

Kalibrierung einer Tellerfeder-Prüfmaschine

Was steht dazu in der Norm, und wie wird eine Kalibrierung praktisch durchgeführt?

Die internationale Norm ISO 7500-1 „Metallic materials - Verification of static uniaxial testing machines - Part 1: Tension/compression testing machines“ wurde als Europäische Norm übernommen und als Deutsche Ausgabe unter DIN EN ISO 7500-1 „Prüfung von Prüfmaschinen für statische einachsige Beanspruchung, Teil 1: Zug- und Druckprüfmaschinen-Prüfung und Kalibrierung der Kraftmeseinrichtung“ im November 1999 veröffentlicht.

Weil nach den Regeln der Europäischen Normung (CEN-Rules; CEN = Comité Européen de Normalisation) nationale Normen nicht im Widerspruch zu Europäischen Normen stehen und auch nicht Gleiches beinhalten dürfen, wurden u. a. folgende deutschen Normen zurück gezogen:

- DIN 51 232 „Federprüfmaschinen zur statischen Prüfung von Federn (Juli 93)“,
- DIN 51 302-1 „Prüfung von Zug-, Druck- und Biegeprüfmaschinen (Juli 93)“ und
- DIN EN 10002-2 „Metallische Werkstoffe – Zugversuch, Teil 2: Prüfung der Kraftmeseinrichtung von Zugprüfmaschinen (Ausgabe Juli 1993)“.

Damit wichtige, in dieser „neuen“ Norm (noch) nicht berücksichtigte nationale

Belange nicht verloren gehen, wurde die deutsche Ausgabe durch folgende nationale Beiblätter ergänzt:

- Beiblatt 1: „Allgemeines zu Anforderungen und zur Prüfung und Kalibrierung von Zug-, Druck- und Biegeprüfmaschinen“
- Beiblatt 2: „Allgemeines zu Anforderungen und zur Prüfung und Kalibrierung von Federprüfmaschinen“
- Beiblatt 3: „Allgemeines zu Anforderungen und zur Prüfung und Kalibrierung von Schwingprüfmaschinen“

Diese Beiblätter enthalten nützliche Informationen zu Anforderungen und zur Prüfung und Kalibrierung der verschiedenen Prüfmaschinenarten, die nicht als Festlegungen in der Europäischen Norm EN ISO 7500-1 enthalten sind, sich aber in langjähriger Praxis in Deutschland bewährt haben. Sie sollen auch bewirken, ihren Inhalt bei zukünftigen Revisionen in die Norm selbst leichter einfließen zu lassen.

Bezogen auf die besonderen Anforderungen von Tellerfeder-Prüfmaschinen gilt Folgendes:

Für die Kalibrierung der Kraftmeseinrichtung hat sich eigentlich nichts Grundlegendes geändert. Die Änderungen berücksichtigen vor allem den Technologiewandel von mechanischen bzw. hydraulischen Pendelkraft-Messeinrichtungen zu elektromechanischen und elektronischen

Kraftmeseinrichtungen mit digitaler Messwertverarbeitung. Weil mit modernen Kraftmeseinrichtungen sowohl Zug- als auch Druckkräfte gemessen werden können, sind eigene Normen für Zug-, Druck- und Biege-Prüfmaschinen nicht mehr sinnvoll. Federprüfmaschinen werden – je nach Art der zu prüfenden Federn – einer dieser Maschinenarten zugeordnet. Bei den DIN-Normen für Prüfmaschinen gab es die Klasse 0,5 für die Kraftmeseinrichtung nur in der Norm DIN 51232 für Federprüfmaschinen. In der Internationalen Norm ISO 7500-1 gibt es sie für alle Prüfmaschinen.

Diese Norm und ihre deutschen Beiblätter berücksichtigen den Grundsatz, dass sie möglichst allgemein gültig und unabhängig von der Erzeugnisform der Proben bzw. Prüfobjekte sein sollen und konstruktiven Lösungen nur als Beispiel gezeigt, aber nicht Gegenstand der Norm sein dürfen. Damit soll der technische Fortschritt nicht behindert werden. Erzeugnispezifische Anforderungen, wie z. B.

Druckringe für Tellerfedern oder Rollwagen für Blattfedern, werden deshalb in dem Beiblatt 2 nicht oder nur allgemein behandelt (sie sollten möglichst in die erzeugnispezifischen Normen aufgenommen werden).

Besondere Anforderungen an die Kalibrierung von Federprüfmaschinen

Dynamische Messfehler

Auch der quasi-statische Zug- oder Druckversuch ist bezogen auf die Kraftmessung einer dynamischen Prüfung. Auch wenn die Probe mit einer kleinen (= quasi-statischen) Geschwindigkeit gezogen oder gedrückt wird, so bewirkt dies bei steifen (harten) Proben grosse (Änderungs-) Geschwindigkeiten des Kraftsignals. Das gilt auch und besonders für die Prüfung von steifen Tellerfedern. Dabei wird eine „dynamische“ Prüfung im Durchlaufverfahren, d. h. ohne Halt an den Messpunkten, angestrebt, weil

- kurze Prüfzeiten die Wirtschaftlichkeit erhöhen und
- jede Feder vor dem Prüfen wenigstens einmal gesetzt werden muss (mit einem zusätzlichem Setzzyklus vor dem Prüfzyklus).

Die Federn werden durch die Prüfung – im Gegensatz zum Zugversuch – nicht zerstört. Damit sind für besondere Anwendungen auch 100%-Prüfungen möglich, die dann im meist kurzen Takt der Produktion erfolgen müssen.

Nach dieser Norm wird die Kraft aber nur statisch kalibriert. Im Beiblatt 1 wird zwar erstmals darauf aufmerksam gemacht, dass auch bei der quasi-statischen

Prüfung zusätzlich zu den statischen auch dynamische Messfehler auftreten. Es werden aber nur mögliche Ursachen dafür erwähnt.

Prüfen bei Be- und Entlastung

Bei den üblichen Zug-, Druck- und Biegeprüfungen werden die Proben zunehmend bis zum Bruch belastet. Tellerfeder werden dagegen bis zu einem Höchstwert be- und dann wieder entlastet – und in beiden Belastungsrichtungen müssen Prüfwerte bestimmt werden. Deswegen ist für Tellerfeder-Prüfmaschinen auch die relative Umkehrspanne (Kenngrösse für die Hysterese der Kraftmesseinrichtung) von Bedeutung. Die Umkehrspanne wird nach der neuen Norm nur auf Anforderung bestimmt.

Federwegmessung

Die am häufigsten gemessene Kenngrösse bei der Zug-, Druck- und Biegeprüfung ist die dabei erreichte Höchstkraft. Sie kann ohne Messung des Weges oder der Verformung bestimmt werden. Bei der Federprüfung muss aber die Federkraft immer abhängig vom Federweg – oder umgekehrt – bestimmt werden.

Beiblatt 2 verweist im Gegensatz zur „alten“ Norm DIN 51232 auf diese spezifische Anforderungen an Federprüfmaschinen. Das betrifft die über die Federsteifigkeit (Federrate) definierte gegenseitige

Abhängigkeit von Federkraft und Federweg und auch den möglichen Einfluss aussermittiger Einspannungen und Kraftverläufe auf die Kraftmessung.

Für eine Konkretisierung von Fehlergrenzen für die Federwegmessung, z. B. für verschiedene Federarten, Steifigkeits- oder Anwendungsbereiche, fehlten leider entsprechende Angaben der Federnhersteller oder –anwender (kein Vertreter der Federindustrie im DIN-Normenausschuss!). Es wurde aber der Hinweis aufgenommen, dass die Kraftänderung, die aus dem Federweg-Messfehler resultiert, nicht grösser als 0,5 % vom jeweiligen Messwert sein sollte, damit der Prüfkraft-Gesamtfehler die 1 %-Fehlergrenze nicht überschreitet (bei Fehlergrenze 0,5 % für die „reine“ Kraftmesseinrichtung).

Der Federweg wird üblicherweise indirekt als Wegänderung bzw. Verschiebung der Fahrtraverse (elektromechanischer Spindelantrieb) oder des Kolbens (hydraulischer Antrieb) gemessen. Dabei muss aber die Eigenverformung der Prüfmaschine berücksichtigt werden, die meist deutlich grösser ist als der jeweils zulässige Messfehler. Sie ist die Summe der Verformungen aller im Kraftfluss liegenden Maschinenkomponenten, wie Kraftaufnehmer, Traversen, Säulen, Spindeln oder Kolben usw. und liegt üblicherweise zwischen 0,5 und 1 mm, bezogen auf die Nennlast

der Prüfmaschine. Die Verformungen sind zwar reinelastisch. Weil aber an den Kontaktstellen zwischen den Komponenten am Anfang der Belastung lokale Verformungen (Bild 2) und auch reibungsbehaftete Verschiebungen (Bild 3) auftreten, ist die Kraft-Verformungskennlinie der Maschinenkomponenten im Anfangsbereich progressiv gekrümmt und bildet bei Entlastung einen Hysterese. Durch ausreichend hohe Vorspannungen und besondere konstruktive Massnahmen können diese Effekte weitgehend eliminiert werden.

Einen entscheidenden Anteil an diesem Effekt hat die Kontaktfläche zwischen den Anschlussteilen (Druckringaufnahmen) der Tellerfeder-Prüfmaschine und den auswechselbaren federtypspezifischen

Federaufnahmen (Druckringen usw.). Ein weiterer Effekt: Der Kraftfluss geht bei der Tellerfederprüfung nicht mittig durch die Feder (wie bei der Zugprüfung durch die Zugprobe), sondern wird über die Druckringe und die Tellerfeder konzentrisch auseinander und wieder zusammen geführt (siehe Kraftfluss in Bild 1). Druckringe und Druckringaufnahmen werden so auf Biegung beansprucht. Die entsprechenden Verformungen sind damit auch abhängig von den Abmessungen der geprüften Tellerfeder. Deshalb muss bei hohen Anforderungen an die Federwegmessung die Kraft-Verformungskennlinie der jeweilige Prüfanordnung gemessen, gespeichert und bei der Bestimmung des Federweges berücksichtigt werden.

Wenn für kleine und besonders harte

Federn die Messunsicherheit der Federwegmessung $< 0,02$ mm sein muss (im Beiblatt 2 genannter Erfahrungswert), dann muss der Federweg mit einem zusätzlichen, hochpräzisen Messsystem (z. B. Laserinterferometer) gemessen werden, das mittig in der Prüfachse angeordnet ist und die Wegänderung möglichst nahe an den Stellen „abgreift“, an denen die Kraft in die Tellerfeder übertragen wird.

Für die Kalibrierung und Prüfung einer Tellerfeder-Prüfmaschine unter Berücksichtigung der für die Federprüfung entscheidenden Abhängigkeit von Federkraft und Federweg bieten sich grundsätzlich zwei verschiedene Methoden an:

1. Komponentenprüfung
2. Vergleich mit Federsteifigkeits-Normalen

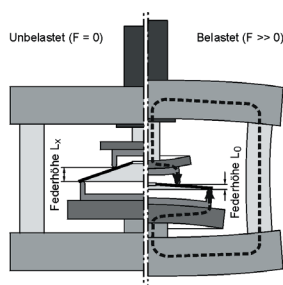


Bild 1: Verformung einer Tellerfeder-Prüfmaschine (stark überzeichnet). Die gestrichelte Linie zeigt den Kraftfluss (senkrecht: Zug- oder Druckbeanspruchung, waagrecht: Biegebeanspruchung)

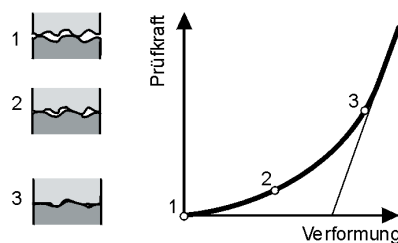


Bild 2: Ausbildung der Kontaktflächen zwischen zwei druckbeanspruchten Komponenten (stark überzeichnet) und dadurch verursachte progressive Krümmung der Kraft-Verformungskennlinie

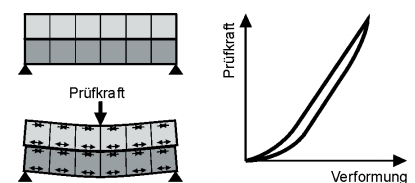


Bild 3: Reibungsbehaftete Verschiebungen zwischen zwei aufeinander liegenden, biegebeanspruchten Komponenten (z. B. Druckring und Druckringaufnahme; stark überzeichnet) mit dadurch verursachter Hysterese der Kraft-Verformungs-Kennlinie der Prüfmaschine

1. Anmerkungen zur Komponentenprüfung

Die Software ist inzwischen ein integraler Bestandteil fast aller neuen Prüfmaschinen; nicht nur bei der Auswertung der Messwerte und der Überwachung des Prüf-ablauf, sondern auch und besonders bei der Umformung und Übertragung der Messsignale. Dazu gehören u. a. folgende Funktionen:

- Korrektur von Nullpunkt- und Empfindlichkeitsabweichungen (bei analogen Messwertaufnehmern)
- Korrektur der Tarakraft (bei Kraftaufnehmern)
- Linearisierung der Empfindlichkeits-Kennlinie (bei analogen Aufnehmern)
- Überwachung und Steuerung der Analog-Digital-Umformung (bei analogen Aufnehmern)
- Interpolation der Messsignale (bei inkrementalen Aufnehmern)
- Messwertfilterung
- Normierung der Messsignale (Umrechnung in SI-Basiseinheiten unter Berücksichtigung der Bewertungsfaktoren, wie Messbereich, Übersetzungsverhältnis usw.)
- Zeitliche Synchronisation von Kraft- und Weg-/Verformungsmesswerten (für mehrere, einander zugeordnete Messsignale)

Erst durch dieser „intelligenten“ Technik konnten die Messbereiche deutlich vergrößert werden, weil u. a. systematische Messfehler durch Kalibrieren und z. T. sogar automatisch bestimmt und dann eliminiert werden können.

Die Software, die Bestandteil der Messeinrichtung ist, wird mit der Kalibrierung der Messeinrichtung geprüft. Weil sie sehr schnell und in Echtzeit reagieren muss, läuft sie meist in speziellen Prozessoren ab.

Die Auswertung und Weiterverarbeitung der „fertigen“ Messwerte erfolgt dagegen meist auf einem PC. Hier können z. B. auch die Federweg/-höhen-Messwerte bestimmt werden (durch Subtraktion der gespeicherten, kraftbezogenen Maschinenverformung vom gemessenen Traversen- oder Kolbenweg).

Im Anhang A der neuesten Ausgabe der Norm DIN EN 10002-1 für den Zugversuch an Metallen, Ausgabe Nov. 2001, sind auch Überlegungen zur Prüfung der Software für den automatischen Zugversuch eingeflossen (Abschnitt A5). Anhang J enthält Ausführung zur Präzision des Zugversuches und der Abschätzung der Messunsicherheit (beide Anhänge sind als PDF-Datei beigefügt).

2. Anmerkungen zum Vergleich mit Federsteifigkeits-Normalien

Der Vorteil eines solchen Normal ist, dass damit gleichzeitig die Kraft und der zugeordnete Federweg bestimmt werden können und eine Funktionskontrolle relativ schnell und einfach durchgeführt werden kann.

Die Kontrolle/Prüfung der dynamischen Kraftmessfehler soll mit einem solchen Normal geprüft werden, wobei davon ausgegangen wird, dass dessen Kraft-Weg-Kennlinie im vorgesehenen Bereich unabhängig von der Geschwindigkeit ist (reibungsfreie Feder). Für diese Anwendung wird die höchste Prüfgeschwindigkeit so gewählt, dass sich die in Abhängigkeit von der Federsteifigkeit des Normals einstellende Kraftänderungsgeschwindigkeit so gross ist wie die größte beim Prüfen. Dabei genügt es, die Prüfung im unteren Bereich des Kraftaufnehmers durchzuführen, weil die Signallaufzeiten der Messeinrichtung unabhängig von den Beträgen der Messwerte sind.

Für die Kraft- und Federwegkalibrierung gibt es aber folgende Probleme:

Es werden relativ viele solcher Normalien benötigt, um die Kraft- und Wegmessung mit den erforderlichen hohen Messgenauigkeiten kalibrieren zu können. Die Messung in der Hauptachse (Mitte) der

Prüfmaschine berücksichtigt nicht die folgenden Messfehler:

- Aus der konzentrischen Übertragung der Kraft auf die Tellerfeder (Durchbiegung der Druckringe und Druckringaufnahmen, abhängig von Prüfkraft und Federabmessungen) und
- aus der Kraftübertragung zwischen den Kontaktflächen der Maschinenkomponenten, insbesondere zwischen Druckringen und Druckplatten (unlineare und hysterebehaftete Kraft-Weg-Kennlinie; abhängig von Prüfkraft, Vorspannung und konstruktiver Ausführung)

Man sollte deshalb folgende Massnahmen vorgesehen:

a) Direkte Federwegmessung

Der Federweg wird als Abstand zweier kardanisch gelagerter „Messsterne“ gemessen. Diese werden mit konstanter Federkraft punktförmig an 3 Stellen in kurzem Abstand direkt in der Wirklinie

der Krafteinleitung an die Druckringen angelegt. Als Wegmesssystem kann ein Laser-Interferometer vorgesehen werden, das ein inkrementales Messsignal erzeugt. Die Referenzierung wird abgeleitet aus dem Messsignal des absolut messenden Kolbenwegaufnehmers im Stillstand vor jedem Setz- und Prüfvorgang. Die Auflösungen der beiden Aufnehmer sollte mindestens 0,1 µm sein.

b) Indirekte Federwegmessung

Für jede Feder-Druckring-Kombination wird eine Be- und Entlastungs-Kennlinie der Maschine in einem einmaligen Kalibrier-vorgang erfasst und gespeichert (berücksichtigt unlineare und hysterebehaftete Kennlinie). Dazu wird eine dicke, praktisch verformungsfreie Platte auf den Rand des unteren Druckringes aufgelegt.

Die Messung der Maschinenverformung erfolgt über das direkte Wegmesssystem mit den „Messsternen“. Wenn sich in den Vorversuchen herausstellt, dass auf eine direkte Messung mit dem sehr teuren Laserinterferometer verzichtet werden

kann, dann wird ein kostengünstiger digitaler Messtaster eingesetzt, z. B. MT 5 oder 25 von Heidenhain.

Durch besondere konstruktive Maßnahmen (schmale, kreisringförmige Auflagen, Messung direkt an den Druckringen) sollen Unlinearitäten und Hysteresen so klein gehalten werden, dass eine Reproduzierbarkeit im geforderten Messunsicherheitsbereich von $\pm 0,01$ mm erreicht werden. Dies sollte aber erst durch Messungen bestätigt werden, sofern praktische Erfahrungen fehlen.