

Technische Beschreibung

RODiS-System zur schnellen berührungs- und markierungsfreien Dehnungsregelung

1 Einführung

Fraunhofer IPM bietet mit dem „Real-time Optical Displacement measurement System“ (RODiS) ein optisches Dehnungsmesssystem an, welches erstmals dehnungsgeregelte Ermüdungsmessungen gemäß ASTM E 606 auf metallischen Proben schnell, berührungslos und markierungsfrei bei Temperaturen bis 1000 °C ermöglicht (s. Abb. 1). Auf Proben mit ausreichend matter Oberfläche – dazu gehören neben erodierten Proben auch typische polierte Rundproben aus Aluminium, Stahl oder Ni-Basislegierungen – können ohne weitere Probenpräparation ein- oder zweiachsige, dehnungsgeregelte Ermüdungsversuche mit einer Messrate von mehr als 1 kHz und einer mittleren Totzeit im Bereich von 2 ms vorgenommen werden. RODiS kombiniert leistungsfähige Bildverarbeitungs-komponenten mit einer Auswertung nach dem Prinzip der 2D-Bildkorrelation („Digital Image Correlation“, DIC), welche direkt auf der Grafikkarte erfolgt.

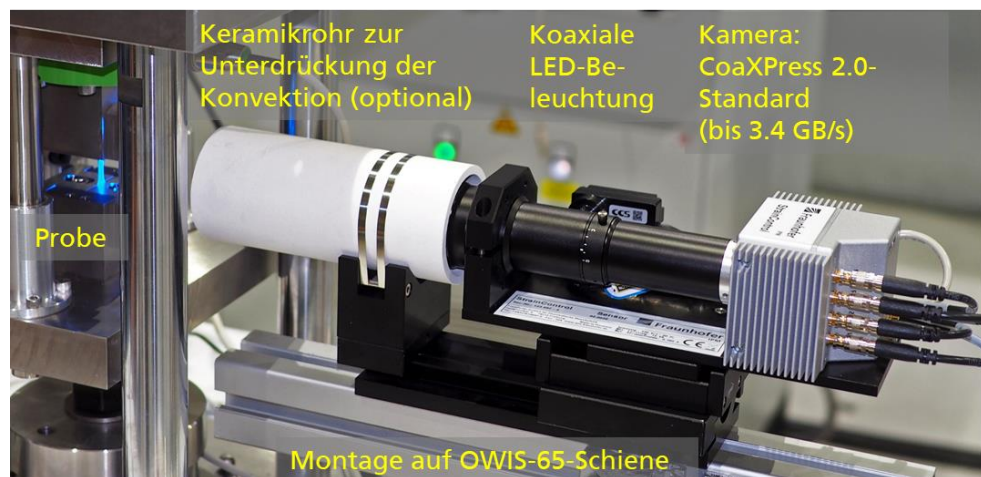


Abb. 1 Messkopf mit schneller CoaXPress 2.0-Kamera mit einer Datenrate > 3 GB/s, koaxialer LED-Beleuchtung und optionalem Keramikrohr zur Unterdrückung von Konvektion bei hohen Temperaturen.

Das optische Extensometer der Genauigkeitsklasse 0.5 nach DIN ISO 9513 wird über ein Analogsignal an den PID-Regler der Prüfmaschine eingebunden (z. B. Instron 88XX) und kann somit mechanische Extensometer vollständig ersetzen. Es vermeidet typische Nachteile taktile Extensometer und kann darüber hinaus auch zur Auswertung von Dehnungsfeldern („Full-Field-Analyse“) verwendet werden, etwa zum Vergleich mit FE-Modellen. Gleichzeitig werden Analogsignale in Echtzeit erfasst und mit den gespeicherten Bildern synchronisiert.

2 Systemkomponenten

Das RODiS-System besteht aus folgenden Hardware-Komponenten:

1. **RODiS-Messkopf** ähnlich zu Abb. 1 zur Montage am Prüfstand. Es kommt eine Kamera nach dem neuen CoaXPress-2.0-Standard in Verbindung mit einem telezentrischen Objektiv und koaxialer LED-Beleuchtung zum Einsatz, mit der bei eingeschränktem Bildfeld Bildraten von 1,5 kHz erreicht werden.
2. **Schneller Bildverarbeitungsrechner** mit ATX Server-Mainboard zur Echtzeit-Dehnungsfeldmessung, Nvidia RTX-Grafikkarte mit zur schnellen Bildkorrelation, CoaxPress-Framegrabber, analogen IO-Schnittstellen zur Ausgabe von zwei analogen 10 V-Dehnungssignalen an den PID-Regler der Prüfmaschine sowie mit Eingängen zur Erfassung von bis zu 8 analogen 10 V-Signalen für Kraft, Weg oder Temperatur über Thermoelemente.
3. **Control Unit** zur Stromversorgung und Ein-Ausgabe von Analogsignalen (19"-Einschub mit 4 HE).

Auf dem Bildverarbeitungsrechner mit dem Betriebssystem Windows® 10 ist eine aktuelle Version der **RODiS-Software** zur Echtzeit-Bildkorrelation installiert. Sie ermöglicht eine berührungs- und markierungsfreie Dehnungsregelung auf metallischen Oberflächen. Messrate und Totzeit hängen von Bildfeld und Auflösung ab (siehe Tabelle 1). Die Software erfasst zugleich zu jedem Bild Analogsignale, z. B. für Kraft, Weg oder Temperatur, und zeigt diese live am Bildschirm an (s. Abb. 2). Außerdem werden die Signale als ASCII-Tabelle zusammen mit Bilddaten zur offline-Analyse der Dehnungsfelder gespeichert.

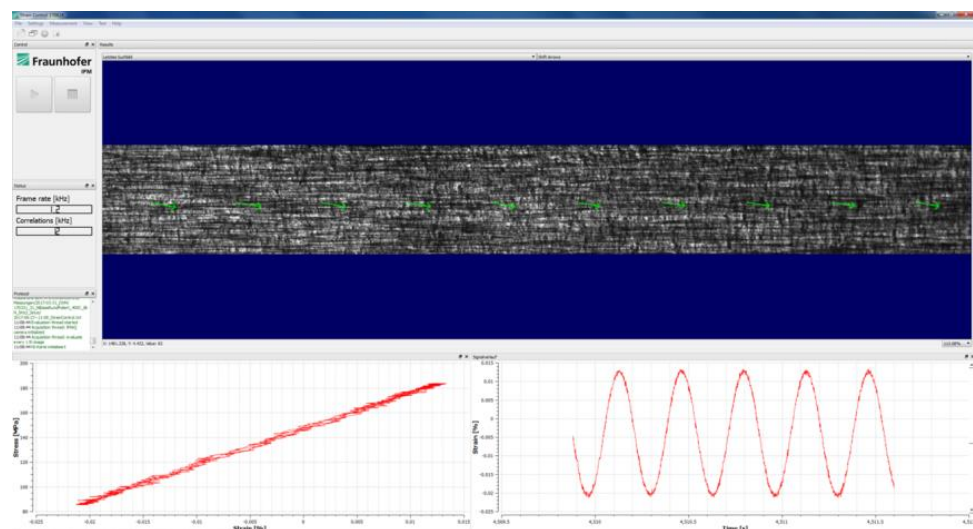


Abb. 2: Benutzeroberfläche des RODiS-Programmes. Angezeigt werden das Kamerabild sowie Signale der Dehnungsregelung.

3 Spezifikationen

Bei RODiS handelt es sich um ein optisches Extensometer der Genauigkeitsklasse 0.5 gemäß DIN ISO 9513¹ zur Durchführung dehnungsgeregelter Ermüdungsversuche gemäß ASTM E 606². Es arbeitet auf den meisten metallischen Oberflächen berührungs- und markierungsfrei, indem es die Mikrostruktur der Oberfläche zur Korrelation nutzt. Hierzu zählen neben Flachproben mit erodierten Oberflächen auch typische polierte Rundproben, wie sie in der Werkstoffprüfung verwendet werden. Voraussetzung ist allerdings, dass sich die Oberfläche während des Versuchs nicht wesentlich ändert, etwa durch Oxidation oder Korrosion. Helligkeitsunterschiede – etwa durch Anlauffarben bei hohen Temperaturen – werden kompensiert. Auch die Messung auf Proben, die mit sogenanntem „Speckle-Lack“ behandelt wurden, ist möglich. Es arbeitet berührungsfrei und vermeidet somit sowohl Schlupf auf glatten Oberflächen als auch vorzeitiges Versagen der Probe durch Rissinitiierung aufgrund des Anpressdrucks der Extensometerspitzen.

Die erzielbare Messrate hängt vom gewählten Bildfeld ab. Tabelle 1 zeigt typische Bildfelder mit den zugehörigen Messraten und Anwendungsfällen.

Tabelle 1: Beispiele für einstellbare Dehnungsmessrate in Abhängigkeit vom Bildfeld.

Auflösung [Pixel]	Bildfeld [mm ²]	Messrate [Hz]	Datenrate [GB/s]	Bemerkung
2560 x 880	12.8 x 4.4	1500	3.2	max. Messrate, z. B. für Rundproben
2560 x 1280	12.8 x 6.4	1000	3.2	z. B. gekerbte Flachprobe
1600 x 1540	8.0 x 7.7	850	2.9	biaxiale Regelung mit $l_0 = 10$ mm
2560 x 1916	12.8 x 9.6	690	3.2	max. Bildfeld

Die Wellenlänge der Beleuchtung liegt bei 465 nm (blau).

4 Kalibration

Das System ist mit einem telezentrischen Objektiv ausgestattet, welches systembedingt im gesamten scharf abgebildeten Messvolumen einen konstanten Abbildungsmaßstab aufweist. Die radiale Verzerrung im Messvolumen liegt unter 0,1 %, d. h. gemessene Verschiebungen – bei Ermüdungsversuchen typischerweise 100 µm – können um maximal 0,1 % der

¹ DIN EN ISO 9513: Metallische Werkstoffe – Kalibrierung von Längenänderungs-Messeinrichtungen für die Prüfung mit einachsiger Beanspruchung (ISO 9513:2012 + Cor. 1:2013).

² ASTM E606, 2012: Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing. Copyright ASTM International. Distributed under ASTM license by Beuth Verlag.

Verschiebung abweichen. Es genügt daher, die optische Auflösung (ca. 5 µm je Pixel) mit einem entsprechenden optischen Normal zu kalibrieren.

Da das System auf typischen metallischen Oberflächen markierungsfrei arbeitet, kann es wie mechanische Extensometer mit geeigneten Messschrauben kalibriert werden.

Die Reproduzierbarkeit der Dehnungs- bzw. Längenänderungsmessung kann via Nullverformungsabweichung gemäß der VDI-Richtlinie 2626³ geprüft werden. Dazu wird die jeweilige Probe ohne mechanische oder thermische Last im Messvolumen bewegt und die entsprechende Längenänderung aufgezeichnet. Im einfachsten Fall kann dies durch einseitiges Einspannen der Probe im Prüfstand erreicht werden. Bei Raumtemperatur sollte die Standardabweichung der gemessenen Längenänderung kleiner als 0,2 µm sein.

5 Einbindung in den Prüfstand

5.1 Montage des Messkopfes

Die **Montage des Messkopfes** erfolgt auf einer mitgelieferten OWIS 65 – Schiene, z. B. Teilenummer 16.011.0200 bei OWIS.eu. Für muss eine geeignete Montagefläche senkrecht zur Probenoberfläche vorhanden sein (nicht Angebotsbestandteil). Siehe auch Zeichnung in Abb. 3. Der Arbeitsabstand zwischen Objektiv und Bildfeld beträgt 150 mm.

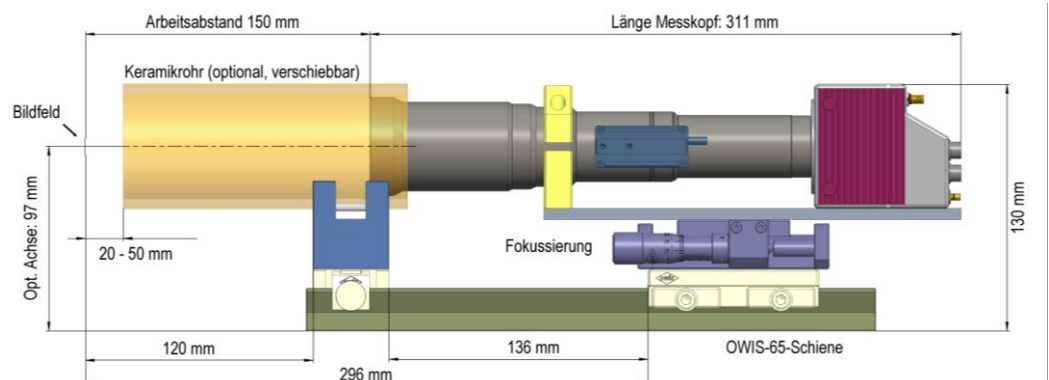


Abb. 3: Maße des Messkopfes.

Eine Justage-Möglichkeit senkrecht zur optischen Achse ist nicht notwendig, da der Bildbereich auf dem Sensor der Kamera verschoben werden kann. Die Kabellänge zwischen Messkopf und Rechner beträgt 5 m. Andere Längen sind auf Anfrage möglich.

5.2 Elektrische Signale zur Dehnungsregelung

Das System wird wie ein mechanisches Extensometer mit dem PID-Regler der Prüfmaschine (z. B. Instron 8800) über das analoge Dehnungssignal verbunden und ersetzt dieses vollständig (s. Abb. 4). Zur Dehnungsregelung können

³ VDI-Richtlinie VDI/DE 2626 Blatt 1 Optische Messverfahren - Digitale Bildkorrelation; Grundlagen, Annahme- und Überwachungsprüfung. Beuth-Verlag. Aktuelle Fassung vom November 2019.

wahlweise die Dehnung, die Längenänderung zwischen den Messpunkten („elongation“) oder die Verschiebung entlang der Bildachsen der Kamera als Analogsignale ($\pm 10\text{ V}$) ausgegeben werden.

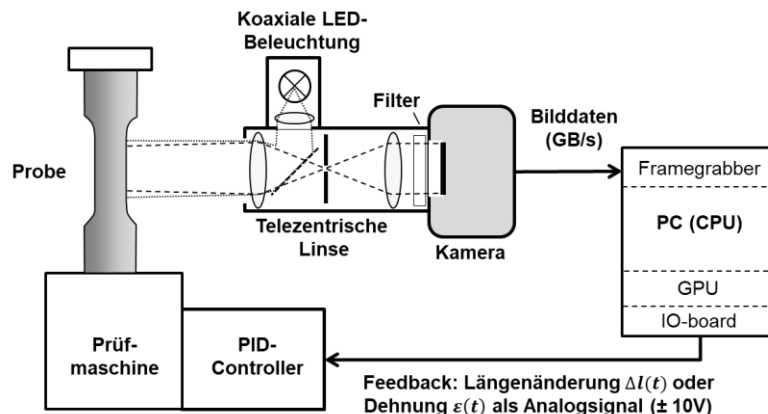


Abb. 4: Einbinden der optischen Dehnungsregelung in die Prüfmaschine.

5.3 Echtzeit-Erfassung von Analogsignalen für Kraft, Weg oder Temperatur

Es sind sechs Eingänge in Form von BNC-Buchsen für Analogsignale vorhanden, die synchron zu den Bilddaten erfasst werden. Zwei weitere Analogeingänge dienen zur Steuerung der Messung sowie zur Speicherung von Bildern, etwa in HCF-LCF-Sonderzyklen. Diese Signale werden zusammen mit den Bilddaten als ASCII-Tabelle, die z. B. mit EXCEL gelesen werden kann, gespeichert.

5.4 Speicherung von Bilddaten

Das System kann anhand der gemessenen Dehnung sowie der Analogsignale (siehe oben) in Echtzeit Bilddaten zur Speicherung auswählen – wie etwa Maxima, Minima oder Nulldurchgänge der jeweiligen Signale. Diese Bilder können nachträglich – beispielsweise über die Full-Field-Option (siehe unten) – analysiert werden. Daher ist zur Datenspeicherung eine zweite SSD-Festplatte mit einem Speichervolumen von 1 TB vorgesehen. Dies kann – je nach aktuellem Stand der Technologie – ein RAID10-Verbund aus mehreren SSD-Festplatten oder eine schnelle M.2-Festplatte sein.

5.5 Ermittlung der Regelparameter

Das System bildet ein mechanisches Extensometer mit der Basislänge l_0 von 10 mm nach und es zeichnet sich gegenüber anderen optischen Systemen durch eine Latenzzeit im Bereich von 2 ms aus. In der Regel können daher die Regelparameter Proportional-, Integral- und Differenzialanteil des PID-Reglers übernommen werden. Ansonsten können für die jeweilige Kombination aus Sensorik, PID-Regler und Prüfmaschine geeignete Parameter nach dem Verfahren von Ziegler-Nicols ermittelt werden⁴.

⁴ Unbehauen, Heinz; Ley, Frank (2012): I Regelungs- und Steuerungstechnik. In: Horst Czichos: HÜTTE - Das Ingenieurwissen. 34. Aufl. 2012. aktualisierte. Hg. v. Manfred Hennecke. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; Imprint; Springer, S. 1307–1429.

Die Robustheit der Regelung kann anhand von Dreieckszyklen gemäß ASTM E 606 getestet werden. Diese sind für die Regelung besonders kritisch, weil sich dort die Führungsgröße, nämlich der Sollwert für die Dehnrage, sprunghaft ändert. Die Norm empfiehlt hierfür eine Auflösung der Dehnamplitude von 1 % Peak-to-Peak, was einer Dehnungsmessrate entspricht, die um den Faktor 200 höher liegt als die Zyklusfrequenz. Beispielsweise sollte ein Dreieckszyklus mit einer Frequenz von 5 Hz mit einer Dehnungsmessrate von mindestens 1000 Hz abgetastet werden.

5.6 Messung bei hohen Temperaturen

Das RODiS-System eignet sich zur Werkstoffprüfung bei hohen Temperaturen bis 1000 °C, sofern sich die Mikrostruktur der Oberfläche während der Messung nicht wesentlich verändert, etwa durch Oxidation⁵. Farbänderungen wie Anlauffarben werden dagegen kompensiert. Messungen bei Temperaturen über 1000 °C sind prinzipiell möglich, wurden aber von uns noch nicht getestet.

Bei Messungen mit Temperaturen ab etwa 500 °C wird die erzielbare Messgenauigkeit durch die Konvektion der Luft zwischen Probe und Objektiv bestimmt. Für solche Messungen empfehlen wir daher Maßnahmen wie das in Abb. 1 gezeigte **Keramikrohr**, das mitgeliefert wird. Eine ähnliche Wirkung kann z. B. auch durch eine Bohrung mit einem Durchmesser von mindestens 50 mm in einer Isolierung um die Probe erzielt werden. Auch Klimaanlage, die nahe am Prüfstand stehen – insbesondere, wenn diese von oben anblasen – können die Messgenauigkeit beeinträchtigen.

6 Erweiterungen

6.1 Full-Field-DIC-Option

Das RODiS-System kann optional mit der **Full-Field-DIC-Option** nicht nur die integrale Dehnung messen, wie sie für die Dehnungsregelung verwendet wird, sondern auch zweidimensional lokale Verschiebungen innerhalb des Kamerabildes, ähnlich wie sie in FE-Modellen berechnet werden. Im Beispiel von Abb. 5 wurde die Kontur eines unter biaxialer Dehnungsregelung gewachsenen Risses an ein bruchmechanisches FE-Modell übergeben und dort die Antwort, nämlich die lokale Verschiebung u_a , auf eine angelegte Last berechnet. Das rechte Bild zeigt die mittels Full-Field-DIC-Option gemessene Verschiebung u_a entlang desselben Risses. Diese Option umfasst einerseits eine erweiterte Hardware mit größerer Grafikkarte (z. B. nVidia RTX 3080 TI) sowie eine Software-Erweiterung, die einerseits eine semi-automatische Auswertung vorselektierter Bilddaten erlaubt – etwa unter maximaler Last – und andererseits eine Verarbeitung durch Kunden – wie z. B. eine Transformation in Maschinen-Koordinaten – über ein Python-Interface ermöglicht. Die Anbindung an ein FE-Programm wie z. B. ABAQUS ist nicht enthalten. Die Dehnungsfelder, wie sie in Abb. 5 gezeigt sind, werden in standardisierten 32 Bit Bilddateien im TIFF-Format abgelegt und können mit freien Bildbearbeitungsprogrammen wie

⁵ Blug, A.; Regina, D.J.; Eckmann, S.; Senn, M.; Bertz, A.; Carl, D.; Eberl, C. (2019): Real-Time GPU-Based Digital Image Correlation Sensor for Marker-Free Strain-Controlled Fatigue Testing. In: Applied Sciences 9 (10), S. 2025.

ImageJ gelesen und ausgewertet werden. Darüber hinaus werden Python-Beispielskripte zum Einlesen und Auswerten der Daten mitgeliefert.

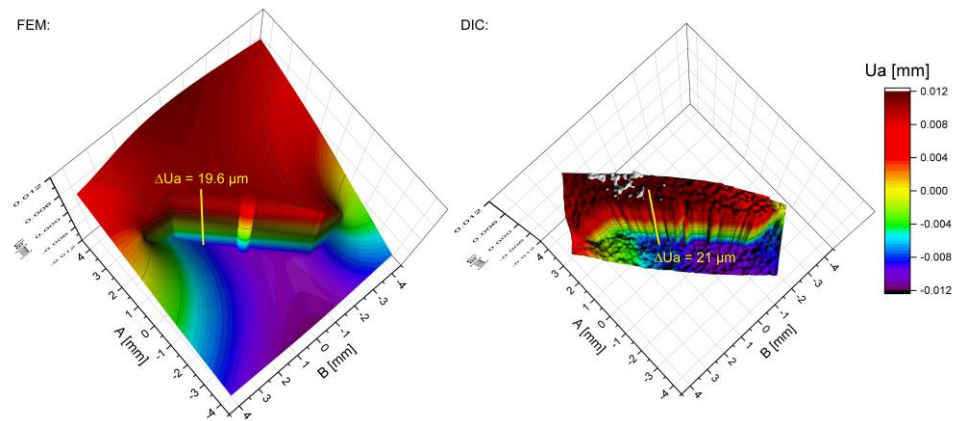


Abb. 5: Mit der Full-Field-DIC-Option können die RODiS-Messungen auch mit FE-Modellen verglichen werden wie hier am Beispiel von biaxial gewachsenen Rissen⁶.

⁶ Conrad, F.; Blug, A.; Kerl, J.; Fehrenbach, J.; Regina, D. J.; Bertz, A. et al. (2020): GPU-based digital image correlation system for uniaxial and biaxial crack growth investigations. In: Procedia Structural Integrity 28, S. 2195–2205.