

Produktinformation

Thermomechanisches Ermüdungsprüfsystem - ein wissensbasiertes Expertensystem zur Lösung komplexer Prüfanforderungen



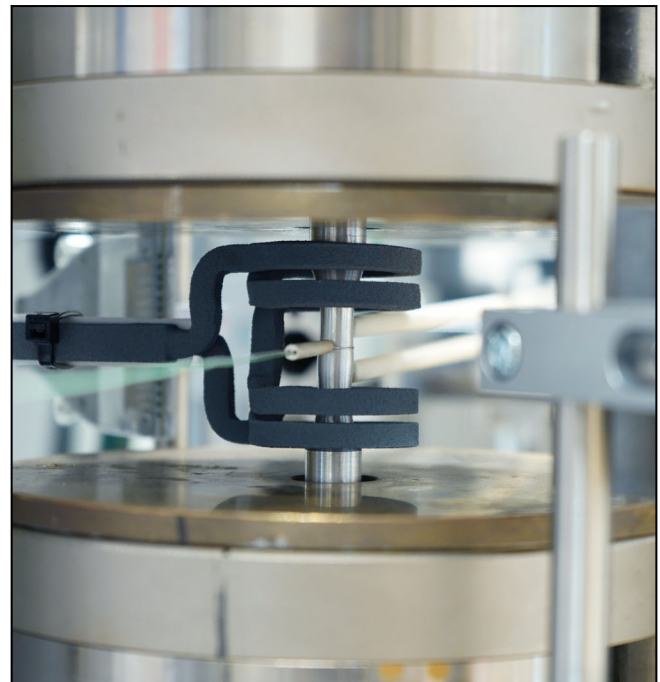
Thermomechanisches Ermüdungsprüfsystem

Anwendungsbereich

Für die Auslegung und die Konstruktion von gleichzeitig thermisch und mechanisch zyklisch belasteten Bauteilen werden verlässliche Kennwerte für die Vorhersage der Ermüdungslebensdauer und des zyklischen Verformungsverhaltens benötigt. Da diese Bauteile wiederholten Temperaturveränderungen ausgesetzt sind und gleichzeitig in ihrer thermischen Ausdehnung beschränkt sind, unterliegen sie zyklisch wechselnden Belastungen. Die dadurch entstehenden Zwangsbedingungen werden verursacht von angrenzenden Komponenten oder im Bauteil selbst durch inhomogene Temperaturverteilungen oder unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten.

Für zuverlässige Aussagen zur Ermüdungslebensdauer und für die optimierte und sichere Auslegung dieser Bauteile werden präzise Kennwerte des Verformungsverhaltens von den eingesetzten Werkstoffen benötigt.

Das Prüfsystem für die thermomechanische Ermüdungsprüfung erfüllt die Anforderungen des European Code-of-Practice (CoP) und der Normen ASTM E 2368 und ISO 12111.



Induktionsheizsystem und aktive Luftkühlung

Wissensbasiertes Expertensystem - die optimale Unterstützung für die zuverlässige Testdurchführung

- Maßgeschneidertes TMF-Kontrollsystem für die Echtzeiterfassung, -verarbeitung und -auswertung der Messdaten
- Prüfsystem basierend auf patentierter, spielfreier, elektromechanischer Prüfmaschine Kappa SS-CF
- Induktionsheizsystem mit einstellbarer Heizleistung für unterschiedliche Probenmaterialien
- Aktive Druckluftkühlung für die präzise Temperaturregelung ohne Überschwingen
- Einfache Handhabung und normkonforme Temperaturmessung mit Bandthermoelementen
- Entwicklungskooperation mit KIT, dem renommierten Karlsruher Institut für Technologie

Produktinformation

Thermomechanisches Ermüdungsprüfsystem - ein wissensbasiertes Expertensystem zur Lösung komplexer Prüfanforderungen

Einfaches Handling für wiederholbare Prüfergebnisse

- Workfloworientierte Bedienerunterstützung durch automatisierte Testdurchführung mit testXpert
- Einfache Testkonfiguration
- Flexible und bequeme Auswertemöglichkeiten
- Stabile Umgebungsbedingungen, Bediener-sicherheit und ungestörter Blick auf die Probe

Wissensbasiertes Expertensystem für die optimale Unterstützung der Testdurchführung

Das Werkstoffverhalten unter zyklischer thermischer und mechanischer Beanspruchung verlässlich zu ermitteln, ist eine aufwendige Prüfaufgabe, die jedoch mit diesem wissensbasierten Expertensystem maßgeblich vereinfacht werden kann.

Abhängig von den zu überprüfenden Schädigungsmechanismen werden unterschiedliche Verläufe von Temperatur und mechanischer Dehnung gewählt. Diese Verläufe sind oft dreieckförmig oder können mit Haltezeiten z.B. bei Maximaltemperatur erweitert werden. Dabei kann die Dehnung und die Temperatur zeitlich versetzt aufgebracht werden.

Die häufigsten Testarten sind:

- IP (in phase)
- OP (out of phase)
- CD (clockwise diamond)
- CCD (counterclockwise diamond)

Thermomechanische Ermüdungsprüfungen werden überwiegend dehnungsgeregelt durchgeführt, da die auf das Bauteil wirkende Belastung durch Behinderung der thermischen Dehnung entsteht.

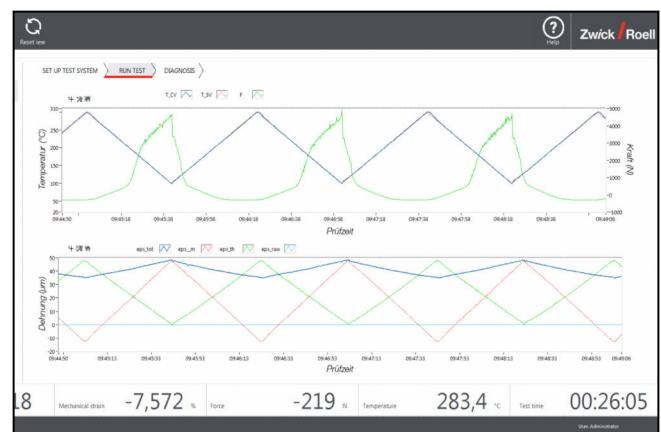
Spannungsgeregelte Versuche kommen zum Teil in Verbindung mit ungleichförmigen Proben z.B. mit Kerben zum Einsatz, da hier die Dehnung im Kerbgrund nicht gemessen werden kann.

In beiden Fällen kann nur die Totaldehnung (ϵ_t) gemessen und geregelt werden. Diese setzt sich zusammen aus thermischer Dehnung (ϵ^{th}) und mechanischer Dehnung (ϵ^{me}): Formel $\epsilon_t = \epsilon^{th} + \epsilon^{me}$.

Um die Probe zusätzlich zur thermischen Dehnung mit der gewünschten mechanischen Dehnung zu belasten, wird die thermische Dehnung mit dem definierten Temperaturverlauf zeitbasiert vorab gemessen und beim eigentlichen Test bei der Regelung der Totaldehnung berücksichtigt.

Maßgeschneidertes TMF-Kontrollsystem für die Echtzeiterfassung der Messdaten

- Echtzeiterfassung und -verarbeitung von Temperatur, Kraft und Dehnung
- Ermittlung und Vorgabe des mechanischen Sollwertverlaufs für Kraft- und Dehnungsregelung
- Ermittlung und Vorgabe des thermischen Sollwertverlaufs für die automatisch geregelten Heiz- und Kühlzyklen
- Präzise Steuerung und Synchronisation der mechanischen und thermischen Zyklen
- Echtzeitanzeige des Testverlaufs für optimale Überwachung der Testdurchführung
- Keine separaten Berechnungen oder externe Softwareunterstützung notwendig
- testControl II, die bewährte Mess-, Steuer- und Regelelektronik von ZwickRoell, für hohe Datenerfassungsraten und normkonforme Genauigkeiten



Echtzeiterfassung und -anzeige der Messdaten



Oberer und unterer Umkehrpunkt der Temperatur (rot), oberer und unterer Umkehrpunkt der mechanischen Dehnung (blau)

Produktinformation

Thermomechanisches Ermüdungsprüfsystem - ein wissenschaftsbasiertes Expertensystem zur Lösung komplexer Prüfanforderungen

Präzise Regelung mit patentierter elektromechanischer Prüfmaschine Kappa SS-CF

Für die Testdurchführung mit niederfrequenten Belastungszyklen hat sich die patentierte elektromechanische Prüfmaschine Kappa SS-CF seit Jahren mehrfach bewährt. Der spielfreie Nulldurchgang bei zyklischen Zug- und Druckbelastungen ermöglicht die besonders präzise Regelung der Prüfkraft und der Prüfgeschwindigkeit.

Das Präzisions-Planetengetriebe und der Servomotor sind zentrisch in der Prüfachse platziert und bewegen sich mit dem Querhaupt synchron. Mit der präzisen Traversenführung und der justierbaren Ausrichtevorrichtung kann die normkonforme axiale Ausrichtung gemäß ISO 23788 und gemäß der NADCAP Anforderungen gewährleistet werden.

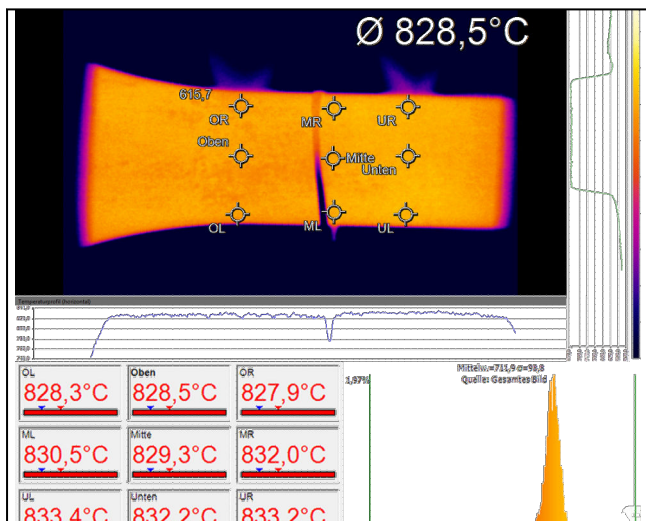
Mit dem hochauflösenden Motor-Encoder, dem hochauflösenden Kraftkanal und dem passenden Extensometer ist ein ausgezeichnetes Regelverhalten für Kraft, Spannung und Dehnung möglich.

Induktionsheizsystem für unterschiedliche Probenmaterialien mit einstellbarer Leistung

- Induktionserwärmungssystem (10 kW) mit individuell einstellbarer Heizleistung für Probenmaterialien mit unterschiedlicher elektrischer Leitfähigkeit
- Probenspezifische Induktoren für optimale Temperaturverteilung (axial, radial) bei unterschiedlichen Probenmaterialien
- Aktive Wasserkühlung der Induktoren für optimale Einleitung der Heizleistung in die Probe
- Gemäß CoP ist die Temperaturabweichung vom vorgegebenen Sollwert in der Probenmessstrecke $< 10\text{K}$ bzw. $< \pm 2\%$ der Temperaturdifferenz
- Max. Heizrate 25 K/s

Aktive Druckluftkühlung für die präzise Temperaturregelung ohne Überschwingen

- Mit vier symmetrisch angeordneten Flachstrahl Düsen wird die Kühlluft gezielt auf die Probenoberfläche geleitet.
- Proportionale Druckregelventile ermöglichen die präzise Regelung des Luftstroms.
- Die Position der Kühldüsen ist justierbar. Die Position für spätere Versuche reproduzierbar.
- In Abhängigkeit der Probengeometrie sind Kühlraten von bis zu 25 K/s möglich.



$\Delta < \pm 3,5^\circ\text{C}$ gemäß CoP $\Delta_{\text{max}} = 10\text{ K}$



Induktionsheizsystem und aktive Luftkühlung

Produktinformation

Thermomechanisches Ermüdungsprüfsystem - ein wissensbasiertes Expertensystem zur Lösung komplexer Prüfanforderungen

Einfache Handhabung und normkonforme Temperaturmessung mit Bandthermoelement

- Messung der Temperatur erfolgt mit normkonformen Bandthermoelementen in der Mitte der Probenmessstrecke:
≤ 850°C: Typ K
> 850°C: Typ S
- Einfache Handhabung - besonders im Vergleich zu angeschweißten Thermoelementen
- Einfaches und zuverlässiges Anbringen durch einstellbare Federvorspannung für zuverlässigen Anpressdruck
- Anliegend an 180° des Probenumfangs
- Bis zu drei Proben thermoelemente möglich

Sicherer Halt mit den richtigen Probenhaltern

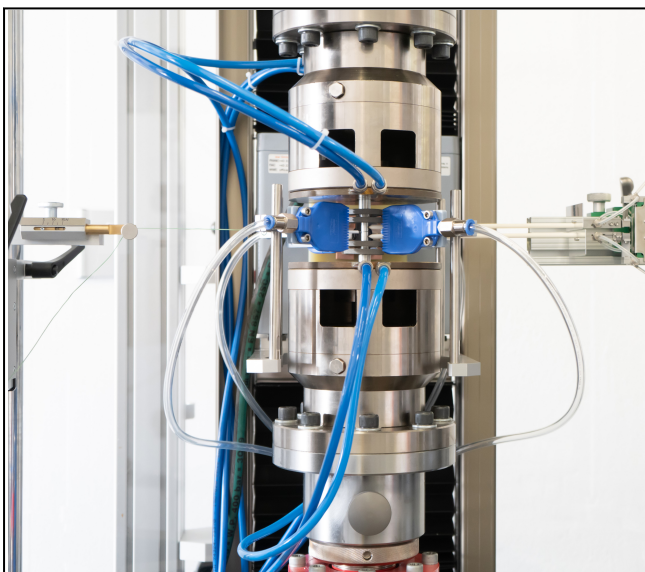
- Hydraulische Probenhalter für typischerweise zylindrische Proben mit Probendurchmesser 6mm und Schulterkopfdurchmesser 15 mm
- Ausführung für Zug-/Druck-Wechselast und spielfrei beim Kraft-Null-Durchgang
- Wasserkühlung für eine schnelle Temperaturstabilisierung entlang der Probe und für den direkten Wärmeabfluss aus dem Probenkopf

Zuverlässige Dehnungsmessung mit kontaktierendem Extensometer

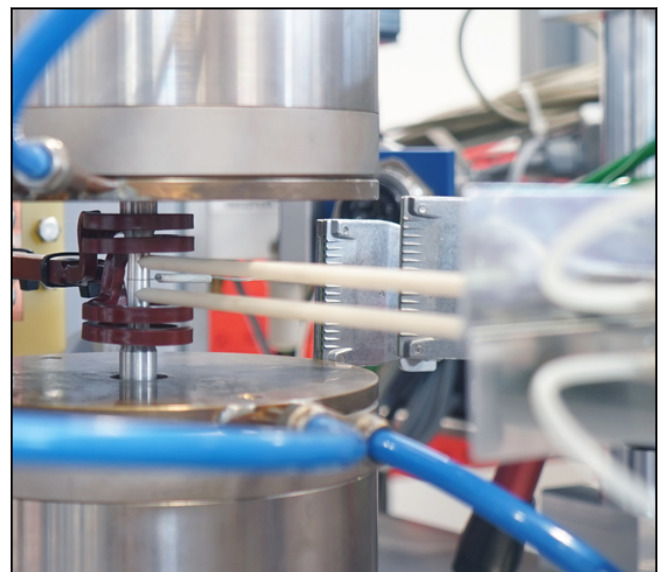
- Speziell für den Einsatz in Hochtemperatur konstruiert und entwickelt, um die anspruchsvollen Anforderungen für dehnungsgeregelte Prüfungen gemäß ISO 6892 zu erfüllen
- Automatische Einstellung der Messlänge zwischen den einzelnen Tests
- Kontrollierbare Kontaktkraft für die wiederholbare Platzierung mit der gleichen Kraft an nachfolgenden Proben
- Erfüllt die Genauigkeitsanforderungen der ASTM E83 Klasse B-2 und der ISO 9513 in der Genauigkeitsklasse 0,5
- Mit Wasserkühlung und Keramikfühlern aus Klasse-A-Siliziumcarbid einsetzbar bis 1.600°C
- Schnellanschlüsse für Wasserkühlleitungen

Stabile Umgebungsbedingungen und ungestörter Blick auf die Probe

- Die Schutzeinhausung sorgt sowohl für die optimale Bediener-sicherheit als auch für stabile Umgebungsbedingungen insbesondere für die sensible Dehnungsmessung
- Das transparente Schutzglas und die offene Ausführung des Kühlsystems erlauben den ungestörten Blick auf die Probe



Wassergekühlte hydraulische Probenhalter für sicheren Halt



Zuverlässige Dehnungsmessung mit kontaktierendem Extensometer

Produktinformation

Thermomechanisches Ermüdungsprüfsystem - ein wissensbasiertes Expertensystem zur Lösung komplexer Prüfanforderungen

Workfloworientierte Bedienerunterstützung durch automatisierte Testdurchführung mit testXpert

Die Bedienung des Prüfsystems ist rein intuitiv angelegt. Der Bediener wird von der Vorbereitung, über die Durchführung der Prüfung bis hin zur Ergebnisanalyse geführt. Der eigentlichen thermomechanischen Ermüdungsprüfung gehen gemäß CoP die Ermittlung des E-Moduls und Vorzyklen für die Regelungsoptimierung voran. Dabei werden die Systembediener von speziellen Prüfvorschriften unterstützt, wodurch separate Berechnungen oder externe Software der Vergangenheit angehören. Die Temperaturregelabweichung wird als Differenz zwischen den Temperaturbefehlen und der gemessenen Temperatur ermittelt (Toleranz gemäß CoP $\pm 5^{\circ}\text{C}$ oder $\pm 1\%$ der Temperaturdifferenz).

Schritt 1: Temperaturkontrolle, Stabilisierung

Für eine präzise mechanische Dehnungsregelung sind wiederholbare Temperaturzyklen unerlässlich. Um das erforderliche thermische Gleichgewicht herzustellen, werden daher im ersten Schritt kraftfreie Vorzyklen bei Kraftregelung durchgeführt.

Schritt 2: Ermittlung der thermischen Dehnung

Im nächsten Schritt wird die thermische Dehnung in Abhängigkeit von der Temperatur ermittelt. Dabei wird die Kraft auf Null geregelt und die thermische Dehnung gemessen.

Schritt 3: Verifizierung 'Zero stress test'

In diesem Schritt wird die Genauigkeit der thermischen Dehnungskompensation überprüft. Daher wird in diesem Zyklus die mechanische Dehnung auf Null gehalten ($\epsilon^{\text{me}}=0$) was zur Folge hat, dass die Totaldehnung der thermischen Dehnung entspricht ($\epsilon_t = \epsilon^{\text{th}}$). Die auftretenden Spannungen dürfen dabei gemäß CoP folgende Toleranzen nicht überschreiten:

- Max.werte: $< 5\%$ der Spannungsdifferenz des TMF-Tests
- Mittelwert: $< 2\%$ der Spannungsdifferenz des TMF-Tests

Schritt 4: Testdurchführung

Die Software führt die aktuellen Versuche gemäß der gewählten Prüfparameter durch.

Testdaten

Material: Aluminiumprobe

Probenform: zylindrisch

L_0 : 10 mm

Testart: in phase

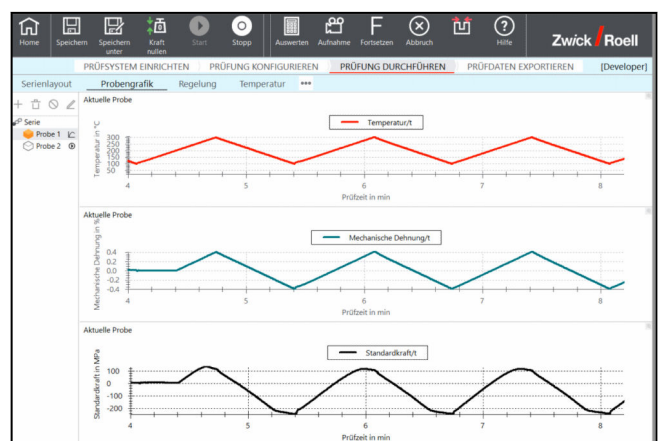
Alle Daten bei Raumtemperatur.



Schritt 1: Temperaturkontrolle, Stabilisierung
Schritt 2: Ermittlung der thermischen Dehnung



Schritt 3: Verifizierung 'Zero stress test'



Schritt 4: Testdurchführung (in phase)

Änderungen im Zuge der Weiterentwicklung vorbehalten.

Produktinformation

Thermomechanisches Ermüdungsprüfsystem - ein wissensbasiertes Expertensystem zur Lösung komplexer Prüfanforderungen

Einfache Testkonfiguration und nachvollziehbare Prüfergebnisse

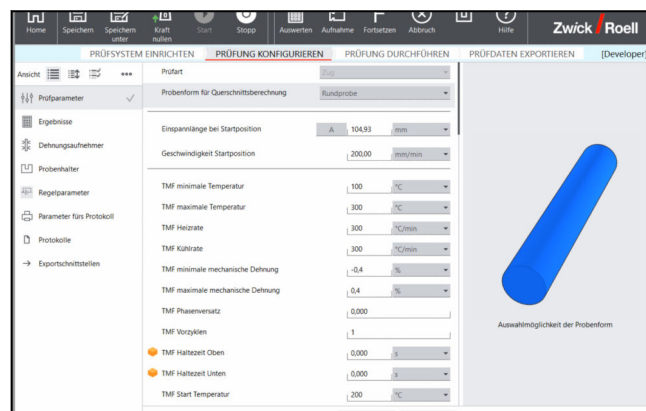
- Intelligente Assistenten zeigen dem Bediener, welche Prüfparameter zu konfigurieren sind und überprüfen die Eingaben automatisch auf Plausibilität.
- Frei wählbare Heizrampen, Maximal- und Minimaltemperaturen, Haltezeiten,...
- Separate Parameter für Heizen und Kühlen
- Unterschiedliche Phasenversätze
- Frei wählbare Anzahl der Vorzyklen
- Speicherung der Testparameter für zukünftige Tests
- Protokollierung der Prüfsystem- und Systemeinstellungen. Damit haben Sie jederzeit Antwort auf die Frage: „Wann, macht wer, was, warum und wer ist verantwortlich?“

Ermittlung des Elastizitätsmoduls zur Verifizierung des korrekten Testbetriebs

Gemäß European Code-of-Practice ist vor jedem Test die Ermittlung des E-Moduls bei Raumtemperatur, Minimaltemperatur, Maximaltemperatur und bei zumindest einem zusätzlichen mittleren Temperaturwert empfohlen. Der anschließende Vergleich des gemessenen E-Werts mit den Daten einer Referenzdatenbank dient der Verifizierung der korrekten Regel- und Messgrößen von Kraft, Dehnung und Temperatur. Liegen die gemessenen Werte innerhalb der Toleranzgrenze von max. 5%, ist der korrekte Testbetrieb sichergestellt.



Intelligente Assistenten



Einfache Testkonfiguration

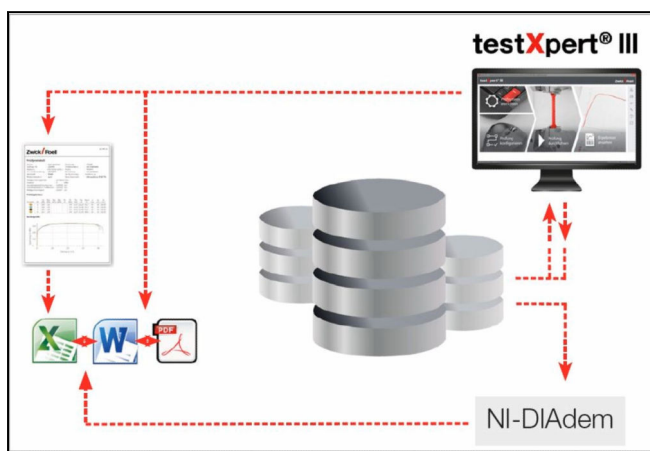
Produktinformation

Thermomechanisches Ermüdungsprüfsystem - ein wissensbasiertes Expertensystem zur Lösung komplexer Prüfanforderungen

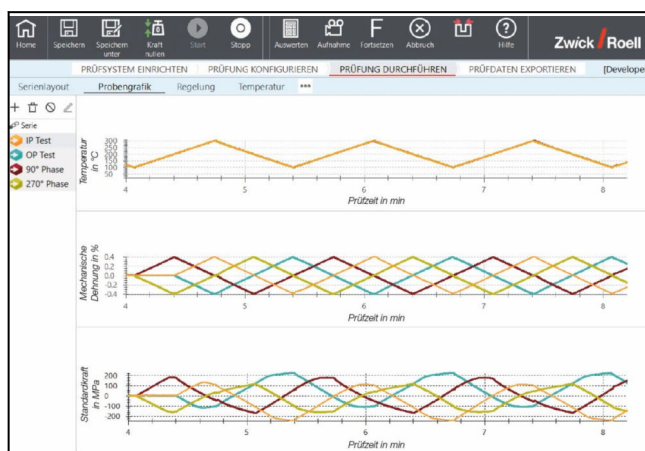
Flexible und bequeme Auswertemöglichkeiten

- Speicherung aller Prüfzyklen, mit übersichtlichen Auswertemöglichkeiten und flexibler Exportschnittstelle in NI-TDMS-Dateiformat zur einfachen Weiterverwendung z.B. in Excel
- Vollständige Aufzeichnung von bis zu 500 Zyklen mit der Prüfsoftware einzelne oder gemeinsame Darstellung der Zyklen

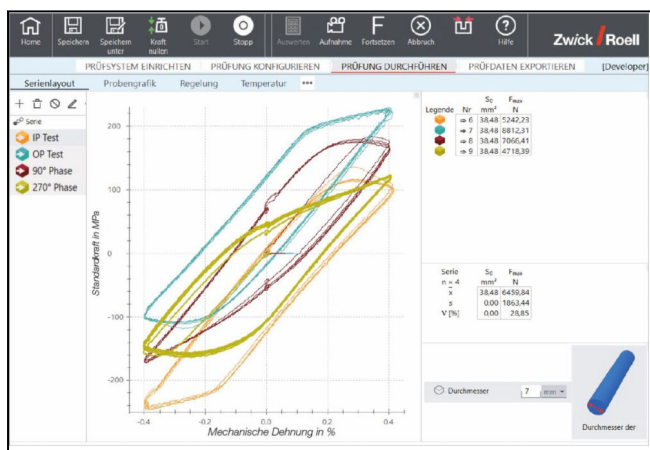
- Zusätzliche Verifizierung aller Daten der durchgeführten Prüfung im abgesicherten Modus
- Bequemer Export der Daten in alle gewohnten Auswerte-Analyse-Plattformen
- Gegenüberstellung der zyklischen Spannungs- und Dehnungskurven einzelner Testarten
- Für die erfassten Zyklen stehen folgende Ergebnisse zur Verfügung: Fmin, Fmax, Dmin und Dmax



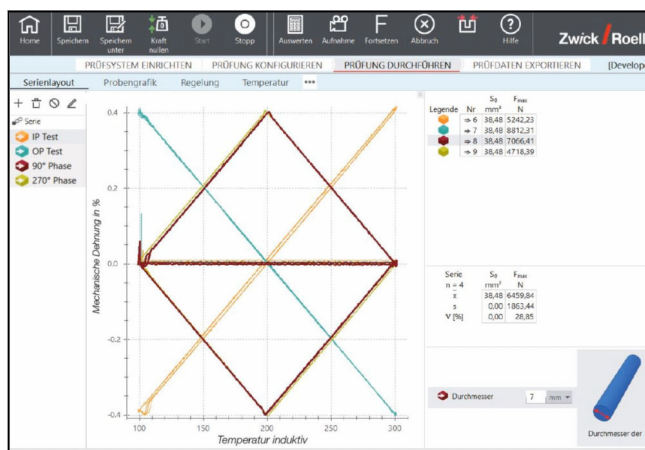
Flexible Exportschnittstelle



Zeitliche Verläufe von Temperatur, mechanischer Dehnung und Standardkraft (IP, OP, CD, CCD)



Spannungs-Dehnungs-Diagramm (IP, OP, CD, CCD)



Dehnungs-Temperatur-Diagramm (IP, OP, CD, CCD)

Produktinformation

Thermomechanisches Ermüdungsprüfsystem - ein wissensbasiertes Expertensystem zur Lösung komplexer Prüfanforderungen

Technische Daten

| Thermomechanisches Ermüdungsprüfsystem | |
|--|---|
| TMF-Kontrollsystem | |
| Datenerfassungsrate | 50 kHz |
| Regeltakt | 1 kHz |
| Anforderungen | gemäß European Code-of-Practice, ASTM E 2368 und ISO 12111 |
| Prüfmaschine | |
| Prüfkraftkapazität | 100 kN (Zug/Druck) |
| Traversenweg | 200 mm |
| Prüfgeschwindigkeitsbereich | 0.001 mm/h bis 250 mm/min |
| Wegauflösung des Positionsgebers | 0,14 nm |
| Temperieranlage | |
| Prüftemperaturen | von RT bis 1.600°C in Abhängigkeit des Probenmaterials (Vorversuche erforderlich) |
| Heizrate | bis 25 K/s |
| Kühlrate | bis 25 K/s |
| Nennleistung des Induktionsheizsystems | 10 kW |
| Thermoelemente | |
| | bis zu 3 Proben-Thermoelemente |
| ≤ 850°C: | Typ K |
| > 850°C: | Typ S |
| Probenhalter | |
| | hydraulisch, wassergekühlt, Spanneinsatz Ø 15 mm |
| Extensometer | |
| Ausgangsmesslänge | 10 mm |
| Messbereich | +20 % / -10 % |
| Anforderungen für Dehnungsregelung | gemäß ISO 6892 |
| Genauigkeit | gemäß ASTM E 83 Klasse B-2 und gemäß ISO 9513 Klasse 0,5 |
| Max. Einsatztemperatur | 1.200°C ohne Wasserkühlung 1.600°C mit Wasserkühlung |
| Schutzeinhausung | |
| | Bedienerschutz Thermische Stabilität Schutzverriegelung |
| Software | |
| | Prüfvorschrift für die Ermittlung des E-Moduls Prüfvorschrift für die Thermomechanische Ermüdungsprüfung |

Option: Nachrüstung an fremde Prüfrahmen

Wir sind davon überzeugt, dass die elektromechanische Prüfmaschine Kappa SS-CF die optimale Grundlage für die präzise Regelung der Prüfkraft und der Prüfgeschwindigkeit in der thermomechanischen Ermüdungsprüfung bietet. Dennoch nehmen wir die Herausforderung gerne an, bestehende Prüfrahmen mit fremder Elektronik und analogen Ein-/Ausgängen in ein nahezu ebenso verlässliches thermomechanisches Ermüdungsprüfsystem zu verwandeln.