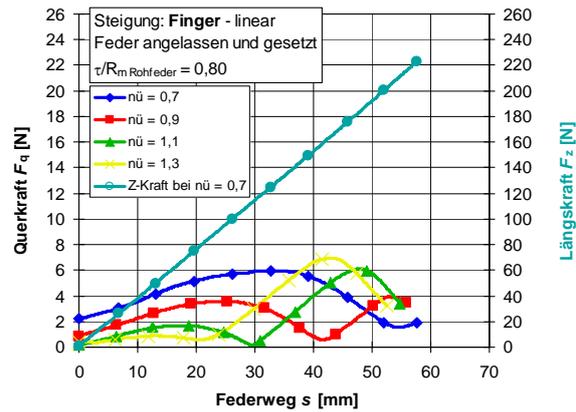


Bild 15: Querkraft F_q nicht angeschliffener Federn in Abhängigkeit vom Einfederungsweg s und der Übergangswindungsanzahl n_u

Darüber hinaus hat die Federschiefstellung sowohl Einfluss auf den Querkraftverlauf (Bild 15) als auch auf den Federratenverlauf.

Zur Herstellung qualitativ hochwertiger Schraubendruckfedern ist eine Schiefstellung der Federn auf jeden Fall zu vermeiden. Die Forderung, die Übergangswindungen als Fertigungsausgleich nutzen zu können, besteht aber weiterhin.

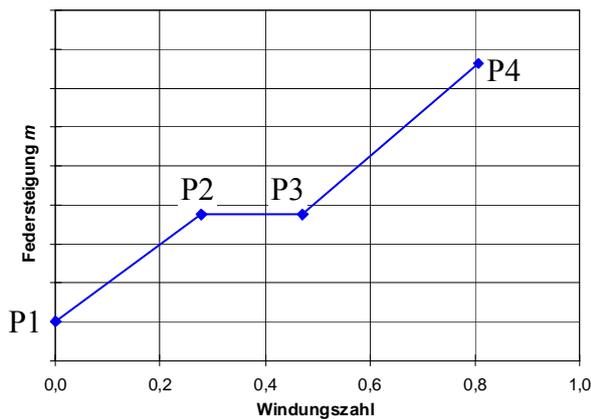


Bild 16: Beispiel für eine tri-lineare Bewegungsfunktion für das Verfahren des Steigungskeils

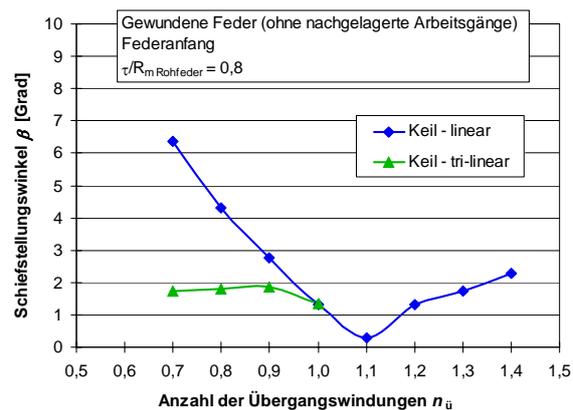


Bild 17: Schiefstellungswinkels β bei Fertigung von Federn mit tri-linearer bzw. linearer Bewegungsfunktion des Steigungswerkzeuges

Diese Forderungen können durch eine definierte Erzeugung der Übergangswindungen (Erzeugung der Federsteigung) erfüllt werden. So ist eine fast vollständige Vermeidung der Federschiefstellung möglich. In Untersuchungen hat sich das Bewegen des Steigungskeils nach einer tri-linearen Bewegungsfunktion als brauchbare Möglichkeit der Vermeidung von Federschiefstellung herausgestellt (Bild 16 und Bild 17). Dabei wird das Steigungswerkzeug in 3 Bewegungsabschnitten in den Federkörper hineinbewegt.

Weiterführende Ergebnisse zur Gestaltung der End- und Übergangswindungen von kaltgeformten Schraubendruckfedern sind in [1] und [29] zu finden. Sie zeigen z.B. nicht nur Möglichkeiten zur qualitätsgerechten Fertigung von Federn mit höherem Energiespeichervermögen auf, sondern auch wie die End- und Übergangswindungen gefertigt werden müssen, um für eine gegebene Aufgabenstellung einen zweckmäßigen Querkraft- bzw. Federratenverlauf zu erzielen.

5 Zusammenfassung

Mit Hilfe der Rechentechnik und speziell entwickelter Software ist es heute möglich, das aufwendige iterative Dimensionieren und Optimieren von Schraubendruckfedern weitestgehend zu automatisieren. Ein sehr gut für die Federdimensionierung und -optimierung geeigneter Berechnungsalgorithmus ist die Parameteranalyse. Dieser Algorithmus wird in der im Beitrag vorgestellten Software **FedPro** verwendet, wodurch das Programm in der Lage ist, effektiv optimale Schraubendruckfedern zu dimensionieren.

Mit moderner Messtechnik und der dazugehörigen rechentechnischen Aufbereitung der Messergebnisse ist es heutzutage möglich, die Auslegung von Schraubenfedern zu verbessern. So erlaubt die Kenntnis der technischen Torsionsfließgrenze $\tau_{0,04}$ eine viel genauere Federdimensionierung (statische Festigkeit), als es über das derzeit gebräuchliche τ / R_m – Verhältnis möglich wäre.

Das Ermitteln kompletter Torsionsspannungs-Schiebungs-Kennlinien bietet darüber hinaus vielfältige Möglichkeiten die Federauslegung zu verbessern. So können die Kennlinien als Basis für Werkstoffmodelle in FEM-Berechnungen dienen oder wie in diesem Artikel vorgestellt, zur Berechnung des Setzverlustes beim Fertigungsschritt „Vorsetzen“ dienen.

6 Literatur

- [1] Schorcht, H.-J.; Weiß, M.; u.a.: Technologien zur Herstellung von Schraubendruckfedern mit höherem elastischen Formänderungsvermögen und verbessertem Setzverhalten. Abschlussbericht AiF-Forschungsthema 11170 B, TU Ilmenau 1999
- [2] Liebermann, K.: Rechnergestütztes Entwurfs- und Optimierungssystem für Schraubendruckfedern. Dissertation TU Ilmenau 2003 in Berichte aus dem Institut, Bericht Nr. 9 2003
- [3] Liebermann, K.: Rechnergestütztes Entwurfs- und Optimierungssystem für Schraubendruckfedern. Dissertation TU Ilmenau 2003 in Berichte aus dem Institut, Bericht Nr. 9 2003
- [4] Krug, W.; Schönfeld, S.: Rechnergestützte Optimierung für Ingenieure. VEB Verlag Technik, Berlin, 1981
- [5] Meissner, M.; Schorcht, H.-J.: Metallfedern. Reihe Konstruktionsbücher, Bd. 41, Springer Verlag, 1997
- [6] Meissner, M.: Beitrag zur Parameteroptimierung von Federn. Draht 44 (1993) 6, Seite 365-368
- [7] Hager, K.-F.: Berechnung und Optimierung von Federn. 19. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium TH Ilmenau (1974) 3, Seite 109-112, Vortragsreihe „Geräteentwicklung“
- [8] Schade, H.: Beitrag zur Berechnung zylindrischer Schraubenfedern. VDI-Zeitschrift 98 (1956) 4, Seite 131-132
- [9] Höhne, G.: Lehrblätter Konstruktionsmethodik / CAD. Fachgebiet Konstruktionstechnik, TU Ilmenau
- [10] Krause, W.: Gerätekonstruktion. VEB Verlag Technik, Berlin, 1982
- [11] Pahl, G.; Beitz, W.: Konstruktionslehre. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 4. neubearbeitete Auflage, 1997
- [12] Nestler, W.: Optimierung zylindrischer Druckfedern mittels EDV-Anlagen. Technische Information Armaturen 6 (1971) 2/3, Seite 21-24
- [13] DIN EN 13906-1, Zylindrische Schraubendruckfedern aus runden Drähten und Stäben - Berechnung und Konstruktion. Teil 1: Druckfedern, Juli 2002
- [14] Orthwein, W. C.: Calculator Program for Compression Springs. Computers in Mechanical Engineering 7 (1988) 3, Seite 17-28
- [15] DF_Dim: Dimensionierung von Schraubendruckfedern mit MS Excel. Dr. Steffen Lutz (TU Ilmenau)
- [16] Singh, S.: A Fast Method for Design of Helical Compression Springs. Proceeding of the 7th. ISME Conference, Indian Society of Mechanical Engineers, New Delhi, IND, 1.-3.2.1990, Seite 149-157

- [17] Fröhlich, P.: Druckfederberechnung und -optimierung mit dem Tischrechner. Konstruktion 28 (1976) 6, Seite 227-228
- [18] Ruoss, F.: Berechnungsgang: Auslegung von Druckfedern. Der Konstrukteur 22 (1991) 10, Seite 58, 60-64
- [19] Wilms, V.: Gewichtsoptimales Auslegen kaltgeformter zylindrischer Schraubendruckfedern unter statischer Belastung. Werkstatt und Betrieb 115 (1982) 3, Seite 197-201
- [20] Dannert, H. D.: Computerberechnung von Schraubendruckfedern. Draht 37 (1986) 8, Seite 470-472
- [21] Gal, T.: Grundlagen des Operations Research - Band 2. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 2. Auflage, 1989
- [22] Groß, S.: Berechnung und Gestaltung von Metallfedern. Springer-Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg, 3. Auflage, 1960
- [23] FedPro – Software zur Dimensionierung von Schraubendruckfedern Steinbeis-Transferzentrum Federntechnik Ilmenau - <http://www.stz-federn.de/>
- [24] Schorcht, H.-J.; Weiß, M.; u.a.: Technologien zur Weiterentwicklung der Qualität und Verarbeitbarkeit von Federdraht durch Kenntnis seines Umformverhaltens. Abschlußbericht AiF-Forschungsthema 11517 B, TU Ilmenau 2001
- [25] Schorcht, H.-J.; Lutz, St.: Quer-Eigenfrequenzen von zylindrischen Schraubendruckfedern aus runden Drähten. Abschlußbericht AiF-Forschungsthema 9232 B, TU Ilmenau 1995
- [26] Schorcht, H.-J.; Lutz, St.: Gestaltabhängige Kennwerte zur Berechnung der Eigenfrequenzen von Schraubendruckfedern. Abschlußbericht AiF-Forschungsthema 10337 B, TU Ilmenau 1998
- [27] Meissner, M.; Schorcht, H.-J.: Metallfedern. Reihe Konstruktionsbücher, Bd. 41, Springer Verlag 1997
- [28] Geinitz, V.: Genauigkeits- und auslastungsoptimierte Schraubendruckfedern. Dissertation TU Ilmenau 2005
- [29] Schorcht, H.-J.; Weiß, M.; u.a.: Einflüsse der End- und Übergangswindungen auf Funktion und Betriebsverhalten von kaltgeformten Schraubendruckfedern. Abschlussbericht AiF-Forschungsthema 12573 BR, TU Ilmenau 2003
- [30] Geinitz, V.: Umformverhalten von Federstahldraht. Draht 52 (2001) 6, Seite 36-40
- [31] Weiß, M.; Geinitz, V.: Ermittlung von funktions- und fertigungsrelevanten Federdrahtkennwerten (E- und G-Modul). Forschungsantrag zum gleichnamigen AiF-Projekt BR 08505/03, TU Ilmenau 2003.
- [32] Steinhilper, W.; Röper, R.: Maschinen- und Konstruktionselemente 3. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2. Auflage, 1996
- [33] DIN EN 10270-1, Stahldraht aus Federn. Teil 1: Patentiert gezogener unlegierter Federstahldraht, Dezember 2001
- [34] DIN EN 10270-3, Stahldraht aus Federn. Teil 3: Nicht rostender Federstahldraht, August 2001
- [35] Schorcht, H.-J.; Weiß, M.; u.a.: Optimierung des Festigkeits- und Umformverhaltens SiCr-legierter ölschlussvergüteter Federstahldrähte zwecks Verbesserung ihrer Verarbeitungs- und Anwendungseigenschaften. Abschlussbericht AiF-Forschungsthema 13654 BR, TU Ilmenau 2006
- [36] Forschungsgruppe Federn: VDFI – Workshop „Das Winden von Schraubendruckfedern“. TU Ilmenau März 2006