



TKS[®]-FEDER

NEUE PROGRESSIVE SCHRAUBENFEDER FÜR SCHIENENFAHRZEUGE

Dipl.-Ing. Dieter Schmidt

Federnwerk Langen & Sondermann GmbH & Co. KG, Lünen

Zusammenfassung: Gestiegene Anforderungen an die Geschwindigkeit und Radsatzlast von Schienenfahrzeugen führen zur Notwendigkeit von Tragfedern mit progressiver Federkennlinie. Konventionelle Schraubenfedern mit progressiver Kennlinie und konstantem Drahtdurchmesser weisen einige Nachteile auf, die den Einsatz in Schienenfahrzeugen oft erschweren oder unmöglich machen. Die neu entwickelte TKS[®]-Feder mit ausgewalztem Drahtquerschnitt in den progressiv windenden Windungen beseitigt diese Nachteile und bietet damit optimale Eigenschaften für den Einsatz als Tragfeder in Schienenfahrzeuglaufwerken.

Schlagworte: Schienenfahrzeug, Schraubenfeder, TKS[®]-Feder, Kennlinie

- 1 Einleitung
- 2 Schraubenfedern für Schienenfahrzeuge
- 3 Besonderheiten der TKS[®]-Feder
- 4 Auslegung progressiver Schraubenfedern
- 5 Verwendete Formelzeichen
- 6 Literatur

1 Einleitung

Das Laufwerk ist der Teil eines Schienenfahrzeugs, mit dem das Fahrzeug auf den Schienen fährt und geführt wird. Die Anforderungen an ein Laufwerk sind

- sichere Führung des Schienenfahrzeugs im Gleis
- gute Laufruhe des Schienenfahrzeugs bis zur vorgesehenen Höchstgeschwindigkeit zur Schonung des Ladeguts bzw. als wesentliche Komponente des Fahrkomforts im Personenverkehr
- verschleißarme Konstruktion zur Sicherstellung möglichst konstanter Eigenschaften zwischen den Instandhaltungsstufen
- Übertragung der Brems- und Zugkräfte (bei Triebfahrzeugen)
- Minimale Belastungen des Oberbaus, insbesondere den Verschleiß der Schienen betreffend

Die sichere Führung des Fahrzeugs im Gleis wird durch stetig vorhandene Radkräfte F_y und möglichst geringe Führungskräfte F_Q (s. Bild 1) gewährleistet. Dies wird durch eine elastische Kopplung des Laufwerks im Fahrzeug erreicht. Die gezielte Federung des Laufwerks in allen Koordinaten vermindert wesentlich die Führungskräfte. Dabei hält die vertikale Federung bei Abweichungen von der Sollage des Gleises die Radkraftminderungen in Grenzen.

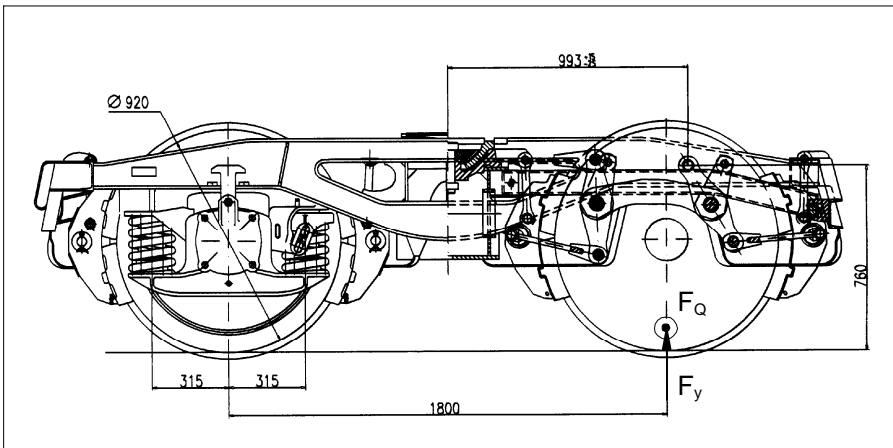


Bild 1: Standard-UIC-Güterwagendrehgestell Y25 mit Schraubenfedersätzen

Die Federung ist damit eine wesentliche Baugruppe eines Schienenfahrzeuglaufwerks, die insbesondere verantwortlich für die Entgleisungssicherheit eines Schienenfahrzeugs ist. Bei der Auslegung der Federung sind neben der ausreichenden Bauteilfestigkeit insbesondere drei Bedingungen zu beachten:

- Einhaltung der zulässigen Pufferstände
- Laufeigenschaften des Fahrzeugs
- Entgleisungssicherheit

Diese drei Bedingungen beeinflussen die Auswahl der Federart und die Festlegung der Federsteifigkeiten. Da die Pufferstände (Höhe der Puffermitte über Schienenoberkante SO) in internationalen Vorschriften festgelegt sind, ist der Federweg zwischen leerem und beladenem Wagen begrenzt. Dies bedeutet, daß z.B. bei leichtem Waggon und großer Nutzlast in der Regel eine zweistufige (progressive) Federung notwendig ist um einerseits im Leerzustand vernünftige Laufeigenschaften und Entgleisungssicherheit zu gewährleisten, andererseits aber den Federweg bis zur Vollast nicht zu groß werden zu lassen. Da die Pufferhöhen insgesamt nur in einem Bereich von 125 mm liegen dürfen und alle Toleranzen und Verschleiß berücksichtig werden müssen, liegt der effektiv zur Verfügung stehende Federweg zwischen Leer- und Vollast nur bei 60-70 mm. Bei den gestiegenen Anforderungen bezüglich höheren Geschwindigkeiten und/oder höheren Nutzlasten ergeben sich auch für die Federn immer höhere Anforderungen.

Früher wurden in Schienenfahrzeugen fast ausschließlich Stahlfedern mit linearer Kennlinie - zylindrische Schraubenfedern und Blattfedern - eingesetzt.

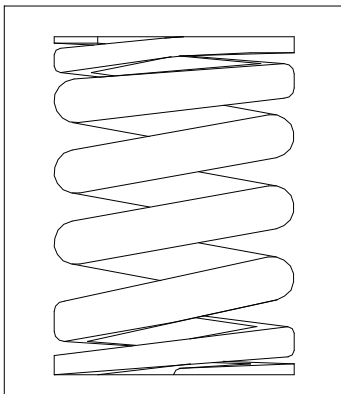


Bild 2: TKS®-Feder

Diese haben in einigen Anwendungen immer noch ihre Daseinsberechtigung, jedoch haben die gestiegenen Anforderungen zum Einsatz weiterentwickelter Federelemente geführt. Obwohl auch Anwendungen mit Gummi- oder Luftfedern im Einsatz sind, so sind doch die Stahlfedern wegen ihrer Vorteile hinsichtlich

- Robustheit
- Temperaturunabhängigkeit
- Lebensdauer
- Verschleißfestigkeit
- Relaxationsfestigkeit
- Wartungsfreundlichkeit

aus dem Schienenfahrzeugbau nicht wegzudenken. Um die gestiegenen Anforderungen erfüllen zu können, werden in zunehmendem Maße moderne Stahlfedern mit zweistufiger oder progressiver Kennlinie eingesetzt. Dies sind bei den Blattfedern zweistufige Parabelfedern, bei den Schraubenfedern Federn, die durch variable Windungsabstände progressive Kennlinien aufweisen. Eine neue Form dieser Federnart ist die TKS®-Feder (Trapez-Kreisquerschnitt-Feder, s. Bild 2).

Sie wurde von Langen & Sondermann seit 1994 bis zur Serienreife entwickelt und ist mittlerweile europaweit patentiert. Mittlerweile gibt es erste Serienfahrzeuge mit diesen Federn. Im folgenden werden die Eigenschaften, Besonderheiten und Vorteile dieser Schraubenfedernart ausführlich beschrieben.

2 Schraubenfedern für Schienenfahrzeuge

Schraubenfedern, die als Tragfedern für Schienenfahrzeuge eingesetzt werden, sind in aller Regel (zumindest sind dem Autor keine Ausnahmen bekannt) zylindrische Schraubenfedern mit angelegten und geschliffenen (DIN 2096, Bild 1) bzw. angelegten, ausgewalzten und geschliffenen Endwindungen (DIN 2096, Bild 3) (s. Bild 3). Standard sind heute noch Federn mit linearer Kennlinie.

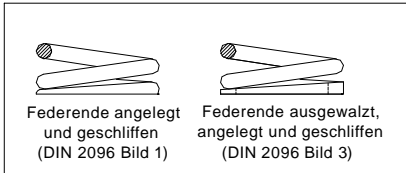


Bild 3: Endenausführungen von Schraubenfedern für Schienenfahrzeuge

Manchmal reicht der Bauraum nicht aus um eine Feder unterzubringen, die zum einen die geforderte Federrate, zum anderen die entsprechende Beanspruchbarkeit aufweist. In diesen Fällen weicht man häufig auf Federsätze aus, die aus zwei ineinandergestellten Federn bestehen. Dabei ist die Federlänge beider Federn gleich oder die kürzere Feder wird so unterlegt, daß beide Federn von Beginn an gemeinsam belastet werden, so daß wieder eine lineare Kennlinie aus der Parallelschaltung der beiden Federn entsteht. Die Wickelrichtung der Federn muß dabei unterschiedlich sein, damit sich die Windungen nicht verhalten können. Aus Daumenwert kann dabei der inneren Feder etwa 20 % der Gesamtlast zugemutet werden, d.h. die Federrate beträgt auch 20% der Gesamtfederate, bzw. 25% der Außenfeder.

Wenn wegen eines großen Unterschieds zwischen Leer- und Vollast eine progressive bzw. zweistufige Federung benötigt wird, setzt man meistens einen Federsatz ein, der aus zwei unterschiedlich hohen linearen Schraubenfedern besteht. Dabei ist die innere Feder in der Regel kürzer, setzt also erst später bei einer bestimmten Federkraft F_E ein. Die Federrate steigt dann aufgrund der dann wirksamen Parallelschaltung der beiden Federn an (s. Bild 4).

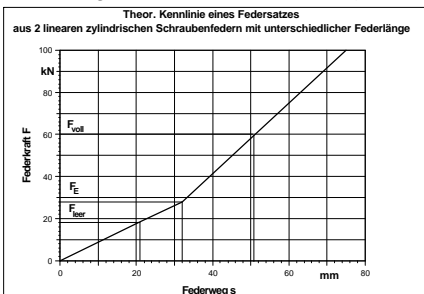


Bild 4: Theor. zweistufige Kennlinie eines Schraubenfedersatzes

Nachteil dieser Konstruktion ist, daß die Innenfeder bis zur Eingriffslast F_E unbelastet ist und daher in der Regel frei in der Außenfeder schwingen kann, was zu Lackschäden und unangenehmer Geräusentwicklung führen kann. Dazu müssen die Fertigungstoleranzen der Federlänge in der Regel durch Beilagen ausgeglichen werden, damit die Eingriffslast F_E nicht zu sehr variiert.

Dies hat dazu geführt, daß heute auch im Schienenfahrzeugbau zunehmend progressive Schraubenfedern eingesetzt werden. Diese werden üblicherweise als zylindrische progressive Schraubenfedern mit konstantem Drahtdurchmesser ausgeführt (s. Bild 5). Die Endwindungen werden wie bei den linearen Federn angelegt und geschliffen oder angelegt, gewalzt und geschliffen. Die Progression wird wie üblich über inkonstante Windungsabstän-

den. Diese werden üblicherweise als zylindrische progressive Schraubenfedern mit konstantem Drahtdurchmesser ausgeführt (s. Bild 5). Die Endwindungen werden wie bei den linearen Federn angelegt und geschliffen oder angelegt, gewalzt und geschliffen. Die Progression wird wie üblich über inkonstante Windungsabstän-

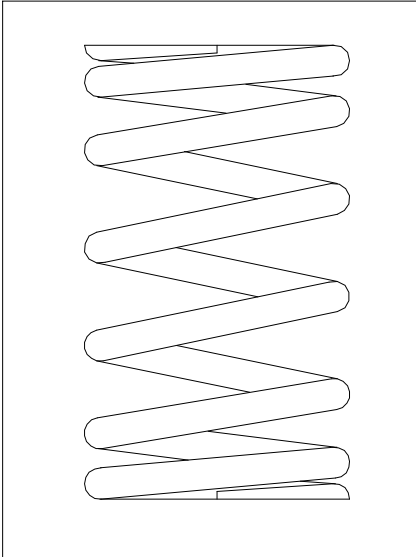


Bild 5: Zylindrische, progressive Schraubenfeder mit konstantem Drahtdurchmesser

de erreicht, wodurch sich die progressiv wirkenden Windungen ab einer Federkraft F_{ap} bis zum Ende der Progression bei F_{ep} kontinuierlich aufeinander abwälzen und so die abwälzenden Windungsteile nicht mehr weiter mitfedern. Dadurch steigt die Federrate an. Nachteilig an dieser Ausführung ist, daß die Federlänge größer ist und das Material in den progressiv wirkenden Bereichen aufgrund relativ niedriger Beanspruchung nicht gut ausgenutzt wird. Bei Automobilfedern beseitigt man diesen Nachteil in der Regel durch konische Reduktion des Drahtdurchmessers in den progressiv wirkenden Windungen durch Drehen. Bei Schienenfahrzeugfedern ist dies in der Regel nicht möglich, weil die recht dicken und langen Drähte mit entsprechend großen Durchmesserreduktionen wirtschaftlich kaum zu bearbeiten sind. Außerdem hat eine solche Ausführung den Nachteil, daß die zylindrische Form verloren geht und die Querrate stark abnimmt.

3 Besonderheiten der TKS[®]- Feder

Es gibt jedoch eine Ausführung, die diese Nachteile beseitigt: Bei der sogenannten TKS[®]-Feder nach Bild 2 wird der Draht in den progressiven Windungsbereichen so ausgewalzt, daß die Breite des entstehenden Rechteckquerschnitts dem Drahtdurchmesser der Feder entspricht und die Dicke entsprechend der Beanspruchung angepaßt wird. Dadurch entsteht eine Feder, die ihre zylindrische Form mit konstantem Innen- und Außendurchmesser beibehält, eine kürzere Länge aufweist und aufgrund der besseren Materialausnutzung leichter ist als eine vergleichbare (gleiche Kennlinie, gleiche Beanspruchung in den linear wirkenden Windungen) progressive Feder mit konstantem Drahtdurchmesser.

Die progressive Kennlinie ergibt sich wie bei den „normalen“ progressiven Schraubenfedern auch hierbei aus der variablen Steigung in den progressiv wirkenden Windungen, wodurch ab einer Kraft F_{ap} ein Abwälzen der Windungsteile aufeinander bis zur Kraft F_{ep} erfolgt. Durch das Abwälzen federn diese Windungsteile nicht mehr mit, was die Federrate progressiv ansteigen läßt. Durch Variation der Windungsabstände ist eine flexible Anpassung an den gewünschten Kennlinienverlauf möglich.

Durch die Auswalzung der Federenden ist die Auflagefläche der TKS[®]-Feder besonders groß, was eine optimale Kräfteinleitung gewährleistet. Die Auswalzung der Federenden hat weiterhin den Vorteil, daß das Abwälzen der Windungen nicht in Form einer Linienberührung zwischen den Windungen wie bei rundem Querschnitt, sondern flächig erfolgt. Damit ist der Verschleiß minimiert, was der Lebensdauer zugute kommt.

	TKS[®]- Feder	spannungs- und raten- gleiche Feder mit kon- stantem Draht-Ø	raten- und längen- gleiche Feder mit konstantem Draht-Ø
Drahtdurchmesser	37.0 mm	37.0 mm	33.7 mm
min. Dicke der ausge- walzten Windungen	16.7 mm	37.0 mm	33.7 mm
Federlänge (unbelastet)	254.9 mm	361.3 mm	254.9 mm
Blocklänge	181.9 mm	288.3 mm	181.9 mm
Gesamtwindungsanzahl	6.56	8.29	5.89
Anzahl der progressiv wirkenden Windungen	2 x 1.09	2 x 1.96	2 x 1.26
Fertiggewicht	21.9 kg	35.5 kg	20.9 kg
Blockspannung	720 N/mm ²	720 N/mm ²	973 N/mm ²

Tabelle 1: Vergleich unterschiedlicher Schraubenfedern mit gleicher progressiver Kennlinie

Tabelle 1 zeigt beispielhaft einen Vergleich einer TKS[®]-Feder mit einer konventionellen Schraubenfeder mit gleicher Kennlinie und konstantem Drahtdurchmesser. Wenn die Blockspannung in den linear wirkenden Windungen gleich ist, ergibt sich, daß die Federlänge der TKS[®]-Feder 106.4 mm geringer ist, was einen erheblichen Vorteil darstellt, da Federlänge aufgrund der Höhenbeschränkung von Schienen-

fahrzeugen stets ein Problem ist. Der Gewichtsvorteil der TKS[®]-Feder beträgt 13.6 kg.

Wenn der Bauraum und die Kennlinie gleich sein soll, müßte eine konventionelle progressive Feder mit konstantem Drahtdurchmesser eine um 35% höhere Blockspannung aufweisen. Andersherum bedeutet dies, daß eine zu hoch beanspruchte Feder nach Umwandlung in eine TKS[®]-Feder im gleichen Bauraum ca. 26% niedrigere Spannungen aufweisen würde. Dies ermöglicht in vielen Fällen erst den Einsatz einer progressiven Schraubenfeder, da der Bauraum wie schon gesagt üblicherweise stark beschränkt ist. Hier kann die TKS[®]-Feder ihre Vorteile ausspielen.

Erfreulich ist, daß sich die Mehrkosten für die Fertigung in Grenzen halten, insbesondere im Vergleich zu einem Federsatz besteht sogar eine Kostenersparnis.

Nach Lösung der konstruktiven Aufgabenstellung galt es die Entwicklung auch fertigungstechnisch umzusetzen. Dazu bedurfte es umfangreicher Entwicklungsarbeit um einen Fertigungsprozeß mit exakter Reproduzierbarkeit zu gewährleisten. Insbesondere dem Walz- und dem Wickelprozeß kommt dabei eine besondere Bedeutung zu, da hier die für die gewünschte Federkennlinie notwendigen Parameter eingehalten werden müssen. Die erforderliche Genauigkeit der Prozesse konnte durch CNC-Steuerungen der entsprechenden Anlagen erzielt werden. Beim Walzprozeß wird durch die Rechnersteuerung der Walzen die Querschnittskontur des Stabes bestimmt. Dabei wird durch kontinuierliches Messen der Walzparameter durch einen Rechner die erforderliche Steuerfunktion für die Walzen ermittelt. Beim Wickeln wird die Steigung der Schraubenlinie ebenfalls über einen Rechner gesteuert.

Direkt aus der Wickelwärme wird die Feder, für die üblicherweise der Federstahl 50 CrV 4 eingesetzt wird, in Öl gehärtet und erhält anschließend durch Anlassen die benötigte Festigkeit und Zähigkeit. Um eine exakte Auflagefläche zu erzielen, wird die Endwindung wie üblich geschliffen. Die weitere Fertigung läuft ab wie bei konventionellen Schraubenfedern. Ein intensives Kugelstrahlen mit arrondiertem Stahldrahtkorn nach VDF 8001 erzeugt in der oberflächennahen Randschicht einen Druckeigenzustand, der die Lebensdauer der Feder deutlich erhöht. Danach wird nach Kundenspezifikation lackiert und geprüft.

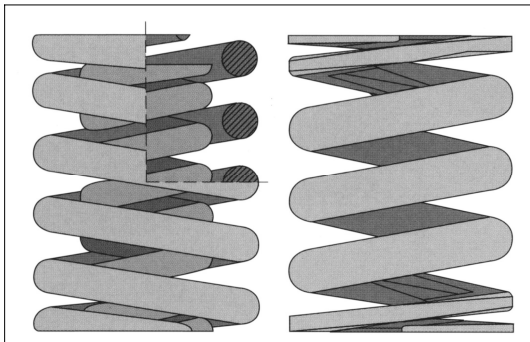


Bild 6: Vergleich: Herkömmlicher Federsatz - TKS[®]-Feder

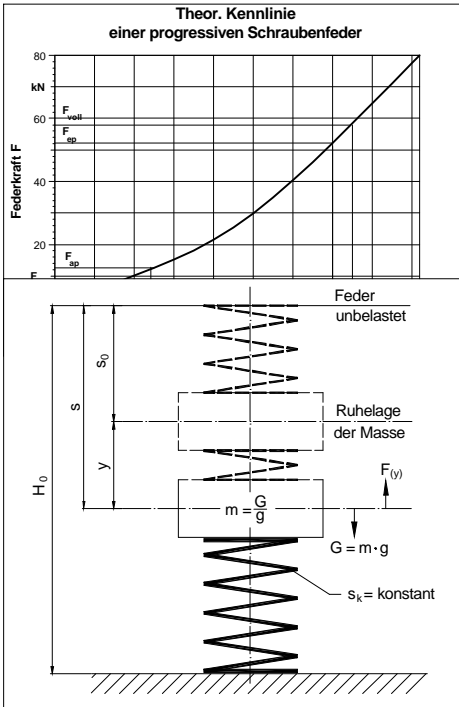
Ursprünglich wurde die TKS[®]-Feder als Ersatz für den zwei-stufigen Federsatz im sogenannten Y25-Drehgestell, dem Standard-UIC-Drehgestell für Güterwagen (s. Bild 1) entwickelt. Bild 6 zeigt einen Vergleich der beiden Lösungen. Dabei war die besondere Schwierigkeit, daß die TKS[®]-Feder in den gleichen Bauraum wie der Federsatz passen mußte und die Kennlinie in engen Grenzen vorgegeben war. Es

konnte aber eine TKS[®]-Feder entwickelt werden, die die geforderten Anforderungen erfüllt. Sie hat mittlerweile alle erforderlichen Laufversuche und Lebensdauererprobungen bei der DB AG erfolgreich absolviert. Auch der Betriebseinsatz in einigen Versuchswaggons zeigt, daß die TKS[®]-Feder die in sie gesetzten Erwartungen voll erfüllt. Daher wurde auch vom Eisenbahn-Bundesamt die Genehmigung zum Einbau der TKS[®]-Feder in Y25-Drehgestelle erteilt. Die Aufnahme als Standardfeder für dieses Laufwerk ins entsprechende UIC-Merkblatt 517 wurde beantragt und wird nach derzeitigem Stand in 2002 erfolgen.

Nach diesen positiven Ergebnissen wurden weitere Entwicklungen gestartet, wobei eine bereits in die Serienproduktion eingeflossen ist. Dabei handelt es sich um eine Sekundärfeder für Straßenbahnlaufwerke, die als Anwendungsbeispiel in Bild 7 dargestellt ist.

4 Auslegung progressiver Schraubenfedern

Erster Schritt bei der Auslegung progressiver Schraubenfedern ist die Festlegung der Kennlinie. Bild 8 zeigt den prinzipiellen Verlauf.



Ausgehend von den bekannten Lasten bei leerem und vollem Fahrzeug, dem zur Verfügung stehenden Federweg zwischen diese beiden Lasten und einer Aufbaueigenfrequenz bei den beiden Lasten kann man die linearen Anteile der unterhalb der Leerlast F_{leer} (Federrate c_A) und oberhalb der Vollast F_{voll} (Federrate c_E) schon festlegen.

Ideal und daher anzustreben ist in der Regel ein von der Belastung unabhängiges Schwingverhalten, was bedeutet, daß die Aufbaueigenfrequenz f_e zumindest im Bereich zwischen F_{leer} und F_{voll} konstant sein sollte.

Ausgehend von einem einfachen Schwingungs-Ersatzsystem nach Bild 9 gilt

$$F(s) = F_{\text{leer}} \cdot e^{\frac{s}{s_k} - 1}$$

$$c(s) = \frac{F(s)}{s} = \frac{F_{\text{leer}}}{s} \cdot e^{\frac{s}{s_k} - 1}$$

mit

$$s_k = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot f_e^2}{g}$$

und

$$f_e = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{c_A \cdot g}{F_{\text{leer}}}}$$

ii Bild 9: Einfaches Schwingungssystem (ungedämpfter Einmasse-Schwinger) mit progressiver Kennlinie

Üblicherweise nähert man die e-Funktion durch ein Polynom 3. Grades an.

Damit ist die Kennlinie praktisch komplett festgelegt. Bei der Festlegung der Blocklast ist zu beachten, daß zwischen der maximalen Einfederung, die 30 bis 40% Stoßzuschlag berücksichtigen sollte, und der Blocklast immer noch ein Sicherheitsabstand bleibt. Wenn man auf diese Weise die Kennlinie festgelegt hat, kann man die Berechnung durchführen.

Es würde den Rahmen dieses Aufsatzes sprengen an dieser Stelle den kompletten Rechnungsgang für eine TKS[®]-Feder zu erläutern. Es gelten prinzipiell die gleichen Gleichungen wie für zylindrische progressive Schraubenfeder mit konstantem Drahtquerschnitt. Die Berechnung einer TKS[®]-Feder unterscheidet sich nur dadurch, daß für die progressiv wirkenden Windungen das variable Profil berücksichtigt werden muß, wobei die Übergangsformen empirisch ermittelt wurden. Beim Federhersteller gibt es entsprechende Computerprogramme, mit denen die exakte Berechnung schnell geliefert werden kann.

5 Verwendete Formelzeichen

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
F_{voll}	Vertikale Federkraft bei voll beladenem Fahrzeug	N
F_{leer}	Vertikale Federkraft bei leerem Fahrzeug	N
F_E	Federkraft bei Beginn der 2. Stufe	N
F_{ap}	Federkraft bei Beginn der Progression	N
F_{ep}	Federkraft bei Ende der Progression	N
F_{Bl}	Federkraft bei Block	mm
S	Federweg	mm
C	Vertikale Federrate	N/mm
G	Erdbeschleunigung (9.81 m/s ²)	m/s ²
c_A	Anfangsfederrate	N/mm
c_E	Endfederrate	N/mm
G	Gleitmodul (für Federstahl: $G = 78500 \text{ N/mm}^2$)	N/mm ²
f_e	Eigenfrequenz	Hz

6 Literatur

Technische Daten Fahrzeugfedern

Teil 1: Drehfedern

Stahlwerke Brüninghaus GmbH, Werdohl

1973

Warmgeformte Federn

Konstruktion und Fertigung

Hoesch Hohenlimburg AG

1987