

Entwicklung eines Kraft-TransfERNormals für die Kalibrierung periodischer Kräfte in Werkstoffprüfmaschinen mit Quantifizierung parasitärer Einflussgrößen

Design of a Force Transfer Standard for the Calibration of Periodical Forces in Materials Testing Machines with Quantification of Parasitical Influences

A. Nitschke¹, S. Neumann¹, S. Gerber¹, R. Kümme², F. Tegtmeier²

¹ MPA Universität Stuttgart, Referat Kalibrierung, Pfaffenwaldring 32, 70569 Stuttgart,
Kontakt: Arnd.Nitschke@mpa.uni-stuttgart.de

² PTB Braunschweig, Fachbereich Festkörpermechanik, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

Kurzfassung

Im Rahmen des europäischen EURAMET-Forschungsprojektes „18SIB08 – ComTraForce – Comprehensive Traceability for Force Metrology Services“ [1] wird ein dynamisches Kraft-TransfERNormal entwickelt, das für die vollständig rückgeführte Kalibrierung von Werkstoffprüfmaschinen mit sich periodisch ändernden Kräften geeignet ist.

Stand der Technik ist die in der ASTM E467 [2] beschriebene Nutzung von mit Dehnungsmessstreifen (DMS) applizierten Testproben für eine dynamische Verifikation einer Prüfmaschine, die zuvor gemäß DIN EN ISO 7500-1 [3] statisch kalibriert wurde. Ein Ziel des Forschungsprojektes ist es, die aufwändig applizierten Standardproben durch präzise und variabel nutzbare Kraft-TransfERNormale zu ersetzen, um den bisherigen Aufwand deutlich zu reduzieren und eine vollständige Rückführbarkeit auf die SI-Basis-Einheiten, inklusive einer Messunsicherheitsangabe zu gewährleisten.

Ein zentraler Aspekt ist dabei eine bestmögliche Vergleichbarkeit zwischen dem Kraft-TransfERNormal und dem zu untersuchenden Prüfkörper zu erzielen, dessen Steifigkeit und Masseverteilung einen Einfluss auf die lokale Kraftwirkung und somit auch die vom Prüfsystem gemessene Kraft haben. Das TransfERNormal soll zugleich Temperaturveränderungen und ggf. auftretenden Biegedehnungen erfassen können, um deren Wirkung auf die Kraftmessung des Werkstoffprüfsystems quantifizieren zu können. Die besondere Herausforderung liegt darin, dass die dynamischen Eigenschaften des Prüfaufbaus unverzerrt im Kalibrieraufbau widerspiegelt werden.

Um möglichst alle Aspekte durch größte Variabilität und kompakter Bauweise zu berücksichtigen, wurde das Kraft-TransfERNormal zweiteilig ausgeführt. Es besteht aus einem einer Standardschwingprobe ähnelnden Bauteil, nachfolgend als Dynamometer bezeichnet, das mit Sensoren zur Kraft- und Temperaturmessung sowie zur Erfassung von Biegedehnungen ausgestattet ist und einem Bauteil, nachfolgend als Steifigkeitsadapter bezeichnet, das die Steifigkeit entsprechend des Gesamtsystems mit Prüfkörper nachbildet. Um den Einfluss unterschiedlicher Masseverteilungen berücksichtigen zu können, verfügt das Dynamometer über Möglichkeiten zur Ankopplung definierter Massen.

Das ComTraForce-Projekt wird im Rahmen des „European Metrology Programme for Innovation and Research – EMPIR“ gefördert, das dem EU-Förderprogramm „Horizon 2020“ entstammt.

Abstract

The European EURAMET project „18SIB08 – ComTraForce – Comprehensive Traceability for Force Metrology Services“ [1] consists of seven work packages. One of that is dedicated to the development of a full traceability chain for dynamic force calibration of materials testing systems. An essential activity to meet the requirements is the development of a dynamic force transfer standard considering inertial forces and full traceability.

At the beginning measurements with a specimen with strain gage bridge were carried out for dynamic force verifications as suggested in ASTM E467 [2] which is calibrated statically according to DIN EN ISO 7500-1 [3] first. However, this applied specimen will represent only one of the possible test configurations of the materials testing system. Thus, the aim was to develop one specimen-like transfer standard, in best case usable for dynamic force calibrations in all configurations of materials testing systems. Finally a dynamic force transfer standard consisting of two parts was developed. The first part, specimen-like and named dynamometer, is applied with strain gages in different planes to measure force, bending strains and temperature. Furthermore, additional masses can be connected to investigate different mass distributions. The stiffness of the calibration setup can be adjusted by the second part, called stiffness adapter, to different stiffness configurations of materials testing.

This article describes the design and testing process of the development of the dynamic force transfer standard. The project 18SIB08 COMTRAFORCE has received funding from the EMPIR programme co-financed by the Participating States and from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme.

1 Einleitung

Viele Wirtschaftszweige, wie zum Beispiel die Automobilindustrie, die Luft- und Raumfahrtindustrie sowie die Medizintechnik, sind auf die physikalische Erprobung ihrer Produkte angewiesen, um deren Qualität und Zuverlässigkeit bei Gebrauch sicherzustellen. Die Erprobung erfolgt dabei unter bestmöglicher Annäherung an die Betriebsbedingungen, zu denen auch zeitlich veränderlich wirkende mechanische Kräfte, nachfolgend als dynamische Kräfte bezeichnet, gehören können. Die Messung der dynamischen Kräfte spielt dabei eine zentrale Rolle.

In den Prüflaboratorien haben sich drei Standards zur Kalibrierung bei dynamischen Kräften für Werkstoffprüfmaschinen etabliert. Dies sind die ASTM E467 [2], die ISO4965-1 [4] und die DKD-R 3-10 [5]. In der Summe ergibt sich aus allen drei Standards die Notwendigkeit, die Einflüsse unkompensierter, beschleunigter Massen, unterschiedlicher Steifigkeiten, auftretender Biegedehnungen und Temperaturveränderungen zu quantifizieren.

Unkompensierte, beschleunigte Massen ergeben sich aus dem Prüfaufbau durch die Form des Prüfkörpers und der Maschinenteile, die zum Einspannen des Prüfkörpers benötigt werden. [6] Form und Werkstoff des Prüfkörpers bestimmen die Steifigkeit des Prüfaufbaus und aus Fertigungstoleranzen und Justagemöglichkeiten resultieren Biegedehnungen im Prüfaufbau. Temperatureinflüsse ergeben sich aus den Prüfbedingungen.

2 Entwicklung des dynamischen Kraft-TransfERNormals

2.1 Dynamometer

Entsprechend der Empfehlung in ASTM E467 [2], wurde zunächst eine Standard-Rundzugprobe für die Applikation mit Dehnungsmessstreifen (DMS) vorgesehen, die, zu einer DMS-Vollbrücke verschaltet, der Kraftmessung dienen. Mit Hilfe von zwei weiteren Applikationsebenen sollen Biegedehnungen und Temperaturveränderungen erfasst werden, die ebenfalls mit DMS appliziert werden. Die Geometrie der zu applizierenden Probe entsprach zunächst einer Rundzugprobe nach [7] mit einem Durchmesser von 6 mm und einer Länge des zylindrischen Bereichs von 18 mm. Die Probe ist schematisch in **Bild 1** dargestellt.



Bild 1 Schema einer in mehreren Ebenen mit DMS (blau) applizierten Standard-Rundzugprobe (rot)

Die Auslegung begann mit der Auswahl der zu verwendenden DMS. Für die Kraft- und die Biege-Ebene wurden DMS des Typs WK-06-062TT-350 ausgewählt. Maßgebend war die hohe Ermüdungsfestigkeit, die laut [8] rund $100 \cdot 10^6$ Lastwechsel für eine Dehnung von $\pm 2000 \mu\text{m/m}$ beträgt. Bei diesen DMS handelt es sich um T-Rosetten-DMS, die sowohl ein Längs-, als auch ein Quergitter tragen, wobei jedes Gitter einen elektrischen Widerstand von 350Ω besitzt. Für die Temperaturmessung wurde ein Einzel-DMS des Typs ETG50B-E, der mit einem Widerstandsnetzwerk des Typs LST-10C-350D kombiniert wird, ausgewählt. In Kombination bilden Einzel-DMS und Widerstandsnetzwerk eine Halbbrücke, wobei jeder Zweig der Halbbrücke einen Widerstand von 350Ω besitzt. Für die Applikation der DMS auf dem Dynamometer wurde M-Bond 610, ein warmauszulagernder Klebstoff, vorgesehen. Die genannten Bauelemente - DMS, Widerstandsnetzwerk und Klebstoff – stammen aus dem Portfolio der Fa. Micro Measurements. Die Verschaltung der Bauelemente ist für die Kraft- und Biegedehnungsmessebenen in **Bild 2 und 3** dargestellt. Für die Verschaltung des Temperatur-DMS mit dem Widerstandsnetzwerk sei an dieser Stelle auf [8] verwiesen. Alle Messstellen wurden so konzipiert, dass die Ersterprobung mit einem möglichst geringen technischen Aufwand durchgeführt werden kann. Alle Messstellen sollten mit einem DMS-Messsystem erfasst werden können. Dadurch wurde die Temperaturmessung mittels DMS anstelle eines PT100 konzipiert.

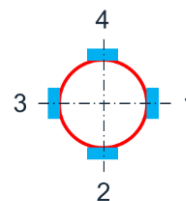


Bild 2 Positionen der DMS (blau) auf dem Umfang der Probe

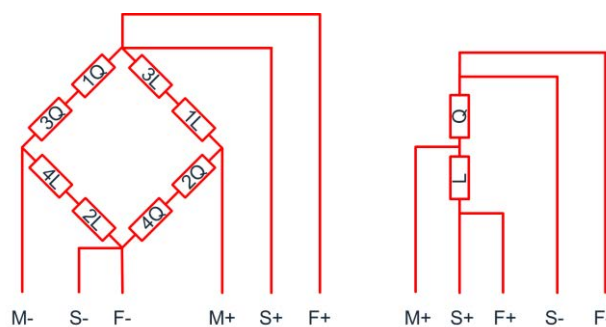


Bild 3 links: Wheatstone'sche DMS-Vollbrücke zur Kraftmessung (L = Längsgitter, Q = Quergitter, 1...4 = Position des Gitters, M = Messung, S = Speisung, F = Fühler), rechts: Wheatstone'sche DMS-Halbbrücke wie sie für jede Position auf dem Umfang in der Biegeebene erstellt wurde

Nach Abschluss der DMS-Konfiguration wurde der Messbereich des zu entwickelnden Dynamometers auf Kräfte bis zu $\pm 20 \text{ kN}$ festgelegt. Als Werkstoff wurde eine

30CrNiMo8-Legierung (1.6580) im vergüteten Zustand, d.h. als 30CrNiMo8+QT (1.6580+QT) zur Auslegung und schließlich auch zur Fertigung verwendet. Die Lebensdauer des Dynamometers wurde auf 5 Jahre angesetzt. Die in den 5 Jahren zu erwartende Lastwechselzahl wurde anhand eines prognostizierten Kalibrieraufkommens von rund 30 dynamischen Kalibrierungen pro Jahr und eines auf den o.g. Standards basierenden, geschätzten Lastwechselaufkommens je Kalibrierung von rund $2,5 \cdot 10^6$ Lastwechseln auf rund $375 \cdot 10^6$ Lastwechsel berechnet, eine mittlere Belastungsfrequenz von 150 Hz vorausgesetzt. Damit übersteigt die erwartete zyklische Belastung des Dynamometers die weiter oben genannte Ermüdungslebensdauer der DMS von $100 \cdot 10^6$ Lastwechseln, bei einer Dehnung von $\pm 2000 \mu\text{m/m}$. Somit musste die der Auslegung zugrundeliegende Dehnung bei Nennlast herabgesetzt werden, um einem vorzeitigen Versagen der DMS vorzubeugen. Schließlich wurde eine Dehnung von $\pm 1000 \mu\text{m/m}$ im Applikationsbereich bei Nennlast, d.h. an den Messbereichsgrenzen von $\pm 20 \text{ kN}$, zur Auslegung festgelegt. Als Anschlussmaße des Dynamometers wurden M20x1,5-Außengewinde unter den Projektpartnern vereinbart, um es im Rahmen geplanter Versuchsreihen ohne Zwischenadapter an vorhandenen, kommerziellen Transfernormalen montieren zu können.

Mit der aus dem Werkzeugnis des Stahls entnommenen 0,2 %-Dehngrenze von 1120 N/mm^2 ergab die Vorauslegung, unter Berücksichtigung mehrerer Kerb- und Sicherheitsfaktoren, einen Minstdurchmesser von 7,8 mm für den zu applizierenden Bereich des Dynamometers. Basierend auf einem E-Modul des Stahls von rund 210 kN/mm^2 , ergibt sich eine Dehnung von rund $2100 \mu\text{m/m}$ in diesem Bereich. Folglich muss der zu verwendende Durchmesser größer sein, um die o.g. Lebensdauerkriterien zu erfüllen. Schließlich wurde ein Durchmesser von 12 mm für den zu applizierenden Bereich festgelegt, für den sich, rein rechnerisch, eine Dehnung von rund $880 \mu\text{m/m}$ bei Nennlast ergibt. Die Länge des Bereichs wurde auf 30 mm festgelegt, um ausreichend Platz für die DMS-Applikation zu bieten und zugleich den Aufbau so kompakt wie möglich zu gestalten. Der Prototyp des Dynamometers ist in **Bild 4** im Modell ohne DMS-Applikation dargestellt.

Mit den nun gegebenen Parametern ist die Steifigkeit des Dynamometers festgelegt. Sie ist definiert als das Produkt von E-Modul und Querschnittsfläche, dividiert durch die Länge des Bereichs und ergibt sich zu rund 790 kN/mm . Damit liegt sie rund 5,6-fach über der Steifigkeit einer Standard-Rundzugprobe aus Stahl, mit einer gleich großen, effektiven zylindrischen Länge und einem Durchmesser von 5 mm. Die Steifigkeit einer solchen Probe liegt bei rund 140 kN/mm . Die zur Steifigkeitsberechnung verwendete effektive zylindrische Länge ist gleich der zylindrischen Länge nach Norm [7], zzgl. einem Anteil der beidseitigen Übergangsradien. Laut [7] muss ein Übergangsradius mindestens dem Achtfachen des Probendurchmessers entsprechen. Aufgrund dieser ausladenden Proportionen wird den Übergangsradien ein Beitrag an der Steifigkeit der Probe beigemessen. Dieser Beitrag wird auf ein Viertel

der Gesamtlänge beider Übergangsradien abgeschätzt, das folglich dem Vierfachen des Probendurchmessers entspricht. Die verwendete effektive zylindrische Länge ist demzufolge gleich dem zweifachen Probendurchmesser plus dem vierfachen Probendurchmesser. Sie ergibt sich für eine 5 mm Norm-Rundzugprobe nach [7] somit zu 30 mm.

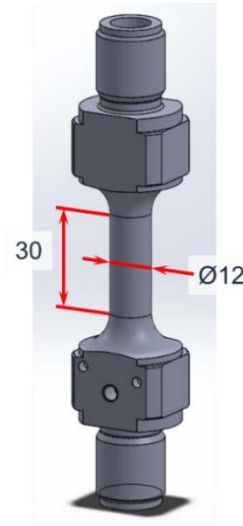


Bild 4 Modell des Prototypen des Dynamometers ohne DMS-Applikation

2.2 Steifigkeitsadapter

Grundsätzlich ist das Dynamometer möglichst leicht und steif ausgelegt. Die Erhöhung von Masse und Elastizität erfolgt durch Zusatzmassen und den sogenannten Steifigkeitsadapter. Um den signifikanten Steifigkeitsunterschied zwischen Dynamometer und einer Standard-Rundzugprobe kompensieren zu können, wurde das Konzept der Funktionsteilung aus [6] übernommen und ein Steifigkeitsadapter entworfen, der die Steifigkeit des Prüfkörpers, z.B. der 5-mm-Stahl-Rundprobe nach [7], im Rahmen der dynamischen Kraft-Kalibrierung einer Werkstoffprüfmaschine widerspiegeln soll. Er wird dazu in Reihe, d.h. axial und konzentrisch zum Dynamometer im Laststrang montiert. Im Vorentwurf des Steifigkeitsadapters wurde auch er möglichst ähnlich zu einer Standardrundzugprobe in monolithischer Form gestaltet und dauerhaft ausgelegt. Dabei wurden dieselben Auslegungsparameter wie im Vorentwurf des Dynamometers verwendet. So ergab sich ein Durchmesser von 8 mm und eine Länge von 75 mm für den zylindrischen, elastischen Bereich des Steifigkeitsadapters, dessen Steifigkeit rund 140 kN/mm beträgt. In Verbindung mit dem Anschlussmaß von M20x1,5 wirkte die Konstruktion jedoch unausgewogen und knickanfällig. Infolgedessen, wurde die Werkstoffauswahl hinterfragt und Werkstoffe mit niedrigerem E-Modul ins Auge gefasst. Schließlich wurde die Aluminiumlegierung AW7075-T6 aus einer Reihe von verfügbaren, kommerziellen Kupfer-, Magnesium- und Aluminiumlegierungen für die Weiterentwicklung des Steifigkeitsadapters ausgewählt.

Unter Berücksichtigung der aus dem Werkzeugnis der Aluminiumlegierung entnommenen 0,2 %-Dehngrenze von 520 N/mm² und einer Erhöhung der Sicherheits- und Kerbfaktoren (ggü. der Stahlauslegung) um rund 10 % ergab sich ein Durchmesser von 12 mm für den elastischen Bereich des Aluminium-Steifigkeitsadapters. Mit einem E-Modul von 70 kN/mm² wurde anschließend die Länge des Bereichs zu 55 mm berechnet, um eine Steifigkeit von 140 kN/mm zu erhalten. Er ist in **Bild 5** dargestellt.

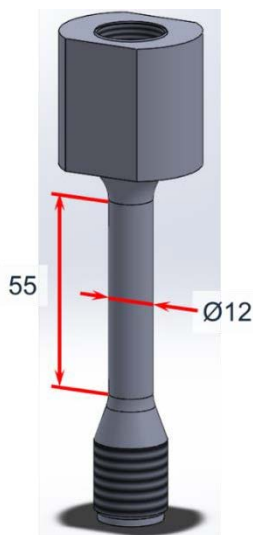


Bild 5 Modell des 140 kN/mm-Steifigkeitsadapters

Wie im Abschnitt 4.1 beschrieben wird, erwies sich dieser probenähnlich gestaltete Steifigkeitsadapter dennoch als ungeeignet, sodass alternative Konzepte entworfen wurden, deren elastische Elemente weiterhin aus der genannten Aluminiumlegierung gefertigt werden sollten. Im ersten Alternativkonzept wurde der Durchmesser des elastischen Bereichs auf 20 mm erhöht und die Querschnittsfläche durch eine Bohrung reduziert. Dieses Konzept wurde aufgrund der inneren Kerbe (Bohrungsgrund), die schwer zu inspizieren ist, verworfen. Im zweiten Konzept sollten drei auf einem Teilkreis (konzentrisch zur Laststrangachse) stehende Dehnbolzen zum Einsatz kommen, sodass die Last gleichmäßig auf alle Bolzen verteilt ist. Die Verbindung zum Dynamometer und zur Prüfmaschine sollte über zwei flanschähnliche Stahlbauteile erfolgen, in die alle drei Bolzen eingeschraubt sind. Damit wäre es möglich, die Steifigkeit durch Austauschen der Dehnbolzen zu variieren. Dabei ist jedoch eine umfangreiche, sehr enge Tolerierung aller Teile für die Fertigung erforderlich, um den Anforderungen eines ausgerichteten Laststrangs zu genügen. Zugleich ist beim Gebrauch mit einer anspruchsvollen Handhabung zu rechnen, die im rauen Alltag der Prüfmaschinenkalibrierung nicht praktikabel ist, sodass auch dieses Konzept verworfen wurde. Das dritte, schließlich fortgeführte Konzept, umfasst einen Dehnzylinder mit Durchgangsbohrung und Spannköpfen, die die Verbindung zum Dynamometer, bzw. zur Prüfmaschine herstellen. Der

Dehnzylinder aus Aluminium bildet das elastische Element, die beiden Spannköpfe aus Stahl bilden ideal starre Verbindungselemente. Dehnzylinder und Spannköpfe werden mit klassischen Schraubenflanschen verbunden. Alle drei Konzepte sind in **Bild 6** schematisch dargestellt.

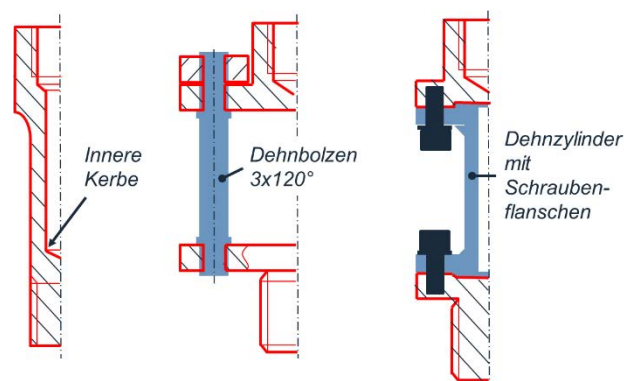


Bild 6 Alternativkonzepte für den Steifigkeitsadapter, schematisch: Links: Aufgebohrte Probe, Mitte: Dehnbolzen, Rechts: Dehnzylinder

Die für den Dehnzylinder erforderliche, tragende Mindestquerschnittsfläche wurde der oben beschriebenen Auslegung des monolithischen Steifigkeitsadapters entnommen. Sie betrug rund 105 mm². Der Außendurchmesser des Zylinders wurde auf 20 mm festgelegt. Dadurch ergaben sich der Innendurchmesser zu 16 mm und die Länge des elastischen Bereichs zu 55 mm, um einen dauerfesten Adapter mit 140 kN/mm Steifigkeit zu erhalten.

Die Dicke eines jeden der beidseitig benötigten Schraubenflansche wurde für eine Beanspruchung auf Abscherung ausgelegt. Die dafür zulässige Schubspannung wurde mit Hilfe der in [9] gemachten Angaben abgeschätzt. Aus der im Werkzeugnis der Aluminiumlegierung mit rund 575 N/mm² angegebenen Zugfestigkeit und einem Sicherheitsfaktor wurde die benötigte Mindestquerschnittsfläche berechnet. Sie ergab sich zu 261 mm². Als die am höchsten belastete Stelle wurde der Übergang vom Außendurchmesser des Dehnzylinders zum Flansch angesehen. Demzufolge kann die Mindestdicke des Flansches über den Teil der Mantelfläche des Dehnzylinders berechnet werden, der innerhalb des Flansches liegt. Diese Fläche muss größer oder gleich der Mindestquerschnittsfläche sein. Sie berechnet sich aus dem Mantelumfang und der Dicke des Flansches. Der Mantelumfang wird mit Hilfe des Außendurchmessers des Dehnzylinders berechnet. Die Mindestdicke des Flansches ergibt sich folglich zu 4,15 mm. Sie wurde auf 8 mm festgelegt.

Anzahl und Festigkeitsklasse der Schrauben jedes Flansches ergaben sich aus der zyklischen Nennlast von ± 20 kN und dem Gestaltungsspielraum. Letzterer führte zu 8 M5-Schrauben je Flansch, von denen jede 2,5 kN zyklisch dauerfest ertragen muss. Gemäß [9] wurden M5-Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9 ausgewählt.

Der Dehnzylinder und der vollständige Steifigkeitsadapter sind in **Bild 7** dargestellt.

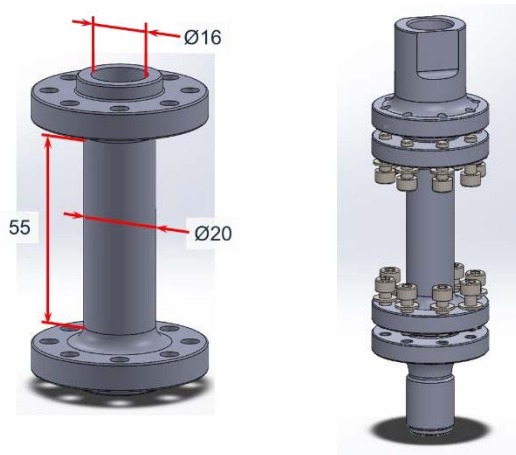


Bild 7 Modelle des 140 kN/mm-Dehnzylinders (links) und der Explosionsdarstellung des Steifigkeitsadapters (rechts)

2.3 Unkompensierte Massen

Zur Nachbildung unterschiedlicher Masseverhältnisse in einem Prüfaufbau, wurde das Dynamometer, im Bereich der zum Ein- und Ausbau benötigten Schlüsselflächen, mit Wellenabsätzen ausgestattet. Sie dienen zur Arretierung von ringförmigen Masse-Segmenten. Durch eine entsprechende Tolerierung (Übergangspassung) von Wellenabsätzen am Dynamometer und Nuten in den Masse-Segmenten, lassen sich letztere spielfrei an das Dynamometer ansetzen. Die Masse-Segmente sind mit Bohrungen ausgestattet, die die Montage von Beschleunigungssensoren und damit die Messung unkompensierter Kräfte ermöglichen. Im Zuge der Weiterentwicklung des Kalibrierbaus, wurden Bohrungen in ausgewählten Schlüsselflächen des Dynamometers eingebracht, um einerseits die Beschleunigungsmessung auch ohne Zusatzmassen durchführen und andererseits auch einfache Massequader montieren zu können. Um die Montage größerer Massequader zu ermöglichen wurden Trägerplatten entwickelt, die, auf die Schlüsselflächen des Dynamometers montiert, eine leichtere Adaption ermöglichen. Die ringförmigen Masse-Segmente sind im **Bild 8**, die Trägerplatten mit kubischen Massen im **Bild 9** dargestellt.

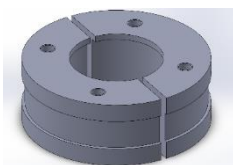


Bild 8 Modell der ringförmigen Masse-Segmente mit den Bohrungen zur Aufnahme von Beschleunigungssensoren

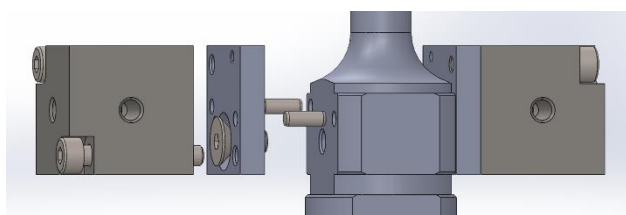


Bild 9 Explosionsdarstellung der Montage kubischer Massen mit Hilfe von Trägerplatten und Passstiften

2.4 Messtechnik

Um alle Sensorsignale parallel und synchron erfassen zu können, wird ein Mehrkanal-Gleichspannungsmessverstärker benötigt. Er muss in der Lage sein, die Sensoren von Dynamometer und Werkstoffprüfmaschine parallel und synchron zu verarbeiten. Beim Dynamometer sind das im Detail: 1 DMS-Vollbrücke der Kraftmessung, 4 DMS-Halbbrücken zur Messung der Biegedehnung, 1 DMS-Halbbrücke für die Temperaturmessung, 3 Spannungseingänge für die 3-achsige Beschleunigungsmessung. Für die Werkstoffprüfmaschine sind mind. 2 Spannungseingänge erforderlich, mit denen Maschinenkraft und -weg erfasst werden können, ggf. sind weitere Spannungseingänge zur Erfassung von Beschleunigungs- oder ggf. Temperaturmessungen der Maschine erforderlich. Die erforderliche Abtastrate des Messverstärkers ergibt sich aus den in [5] ausgesprochenen Empfehlungen, die für einen sinusförmigen Kraftverlauf eine Abtastrate von 80 Messpunkten pro Lastwechsel und für einen dreieckigen Kraftverlauf eine Abtastrate von 200 Messpunkten pro Lastwechsel empfiehlt. Bei Kalibrieraufgaben bis zu einer Belastungsfrequenz von 1 kHz führt dies zu einer maximal erforderlichen Abtastrate des Messverstärkers von 200 kHz. Zur Verfügung stand dafür ein Messsystem vom Typ PU[REC] der Fa. Dewetron, wie es in **Bild 10** dargestellt ist.



Bild 10 Für die Erprobung des dynamischen Kraft-Transfornormals verfügbares Messsystem des Typs PU[REC] der Fa. Dewetron

3 Erprobung des dynamischen Kraft-Transfornormals

3.1 Entwicklungsstufe 1

Im ersten Schritt dieser Entwicklungsstufe wurden Dynamometer und Masse-Segmente auf ihre Ermüdungsfestigkeit und ihr dynamisches Verhalten geprüft. Dazu wurden die Masse-Segmente an das Dynamometer angekoppelt. In einen 100 kN-Resonator der Fa. Amsler eingebaut, wurde der Prüfaufbau mit sinusförmigen Kraftverläufen beaufschlagt. Zu dieser Zeit war das Dynamometer noch nicht mit DMS appliziert.

Die Versuche wurden mit Amplituden, beginnend bei einem Zehntel der Nennlast, d.h. 2 kN, und einem Verhältnis

von Unter- zu Oberlast (R-Verhältnis, R) von -1 durchgeführt. Die Lastamplituden konnten in 2 kN-Schritten bis zur Nennlast von 20 kN erhöht werden. Der Versuch wurde über rund 3,5 Wochen bei Nennlast mit einer Frequenz von 145 Hz gefahren.

Im zweiten Schritt wurde das Dynamometer mit dem 140 kN/mm-Steifigkeitsadapter gekoppelt und demselben Testverfahren unterzogen, jedoch ohne Masse-Segmente, um ausschließlich das Zusammenwirken von Dynamometer und Steifigkeitsadapter prüfen zu können. Bei der Erhöhung der Lastamplitude von 10 auf 12 kN war jedoch ein signifikanter Anstieg des Geräuschpegels, ausgehend vom Testaufbau, zu verzeichnen, weshalb eine Unterbrechung des Versuchs folgte. Es wurden alle Schraubverbindungen auf ihren festen Sitz hin überprüft, ohne Befund. Andere Geräuschquellen konnten ebenfalls ausgeschlossen werden. Mit einer Lastamplitude von 8 kN wurde der Versuch erneut angefahren und in 1 kN-Schritten erhöht. Ab 11 kN lag der Geräuschpegel wieder signifikant über dem gewohnten Bereich eines stabil laufenden Versuchs, woraufhin die Versuchsreihe mit diesem Steifigkeitsadapter abgebrochen wurde, um Schäden an den Maschinenteilen und dem Prüfaufbau zu vermeiden.

3.2 Entwicklungsstufe 2

In der Entwicklungsstufe 2 standen die Erprobung der DMS-Applikation des Dynamometers und der Praxistauglichkeit des neuentwickelten Steifigkeitsadapters im Fokus.

Begonnen wurde mit der Kraft-Kalibrierung des Dynamometers nach DIN EN ISO 376 [10] auf einer 20 kN-Kraft-Normalmesseinrichtung (K-NME) an der PTB in Braunschweig und auf einer 50 kN-Kraft-Bezugsnormalmesseinrichtung (K-BNME) an der MPA Universität Stuttgart (MPA). Nachfolgend wurde der neue Steifigkeitsadapter mit dem Dynamometer gekoppelt und in ein 50 kN-Resonanzprüfsystem der Fa. Rumul eingebaut, um das dynamische Verhalten des neuen Aufbaus zu ermitteln.

Im ersten Testlauf stand das Verhalten des Steifigkeitsadapters im Fokus. Dazu wurde, wie in der ersten Entwicklungsstufe auch, die Lastamplitude in 2 kN-Schritten erhöht, bei einem R-Verhältnis von -1. Es kam zu keiner akustisch wahrnehmbaren lateralen Resonanz, sodass die Lastamplitude bis auf Nennlast erhöht werden konnte.

Der daran anschließende Testlauf war auf die Sensorik fokussiert. Hierbei wurden die Lastamplituden ebenfalls stufenweise angehoben. Die gewählte Abstufung war wie folgt: 0, 1, 2, 5, 10, 15, 20 kN. Das R-Verhältnis war -1. Um die Ergebnisse der dynamischen Tests validieren zu können, ohne auf zeitsynchrone Daten der Prüfmaschine angewiesen zu sein, folgten statische Tests.

Bei den statischen Tests wurde die Prüfmaschine zur Erzeugung definierter, statischer Lasten am Dynamometer genutzt. Zunächst wurden die Maximalwerte der zuvor gefahrenen dynamischen Versuche ebenfalls stufenweise aufsteigend angefahren und anschließend in absteigender Reihenfolge schrittweise bis in entlasteten Zustand. Aus

dem entlasteten Zustand wurden schließlich die Minimalwerte der dynamischen Versuche schrittweise absteigend angefahren und abschließend schrittweise aufsteigend bis in den entlasteten Zustand. Jede Stufe wurde für ca. 5 bis 10 s gehalten, um ein Einpendeln der Maschine und die Datenaufzeichnung zu ermöglichen.

Die Datenerfassung erfolgte während der Kalibrierung in den Laboratorien von PTB und MPA mit Messverstärkern des Typs DMP40, der Fa. HBM und einem Arbeitsplatz-PC mit MS Excel. In den Testläufen am Resonanzprüfsystem wurden die Messwerte der Dynamometersensoren mit einem Messsystem des Typs PU[REC], der Fa. Dewetron, einer Abtastrate von 5 kHz, ohne Filter, erfasst. Zu den erfassten Werten gehören die Messwerte der Kraft (1 DMS-Vollbrücke), der Biegedehnung (4 DMS-Halbbrücken) und der Temperatur (1 DMS-Halbbrücke). Zu diesem Zeitpunkt war die Erfassung der Messwerte der Prüfmaschine noch nicht möglich. Der Prüfaufbau ist in **Bild 11** dargestellt, ohne Messsystem.

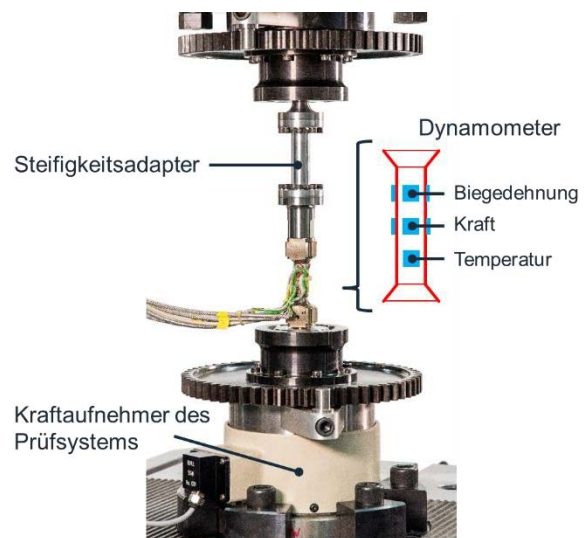


Bild 11 Aufbau zur Erprobung im 50 kN-Resonanzprüfsystem der Fa. Rumul an der MPA Universität Stuttgart

3.3 Entwicklungsstufe 3

Diese Entwicklungsstufe war der Erprobung der neuerschalteten und neuverkabelten Sensoren des Dynamometers gewidmet. Die Tests erfolgten dabei nach der in der vorherigen Entwicklungsstufe angewandten Methode: Der statischen Kalibrierung gemäß [10] schlossen sich die dynamischen und statischen Testläufe auf dem Werkstoffprüfsystem an. Messmittel und Prüfaufbauten entsprachen denen der Entwicklungsstufe 2.

4 Ergebnisse

4.1 Entwicklungsstufe 1

Mit den Testläufen der ersten Entwicklungsstufe sollten die Festigkeit und das Zusammenwirken der Bauteile des

Transfornormals unter zyklischer Belastung erprobt werden. Der Testlauf mit Dynamometer und Masse-Segmenten wurden nach rund $330 \cdot 10^6$ Lastwechseln, d.h. nach einer rund 3,5 Wochen dauernden zyklischen Belastung auf Nennlast, ohne sichtbaren Schäden an den Bauteilen beendet.

Der zweite Testlauf, in dem das Dynamometer (ohne Masse-Segmente) und der probenähnliche Steifigkeitsadapter miteinander gekoppelt waren, wurde frühzeitig abgebrochen. Ein signifikanter Anstieg des Geräuschpegels (bei Erreichen der Höhe der halben Nennlast) implizierte eine Schädigung des Prüfaufbaus, den es zu vermeiden galt.

4.2 Entwicklungsstufe 2

In dieser Entwicklungsstufe waren die Praxistauglichkeit von DMS-Applikation und neuentwickeltem Steifigkeitsadapter nachzuweisen.

Hierfür wurde das Dynamometer zunächst gemäß [10] kalibriert. Die Ergebnisse der Kalibrierungen bei PTB und MPA sind auszugsweise in **Bild 12 und 13** dargestellt. Vergleichend dazu, sind die Ergebnisse eines kommerziellen 20 kN-Transfornormals der Fa. HBM, das in Klasse 0,5 eingestuft ist, darin abgebildet. Wie zu erkennen ist, unterscheiden sich die Ergebnisse des Dynamometers sowohl in Zug-, als auch in Druckrichtung signifikant von denen des kommerziellen Klasse-0,5-Transfornormals. In Zugrichtung konnte das Dynamometer in Klasse 1 und in Druckrichtung in Klasse 2 eingestuft werden. Wiederholungsmessungen in Druckrichtung weisen zudem eine höhere Streuung als erwünscht auf, Bild 13.

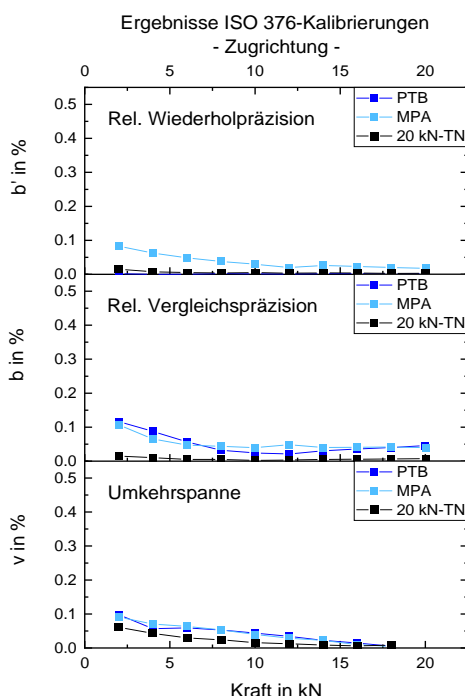


Bild 12 Ergebnisse der statischen Kalibrierungen an PTB und MPA in Zugrichtung, vergleichend dazu, die Kalibrierergebnisse eines 20 kN-Transfornormals der Klasse 0,5, HBM-Typ (20 kN-TN)

In der Praxiserprobung, des neuentwickelten Steifigkeitsadapters und der DMS-Applikation des Dynamometers am 50 kN-Prüfsystem, konnte eine genügend hohe Steifigkeit zur Vermeidung kritischer lateraler Resonanzschwingungen bis zu Lastamplituden auf dem Niveau der Nennlast beobachtet und andererseits Messergebnisse unter zyklischer Belastung erzielt werden. Letztere sind auszugsweise in **Bild 14 und 15** dargestellt. Sie zeigen in Bild 14 für die Kraftebene für Lastamplituden bis zu 5 kN ein stark verrauschtes Messsignal, aus dem erst ab einer Lastamplitude von 10 kN die sinusförmige Belastung des Dynamometers hervortritt. Dennoch bleibt das Kraftsignal stark verrauscht. Im Vergleich dazu spiegelt sich die sinusförmige Belastung bereits ab einer Amplitude von 1 kN gut in den Messergebnissen der DMS-Halbbrücken für die Erfassung der Biegedehnung wider, wie sie exemplarisch in Bild 15 dargestellt sind.

Auch in den statischen Tests war das Signal der Kraftebene (DMS-Vollbrücke) stark verrauscht, während die Signale der Biegeebene (DMS-Halbbrücken) nur ein schwaches Rauschen zeigten. Aufgrund der Parallelen zu den dynamischen Ergebnissen, wird auf einer Darstellung der statischen Ergebnisse verzichtet. Diese Charakteristik führte zu dem Entschluss, die Verschaltung aller DMS vollständig zu entfernen und zu erneuern. Die vier T-Rosetten-DMS der bisherigen Kraftebene wurden dabei zu vier DMS-Halbbrücken verschaltet, die zukünftig die Biegemessung übernehmen und die DMS der bisherigen Biegeebene wurden zu einer Vollbrücke verschaltet, die zukünftig die Kraftmessung übernimmt. Die Verschaltung erfolgte dabei gemäß Bild 3.

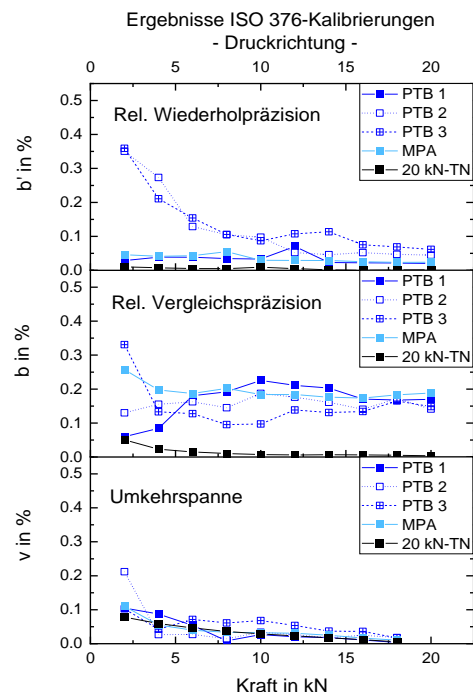


Bild 13 Ergebnisse der statischen Kalibrierungen an PTB und MPA in Druckrichtung, vergleichend dazu, die Kalibrierergebnisse eines 20 kN-Transfornormals der Klasse 0,5, HBM-Typ (20 kN-TN)

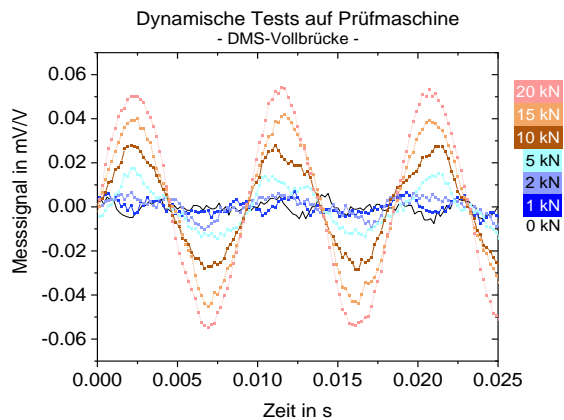


Bild 14 Ergebnisse der dynamischen Testläufe, Messsignale der Kraftebene

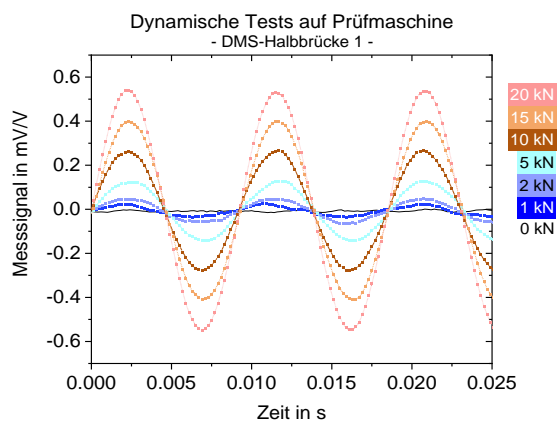


Bild 15 Ergebnisse der dynamischen Testläufe, Messsignale eines DMS der Biegeebene, exemplarisch für alle vier DMS dieser Ebene

4.3 Entwicklungsstufe 3

Die Kalibrierung und die Praxiserprobung der neuerschalteten und neuverkabelten DMS des Dynamometers erfolgte nach der bereits zuvor angewandten Methode mit statischer Kalibrierung nach [10] und dynamischen und statischen Tests im 50 kN-Werkstoffprüfsystem. In dieser Entwicklungsstufe wurde ausschließlich an der MPA kalibriert. Die Datenerfassung in den Testläufen auf der Prüfmaschine erfolgte mit 10 anstelle 5 kHz. Neben den Dynamometersignalen konnten nun auch die Maschinensignale von Kraft und Weg erfasst werden. Da die zur Signalübernahme verwendeten Maschinenschnittstellen bei der Maschinenkalibrierung unberücksichtigt waren, wurden beide Signale lediglich als Referenz für die Sinusform der zyklischen Belastung genutzt.

Die erzielten Ergebnisse der statischen Kalibrierung sind auszugsweise in **Bild 16 und 17** (rot hervorgehoben) dargestellt und zeigen eine deutliche Verbesserung der Wiederholpräzision für die statische Kraftmessung im Zug- und Druckbereich gegenüber den grau dargestellten Ergebnissen der vorherigen Entwicklungsstufe. Die Vergleichspräzision ist unterdessen im Zugbereich deutlich schlechter und im Druckbereich leicht besser als zuvor.

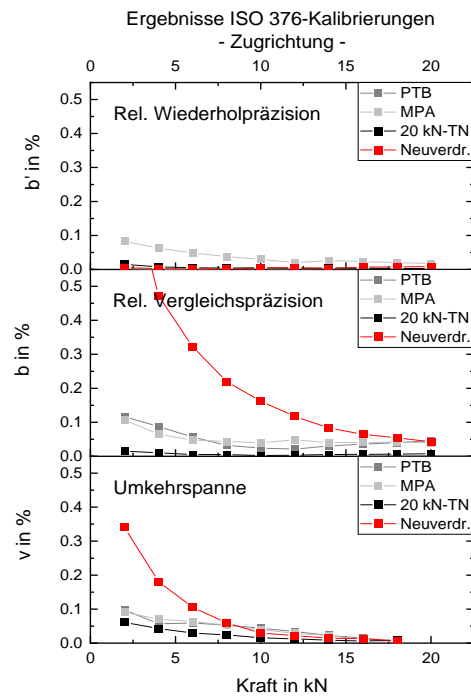


Bild 16 Ergebnisse der statischen Kalibrierungen an PTB und MPA in Zugrichtung, rot: neuverdrahteter Zustand, grau: Urzustand, vergleichend dazu, die Kalibrierergebnisse eines 20 kN-TransfERNormals der Klasse 0,5, HBM-Typ (20 kN-TN)

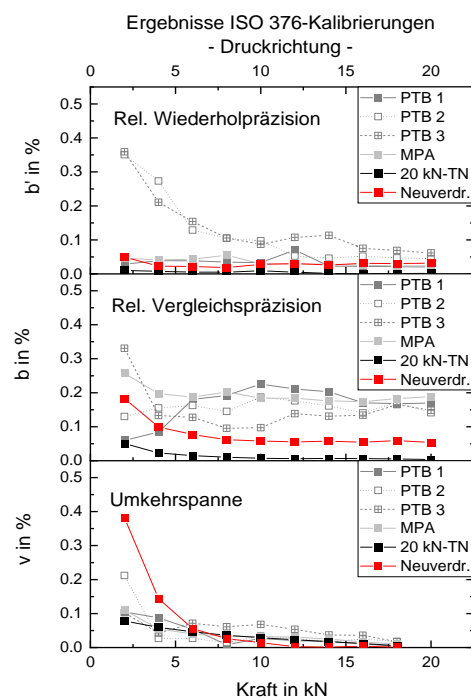


Bild 17 Ergebnisse der statischen Kalibrierungen an PTB und MPA in Druckrichtung, rot: neuverdrahteter Zustand, grau: Urzustand, vergleichend dazu, die Kalibrierergebnisse eines 20 kN-TransfERNormals der Klasse 0,5, HBM-Typ (20 kN-TN)

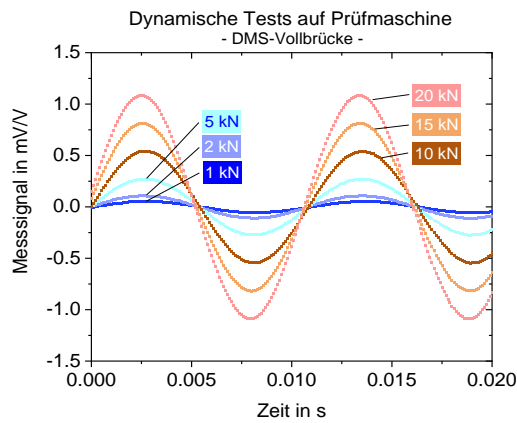


Bild 18 Ergebnisse der dynamischen Testläufe mit neuverdrahtetem Dynamometer, Messsignale der Kraftebene

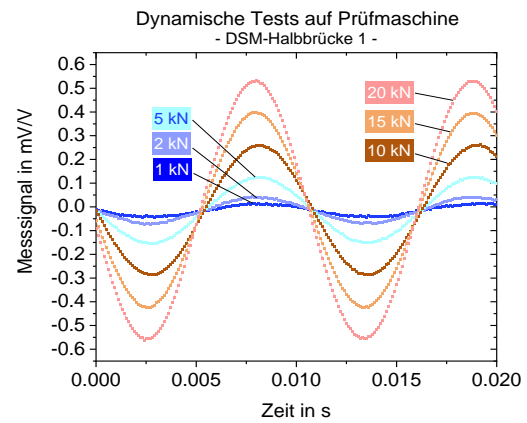


Bild 21 Ergebnisse der dynamischen Testläufe mit neuverdrahtetem Dynamometer, Messsignale eines DMS der Biegeebene, exemplarisch für alle vier DMS dieser Ebene

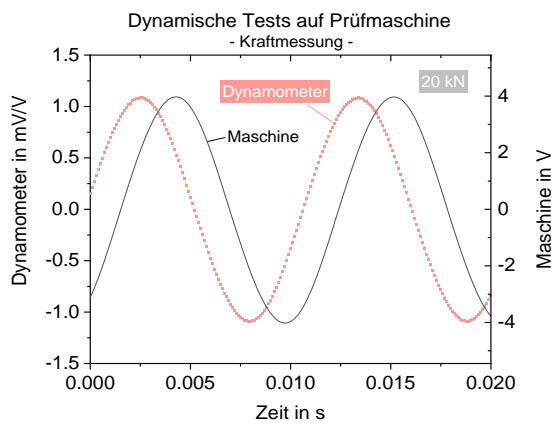


Bild 19 Ergebnisse der dynamischen Testläufe mit neuverdrahtetem Dynamometer, Gegenüberstellung von Dynamometer- und Maschinensignal bei Nennlast

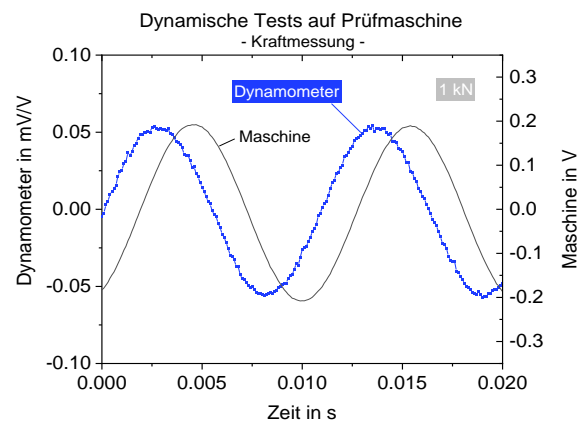


Bild 22 Ergebnisse der dynamischen Testläufe mit neuverdrahtetem Dynamometer, Gegenüberstellung von Dynamometer- und Maschinensignal bei Test mit 1 kN-Amplitude

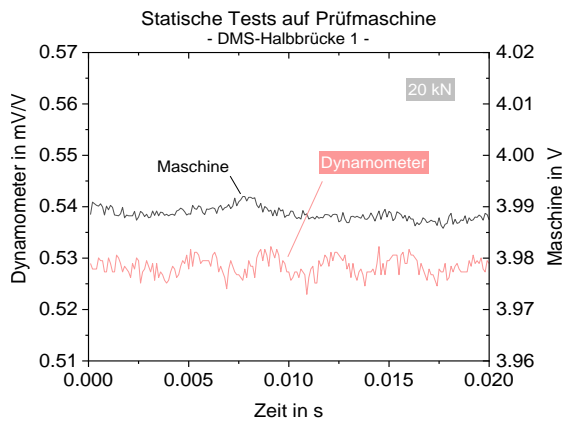


Bild 20 Ergebnisse der statischen Testläufe mit neuverdrahtetem Dynamometer, Gegenüberstellung von Dynamometer- und Maschinensignal bei Nennlast

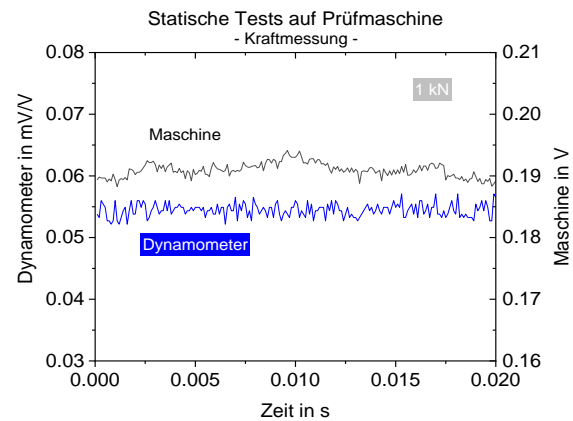


Bild 23 Ergebnisse der statischen Testläufe mit neuverdrahtetem Dynamometer, Gegenüberstellung von Dynamometer- und Maschinensignal bei Test mit 1 kN statischer Last

Die Umkehrspanne erreicht für Zugkräfte ab rund 10 kN und für Druckkräfte kleiner-gleich -10 kN die Genauigkeit des kommerziellen TransfERNormals der Klasse 0,5. Insgesamt konnte das Dynamometer auf Basis dieser Ergebnisse im Zugbereich ab 6 kN in die Klasse 2 und im Druckbereich ab -4 kN in die Klasse 0,5 eingestuft werden.

Die in den **Bildern 18 bis 23** auszugsweise dargestellten Messergebnisse der Maschinentestläufe zeigen nun weitestgehend kontinuierlich verlaufende, rauscharme Kurven. In Bild 19 und 22 ist jeweils eine leichte Phasenverschiebung zwischen Dynamometer- und Maschinensignalen und ein leicht rauschbehaftetes Dynamometersignal im unteren Lastbereich zu erkennen. Das Rauschverhalten ist auch in den Messungen im statischen Betrieb, dargestellt in Bild 20 und 23, zu erkennen.

5 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Es wurden die ersten Entwicklungsstufen für ein dynamisches Kraft-TransfERNormal beschrieben, die der Konzeption, Auslegung, Konstruktion und ersten Erprobungen gewidmet waren. Das Kraft-TransfERNormal ist zweiteilig aufgebaut. Es besteht aus einem Dynamometer und einem Steifigkeitsadapter. Das Dynamometer ist in drei Ebenen mit DMS appliziert, die die Messung von Kraft, Biegedehnung und Temperatur ermöglichen und verfügt über Möglichkeiten zusätzliche Massen und Beschleunigungssensoren aufzunehmen. Der Steifigkeitsadapter ermöglicht die Nachbildung der Steifigkeit eines Prüfaufbaus, wie er in der Praxis, z.B. bei der Ermüdungsprüfung von Rundzugproben erwartet wird.

In der ersten Entwicklungsstufe konnten die experimentellen Festigkeitsnachweise für das Dynamometer und die Masse-Segmente erbracht werden. Der probenähnliche Steifigkeitsadapter erwies sich als ungeeignet. Daraufhin wurden drei neue Konzepte erarbeitet, von denen das auf einem Dehnzylinder basierende Konzept zur Erprobungsreife weiterentwickelt wurde. Unterdessen wurde das Dynamometer mit DMS appliziert.

In der zweiten Entwicklungsstufe konnten die Applikation des Dynamometers und der neuentwickelte Steifigkeitsadapter erprobt werden. Zunächst wurde das Dynamometer mehreren statischen Kalibrierungen bei PTB und MPA unterzogen. Dabei konnte es nicht in die erwartete Klasse 0,5 eingestuft werden. Die auf einer 50 kN-Schwingprüfmaschine fortgesetzte Erprobung ergab eine unzureichende Signalqualität der Kraftmessebene. Die Signalqualität der Biegeebene erwies sich als weit besser, sodass eine Neuverschaltung und Neuverkabelung des Dynamometers erfolgte. Der neuentwickelte Steifigkeitsadapter erwies unterdessen seine volle Funktionalität bei verbesserter lateraler Steifigkeit für alle Amplituden bis hinauf zur Nennlast. In der dritten Entwicklungsstufe wurde die Funktionalität der Neuverschaltung und Neuverkabelung des Dynamometers geprüft. Die statischen Kalibrierungen ergaben zumindest für einen Teil des Druckbereichs eine Einstufung in die Klasse 0,5. In den Prüfmaschinentests erwies sich die

Qualität der Signale der DMS-Brücken als signifikant besser als vor der Neuverdrahtung und Neuverkabelung. Dennoch sind die Signale leicht rauschbehaftet. Die erstmalig zu Vergleichszwecken simultan erfassten Maschinensignale zeigen sich leicht Phasenverschoben zu den Dynamometersignalen. Sowohl das Rauschen der Dynamometersignale, als auch die Phasenverschiebung sind noch zu quantifizieren, um Messunsicherheiten ermitteln und angeben zu können. Hierfür ist auch die Kalibrierung der Schnittstellen des Prüfsystems notwendig, von denen die Messwerte übernommen wurden.

Die Erprobung des Kraft-TransfERNormals mit angekoppelten Zusatzmassen und Beschleunigungssensoren, sowie die Evaluation der Messungen zu Biegedehnung und Temperatur steht noch aus.

Insgesamt befindet sich damit nun ein Kraft-TransfERNormal, das in Bild 11 physisch und in **Bild 24** modellhaft dargestellt ist, im fortgeschrittenen Erprobungsstadium. Es wird davon ausgegangen, dass die vollständig rückgeführte Messung dynamischer Kräfte und die Quantifizierung parasitärer Einflussgrößen (unkompensierte Masse, Biegedehnung, Temperatureinfluss) mit diesem TransfERNormal bald möglich ist.

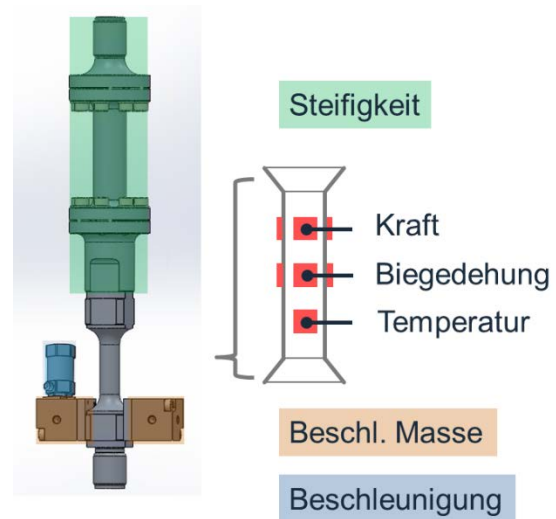


Bild 24 Vollständiges Modell des dynamischen Kraft-TransfERNormals, entwickelt im Rahmen von [1]

6 Ausblick und Dank

Im Fokus der weiteren Untersuchungen stehen die Ermittlung der Ursachen für das unausgewogene Bild der statischen Kalibrierungen, die Evaluation der Messdaten von Biegedehnungen und Temperatur mit Quantifizierung des Einflusses des Signalrauschens für alle DMS-Sensoren und die Erprobung mit angekoppelten Massen und angesetzten Beschleunigungssensoren.

Diese Arbeit ist Teil des vom EMPIR-Programm unterstützten Projekts 18SIB08 – ComTraForce. Die Autoren danken der Europäischen Vereinigung der nationalen metrologischen Institute EURAMET für die Unterstützung des Projekts im Rahmen des von der Europäischen Union und ihren Mitgliedstaaten geförderten Vorhabens Horizon 2020.



7 Literatur

- [1] 18SIB08 – ComTraForce – Comprehensive Traceability for Force Metrology Services <https://www.ptb.de/empir2019/comtraforce/home/>, abgerufen am 07.03.2022
- [2] ASTM E467-21, Standard Practice for Verification of Constant Amplitude Dynamic Forces in an Axial Fatigue Testing System, ASTM International, West Conshohocken, United States, 2021
- [3] DIN EN ISO7500:2018-06, Metallische Werkstoffe - Kalibrierung und Überprüfung von statischen einachsigen Prüfmaschinen - Teil 1: Zug- und Druckprüfmaschinen - Kalibrierung und Überprüfung der Kraftmesseinrichtung (ISO 7500-1:2018), Beuth Verlag, Berlin, 2018
- [4] ISO4965-1:2012-07, Metallic materials — Dynamic force calibration for uniaxial fatigue testing — Part 1: Testing systems, ISO copyright office, Genf, 2012
- [5] DKD-R 3-10, Blatt 3, Dynamische Verifizierung von Werkstoffprüfmaschinen mit applizierten Proben, Seite 9, Ausgabe 05/2019, <https://doi.org/10.7795/550.20190507B>
- [6] M.J. Dixon: Dynamic Force Measurement, in Materials Metrology and Standards for Structural Performance, B.F. Dyson, M.S. Loveday, M.G. Gee [Editors], Chapman & Hall, 1st Edition, London, 1995
- [7] ASTM E466-21, Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, United States, 2021
- [8] Micro-Measurements, Precision Strain Gages and Sensors, Databook, https://docs.micro-measurements.com/?id=4079&_ga=2.2624368.1368083756.1646593699-1347463489.1646593699, Seiten 10, 134, 135, abgerufen am 07.03.2022
- [9] U. Fischer et al, Tabellenbuch Metall, 43. Auflage, Verlag Europa Lehrmittel – Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, Haan-Gruiten, 2005, Seiten 44, 46, 204, 221
- [10] DIN EN ISO 376:2011-09, Metallische Werkstoffe - Kalibrierung der Kraftmessgeräte für die Prüfung von Prüfmaschinen mit einachsiger Beanspruchung (ISO 376:2011), Beuth Verlag, Berlin, 2011