



## Triaxiale Federprüfmaschine



## Allgemeine Merkmale

Die Federprüfmaschine für Prüfkraft bis 600 kN der Klasse 0,5 ermöglicht die quasistatische Prüfung von Schraubenfedern. Die Ausrüstung der Maschine mit entsprechenden Kraft- und Wegsensoren im Zusammenhang mit einer freiprogrammierbaren digitalen Steuerung schafft die Grundlage für automatisch ablaufende programmierte Prüfvorgänge und deren Auswertung.

Die Maschine garantiert die Messung von Kräften und Wegen in drei Achsen:

- in Richtung der Federlängsachse und
- in allen Querrichtungen.

Es können folgende Prüfungen durchgeführt werden:

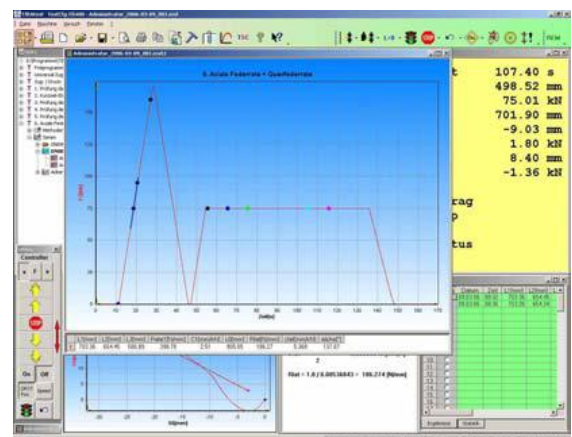
- Prüfungen des axialen Federweges,
- Kurzzeit-Elastizitätsprüfungen,
- Prüfungen der Auslenkrichtung und -kraft,
- Prüfungen der Größe und der Rotation der Auslenkung
- Prüfungen der Querrate

Die Grundversion der Maschine ist ausgelegt für Schraubenfedern mit einer Federmasse von 200 kg, einer freien Federhöhe von 1200 mm und einem Federaußendurchmesser von 650 mm. Die Enden der Feder können unter Last um bis zu 200 mm seitlich in jede Richtung verschoben werden. Dabei werden Seitenkräfte bis 150 kN übertragen und gemessen. Alle Kennwerte werden konstruktiv den Kundenwünschen angepasst.

Durch Einsatz der Dreiachs-Messplattform wird beispielsweise die EN 13298:2003, welche die Prüfung von Schraubendruckfedern für Schienenfahrzeuge regelt, voll unterstützt.

Die eingesetzte Computerhardware bietet vielfältige Möglichkeiten zur Koppelung der Messdaten mit den unterschiedlichsten Schnittstellen. Das ist speziell für die Analyse der Eigenschaften von Federn und damit deren Weiterentwicklung von besonderer Bedeutung.

Die Bediener- und Auswertesoftware ist flexibel und kann entsprechend der Kundenwünsche angepasst werden. Es können Datensätze angelegt werden, die bei Aufruf alle erforderlichen Maschinenparameter automatisch aktivieren.



# Federprüfung mit der Mehrkomponentenmesstechnik

## 1. Grundlagen der Triaxialmesstechnik

Allgemein sind Kraftaufnehmer so ausgelegt, dass nur der Betrag der Kraft in der Messrichtung des Kraftaufnehmers gemessen wird. Bereits kleine Abweichungen von der idealen Messrichtung bewirken Querkräfte und zusätzliche Momente welche ohne Mehrkomponentenmesstechnik nicht erkannt und nicht gemessen werden.

Für viele Bauteile, so auch für Schraubenfedern, gilt, dass bei gradliniger Belastung die Reaktion des Bauteils ein allgemeines Kräftesystem ergibt.

Um das Belastungsverhalten dieser Bauteile dreidimensional zu ermitteln ist eine Messtechnik erforderlich die sowohl die auftretenden Kräfte als auch Momente für alle drei Achsen erfasst.

Dazu ist die Anordnung der Kraftaufnehmer nach Bild 1 als auch die Anordnung der Kraftaufnehmer nach Bild 2 geeignet.

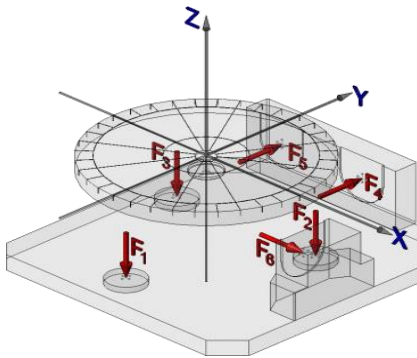


Bild 1: Anordnung der Kraftaufnehmer  $F_4, F_5$  und  $F_6$  in der  $x; y$  Ebene unsymmetrisch

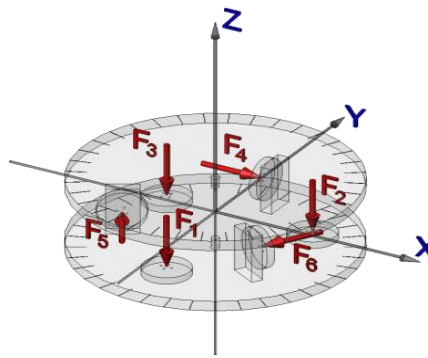


Bild 2: Kraftaufnehmer  $F_4, F_5$  und  $F_6$  in der  $x; y$  Ebene symmetrisch um  $120^\circ$  versetzt angeordnet

Um die Vektorrechnung zur Ermittlung der auftretenden Kräfte und Momente zu nutzen sei kurz auf Kraft und Moment eingegangen.

Die Kraft  $F$  ist ein linienflüchtiger Vektor, hat somit einen Betrag und eine Richtung. Die Kraft hat einen Angriffspunkt. Der Angriffspunkt ist der zur Kraft gehörende Ortsvektor  $r$ :

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} \quad \mathbf{r} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

Der Vektor des statischen Momentes bezüglich eines festgelegten Koordinatenpunktes 0 für das gewählte kartesische Koordinatensystem ist das Kreuzprodukt aus Ortsvektor und Kraftvektor und ist ein freier Vektor:

$$\mathbf{M} = \mathbf{r} \times \mathbf{F} = \begin{vmatrix} e_x & x & F_x \\ e_y & y & F_y \\ e_z & z & F_z \end{vmatrix} = \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} yF_z - zF_y \\ zF_x - xF_z \\ xF_y - yF_x \end{bmatrix}$$

Nun lassen sich die Berechnungsgleichungen aus der Summe aller Kräfte = 0 und Summe aller Momente = 0 für das allgemeine Kräftesystem formulieren:

$$\mathbf{F}_R = \sum_{j=1}^n \mathbf{F}_j = \begin{bmatrix} F_{Rx} \\ F_{Ry} \\ F_{Rz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n F_{jx} \\ \sum_{j=1}^n F_{jy} \\ \sum_{j=1}^n F_{jz} \end{bmatrix} \quad \mathbf{M}_R = \sum_{j=1}^n \mathbf{r}_j \times \mathbf{F}_j = \begin{bmatrix} M_{Rx} \\ M_{Ry} \\ M_{Rz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n (y_j F_{jz} - z_j F_{jy}) \\ \sum_{j=1}^n (z_j F_{jx} - x_j F_{jz}) \\ \sum_{j=1}^n (x_j F_{jy} - y_j F_{jx}) \end{bmatrix}$$

Das allgemeine Kräftesystem lässt sich als Kraftwirkungslinie durch eine Vektorgleichung als Gerade (Punkt/Richtungsgleichung) mit dem Parameter  $\lambda$  (Punkt  $\mathbf{g}_0$  für  $z = 0$ ) darstellen.

$$\mathbf{g} = \mathbf{g}_0 + \lambda \mathbf{a} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \lambda \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{Ry}/F_{Rz} \\ M_{Rx}/F_{Rz} \\ 0 \end{bmatrix} + \lambda \begin{bmatrix} F_{Rx} \\ F_{Ry} \\ F_{Rz} \end{bmatrix}$$

Für die Durchstoßpunkte der x- ; y-Ebene bei  $z = 0$  ist  $x = M_{Ry}/F_{Rz}$  und  $y = M_{Rx}/F_{Rz}$ .  
Alle weiteren Durchstoßpunkte der x ; y Ebene entlang der z-Achse lassen sich aus den 3 skalaren Gleichungen, die aus der Geradengleichung der Kraftwirkungslinie gebildet werden, berechnen.  
Es gilt:

$$x = x_0 + \lambda a_x ; y = y_0 + \lambda a_y ; z = z_0 + \lambda a_z \text{ und } \lambda = (z-z_0)/a_z \text{ für beliebige } z$$

Das gleiche Ergebnis für beliebige Durchstoßpunkte erhält man auch, wenn man die x- ; y-Ebene auf der z-Achse verschiebt und mit den neuen Ortsvektoren die Momentenbilanz und daraus wieder die Durchstoßpunkte berechnet.

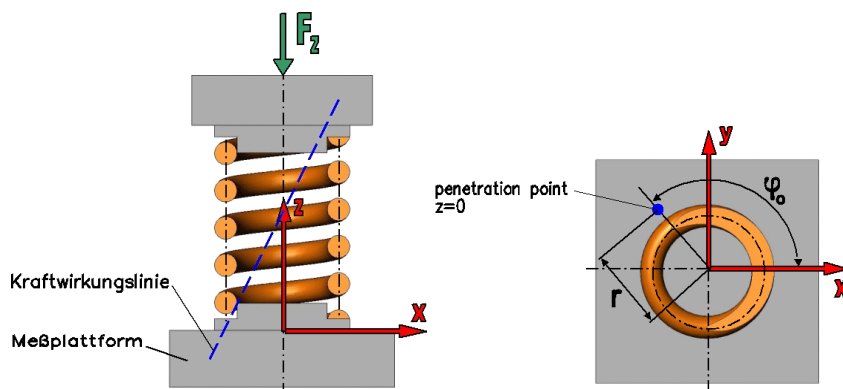


Bild 3: Aufbau der Federprüfung

## 2. Berechnung der Kraftwirkungslinie und der Standardabweichung der Gesamtmessunsicherheit für die Federprüfmaschine FED 400

### 2.1 Kraftwirkungslinie

Die Kraftmesswerte und die Ortsvektoren der Kraftangriffspunkte werden in je einer Matrix erfasst.

Kraftmesswerte:

Ortsvektoren:

	x	y	z			x	y	z		
$f_1$	0	0	-40,33	kN		$r_1$	0,0	-30,5	-33,4	cm
$f_2$	0	0	-39,68	kN		$r_2$	26,4	15,3	-33,4	cm
$f_3$	0	0	-19,97	kN		$r_3$	-26,4	15,3	-33,4	cm
$f_4$	0	2,31	0	kN		$r_4$	15,0	43,5	-19,9	cm
$f_5$	0	1,93	0	kN		$r_5$	-15,0	43,5	-19,9	cm
$f_6$	-8,25	0	0	kN		$r_6$	36,5	0,0	-19,9	cm

Die Koordinatenwerte für die Ortsvektoren sind durch die Lage der Kraftmessdosen in der Prüfplattform festgelegt.  $z = 0$  wurde für die Auflagefläche der Prüfplattform gewählt.

Ergebnis der Messung und Berechnung in Matrixform:

		$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$f_6$	Summe
$F_x$	kN	0	0	0	0	0	-8,25	$F_{Rx}=-8,25$
$F_y$	kN	0	0	0	3,31	1,93	0	$F_{Ry}=4,24$
$F_z$	kN	-40,33	-39,68	-19,97	0	0	0	$F_{Rz}=-99,98$
$M_x$	Nm	12299	-6051	-3045	459	385	0	$M_{Rx}=4045$
$M_y$	Nm	0	-10476	5272	0	0	-1642	$M_{Ry}=-6846$
$M_z$	Nm	0	0	0	346	-289	0	$M_{Rz}=56$

Berechnung der Durchstoßpunkte:

Dabei ist  $z = h_1$  Auflage der Schraubenfeder unten und  $z = h_2$  Auflage der Schraubenfeder oben.

	Kartesische Koordinaten				Zylinder Koordinaten						
	cm			cm	cm	cm		cm		°	
$z$	0	$\lambda$	-	$x$	6,8	$y$	-4,0	$r$	8,0	$\varphi_0$	329,4
$z=h_1$	6	$\lambda$	0,06	$x$	6,4	$y$	-3,8	$r$	7,4	$\varphi$	329,2
$z=h_2$	56	$\lambda$	0,56	$x$	2,2	$y$	-1,7	$r$	2,8	$\varphi$	323,1

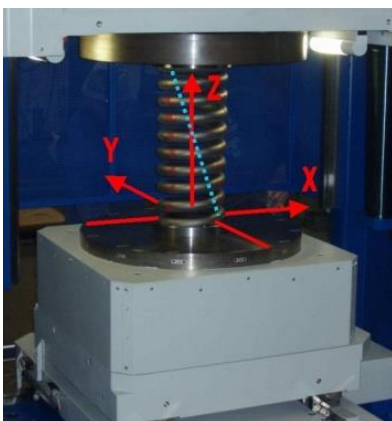


Bild 4: Federprüfmaschine FD 400 mit Koordinatenkennzeichnung (rot) und Kraftwirkungslinie (blau punktiert)

## 2.2 Gesamtmessunsicherheit

Die Gesamtmessunsicherheit wird ermittelt in dem die Koordinaten der Kraftwirkungslinie als Beginn einer zwölfmaligen Drehung je  $30^\circ$  einer Referenzschraubenfeder gesetzt werden.

Dazu wird die gemessene Kraftwirkungslinie auf der Referenzschraubenfeder durch einen Strich gekennzeichnet. Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung eines Testnormal, bestehend aus einem schräg stehenden Zylinder, der von Flanschen geführt wird und eine genauere Einstellung der Gradzahl ermöglicht.

Jede der zwölf Stellungen wird gemessen und die Kraftwirkungslinie mit dem Durchstoßpunkt bei  $z = 0$  ausgewertet.

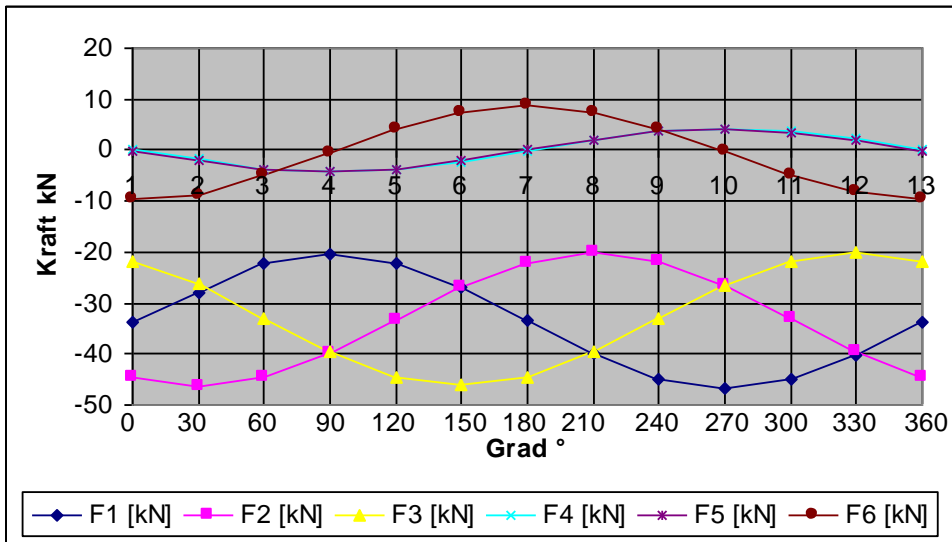


Bild 5: Auswertung der Kraftmessung über  $360^\circ$  mit einem Testnormal. Anordnung der Kraftmessdosen nach Bild 1a.

F1, F2, F3 z-Achse  
F4, F5 y-Achse  
F6 x-Achse

Auswertung Durchstoßpunkte der Kraftwirkungslinie bei  $z = 0$  über  $360^\circ$ :

$\varphi =$	$\varphi =$	$\varphi =$	$\varphi =$	$\varphi =$	$\varphi =$	$\varphi =$	$\varphi =$	$\varphi =$	$\varphi =$	$\varphi =$	$\varphi =$	
0	0+30°	0+60°	0+90°	0+120°	0+150°	0+180°	0+210°	0+240°	0+270°	0+300°	0+330°	
358,9	29,5	57,8	88,6	119,4	149,9	179,7	210,2	240,4	270,1	300,1	329,4	°
7,9	7,8	7,7	7,6	7,6	7,6	7,7	7,8	7,8	7,8	7,9	8	r (cm)

### 3. Messung der axialen Federrate, Biegerichtung und Querfederrate

Die EN 13298:2003 regelt die Prüftechnik für Schraubendruckfedern an Schienenfahrzeugen.

Diese EN kann aber auch für andere Einsatzfälle vereinbart werden.

Zur Prüfung der axialen Federrate reicht eine einaxiale Prüfmaschine aus. Für die Ermittlung der Biegerichtung und der Querfederrate ist eine mehrdimensionale Prüfmaschine wie in Bild 3 erforderlich.



Bild 6: Montage der Prüfplattform und der x ; y Achsführungen

#### 3.1 Axiale Federrate

Axiale Federrate:

$$K_s = \frac{F_V - F_U}{L_U - L_V}$$

Wenn nicht anders vereinbart, wird für  $F_V = 1,1$  der minimalen Betriebskraft  $F_A$  und für  $F_U = 0,9$  der minimalen Betriebskraft  $F_A$  angesetzt. Mehrfachmessungen werden mittels Hüllkurven zwischen  $F_U$  und  $F_V$  ausgewertet.

#### 3.2 Querfederrate

Querfederrate:

$$K_t = \frac{Q_j}{r_j} = \frac{1}{2} \left| \frac{Q_{B1} - Q_{A1}}{r_{B1} - r_{A1}} + \frac{Q_{B2} - Q_{A2}}{r_{B2} - r_{A2}} \right|$$

Für die aufgebrachte Axialkraft  $F_j$  wird, wenn nicht anders vereinbart, wieder die minimale Betriebskraft eingesetzt.  $F_j$  muss mit einer maximalen Abweichung von 1 % konstant gehalten werden.

Die Feder wird in Biegerichtung versetzt von 0 nach  $r_{A1}$  und  $Q_{A1}$  gemessen. Danach  $r_{A1}$  nach  $r_{B1}$  und  $Q_{B1}$  gemessen. Damit sind die Messwerte für den ersten Summanden der Bestimmungsgleichung für die Querfederrate bestimmt.

Die Feder wird in Gleichgewichtsposition gefahren.

Die gleiche Prozedur wird nach Versetzung der Federstützfläche in die der Biegerichtung entgegengesetzte Richtung durchgeführt. Die Messwerte werden in den zweiten Summanden der Bestimmungsgleichung eingesetzt.

### 3.3 Messergebnisse

Schraubendruckfeder:  $L_0 = 1200 \text{ mm}$  ;  $D = 380 \text{ mm}$  ;  $d = 60,4 \text{ mm}$

Axiale Federrate:  $K_s = 399,7 \text{ N/mm}$

Querfederrate:  $K_t = 183,3 \text{ N/mm}$

WPM Werkstoffprüfsysteme  
Leipzig GmbH

Gewerbegebiet Wachau  
Nordstraße 15  
04416 Markkleeberg

Telefon: +49 (0) 3 42 97 / 14 35 - 0  
Telefax: +49 (0) 3 42 97 / 14 35 -10

E-Mail: [info@wpm-leipzig.de](mailto:info@wpm-leipzig.de)  
Internet: [www.wpm-leipzig.de](http://www.wpm-leipzig.de)

