

Hochfrequente Ermüdungstests an Schweißverbindungen mit einem neu entwickelten Magnetresonanzprüfrahmen

P. Schaumann¹, C. Keindorf¹, A. Alt²

¹ ForWind – Zentrum für Windenergieforschung, Institut für Stahlbau, Leibniz Universität Hannover, Germany

² Bremen, Germany

Kurzfassung In dem vorliegenden Beitrag wird über ein neues Prüfverfahren zur Ermittlung der Schwingfestigkeit von Schweißverbindungen unter ein- oder mehrstufiger Belastung bis in den Giga-Cycle-Fatigue-Bereich berichtet und erste Ergebnisse vorgestellt. Schwingversuche mit bis zu 10^9 Lastwechseln lassen sich unter sinnvollem Zeitaufwand nur bei hohen Prüffrequenzen durchführen. Dafür wurde eine neuartige Resonanzprüfvorrichtung gemäß [5] mit einer Prüffrequenz von 400 Hz entwickelt. Sie nutzt die erste Eigenschwingung der Anordnung von Resonanzprüfrahmen und Probe, um die Probe schwellend unter Zug zu belasten. Das Prinzip bietet insbesondere die Vorteile einer minimalen Antriebsleistung und leichten Bauweise und kann dadurch für hohe Prüffrequenzen bis zu 1000 Hz und große Proben bzw. Prüfkraft ausgelegt werden. Die ersten Versuchsergebnisse bestätigen die nach den gültigen Richtlinien zu erwartenden Ermüdungsfestigkeiten. Auch die Anrissorte waren wie bei den üblichen Tests mit niedrigen Prüffrequenzen entweder am Schweißnahtübergang oder an der Nahtwurzel zu finden. Um Bedenken z.B. hinsichtlich des Einflusses der Prüffrequenz auf die Versuchsergebnisse nachzugehen, wurden Thermographiemessungen an der Schweißnaht während des Versuches durchgeführt. Bis zur Anrissbildung stieg die Temperatur im Nahtübergang nur um ca. 1°C . Im Bereich des instabilen Risswachstums bis zum Abbruch des Versuches bei ca. 15% Vorspannkraftabfall stieg sie weiter auf 5°C an. Ein frequenzabhängiger temperaturbedingter Einfluss auf die Entstehung eines Anrisses wurde damit ausgeschlossen. Zusätzlich zu Schwingversuchen mit konstanten Amplituden wurden auch Tests mit variablen Amplitudenverläufen durchgeführt.

1 Einleitung

Bei schwingender Beanspruchung von Schweißverbindungen ist neben der Tragfähigkeit auch die Ermüdungsfestigkeit nachzuweisen. Als Grundlage für diesen Nachweis dienen Ermüdungsfestigkeitskurven, wie sie in den für die im Stahlbau gültigen Richtlinien [1], [2] beschrieben werden. Liegen Spannungsschwingbreiten unterhalb des Schwellenwertes bei 10^8 vor, so werden diese nicht als ermüdungswirksam verstanden. Für noch größere Schwingspielzahlen bis hin zum Giga-Cycle-Fatigue-Bereich (GCF) existieren bislang nur wenig experimentell abgesicherte Kurvenverläufe. Allerdings werden Schweißverbindungen, wie zum Beispiel bei stählernen Tragstrukturen von Windenergieanlagen mittlerweile bis zu 10^9 Lastwechseln (LW) beansprucht. In diesem Zusammenhang sind auch geschweißte Stahlkonstruktionen der Offshore-Industrie sowie in den Bereichen Brückenbau, Schiffbau, Schienenfahrzeugtechnik, Anlagen- und Maschinenbau zu nennen, die durch ähnlich hohe Schwingspielzahlen belastet werden. Unter welchen Bedingungen und für welche Schweißkonstruktionen ein Absinken der Ermüdungsfestigkeit im GCF-Bereich stattfindet, ist bislang noch ungeklärt.

Um den Kenntnisstand auf dem Gebiet der Ermüdungsfestigkeit von Schweißverbindungen bei sehr hohen Schwingspielzahlen (10^7 bis 10^9) zu erweitern, wurden am Institut für Stahlbau der Leibniz Universität Hannover Schwingversuche durchgeführt. Mit üblichen Resonanzpulsatoren, die Prüffrequenzen von 20 bis 60 Hz aufweisen, würden Ermüdungsversuche von 10^8 bereits 20 bis 60 Tage an Versuchszeit erfordern. Für einen Schwingversuch im GCF-Bereich mit 10^9 wären sogar mehrere Monate einzuplanen. Zur-

zeit wird eine neuartige Resonanzprüfvorrichtung erprobt, die für eine Prüffrequenz von 400 Hz ausgelegt wurde, um die Versuchszeiten deutlich zu verkürzen. Zum Beispiel sind damit für einen Versuch mit 10^8 LW nur noch 3 Tage erforderlich.

2 Prüfvorrichtung

Die Prüfvorrichtung ist eine neue Entwicklung gemäß [5]. Sie nutzt die erste Eigenschwingung der Anordnung von Resonanzprüfrahmen (RPR) und Probe, um die Probe schwellend unter Zug zu belasten. Das Prinzip bietet viele Vorteile, die im Folgenden ausgeführt werden.

2.1 Prinzip

Der Prüfling wird zwischen den gegenüberliegenden Seiten eines geschlossenen Rahmens vorgespannt. Eine Biegeeigenschwingung des Rahmens, wie sie in Abb. 1 schematisch dargestellt ist, belastet die Probe harmonisch. Aus der Einspannung der Probe jeweils im Schwingungsbauch der beiden Rahmenseiten ergibt sich eine reine Belastung in Probenlängsrichtung, also je nach Höhe der Vorspannung eine wechselnde Zug/Druck- oder schwellende Zugbelastung. Die Durchbiegung infolge der Vorspannung ist in Abb. 1 zur Vereinfachung nicht dargestellt. Die Eigenschwingung besitzt vier Knotenpunkte in den Ecken des Rahmens. Dort wird der Rahmen frei von Reaktionskräften gelagert. Die Anregung in Eigenschwingform erfolgt elektromagnetisch durch Rückkoppelung eines Dehnmessstreifensignals der Eigenschwingung.

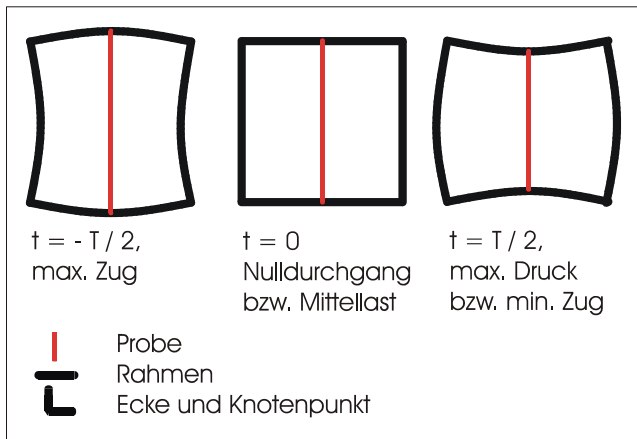


Abb. 1: Eigenschwingform von Resonanzprüfrahmen und Probe im Verlauf einer Periode der Dauer T

Die Anwendung dieses Prinzip für geschweißte Flachzugproben ist schematisch in Abb. 2 dargestellt. Der Resonanzprüfrahmen (RPR) ist im Vergleich zur Prinzipdarstellung in Abb. 1 um Hebelarme erweitert. Die Struktur erinnert an zwei Balken, die an zwei Stellen elastisch so miteinander verbunden sind, dass sie in der Eigenform gegenläufig schwingen. Anhand der Balkeneigenschwingungsform ist zu erkennen, dass auch die geschweißte Flachzugprobe in der Mitte einer Schwingungsamplitude unterliegt.

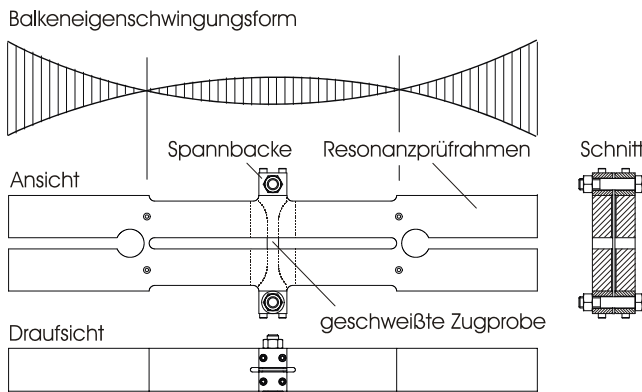


Abb. 2: Prinzip des Magnetresonanzprüfrahmens

2.2 Aufbau

Die Abb. 3 zeigt die mechanische Umsetzung der Prüfvorrichtung. Sie besteht aus einer Grundplatte, auf welcher vier Wechselstrommagnete und der monolithische RPR gelagert sind. Die elektromagnetische Schwingungsanregung erfolgt berührungsfrei über die Hebelarme. Da der Aufbau symmetrisch und der RPR in den Knotenpunkten seiner Eigenschwingung (über Passstifte) gelagert ist, trägt die Lagerung prinzipiell nur das Gewicht des RPR. Die Seitenlängen und Querschnitte des Rahmens wurden mit Hilfe der Methode der finiten Elemente so dimensioniert, dass er zugleich Vorspannkraft von 60 kN und Prüfkraftamplituden von 50 kN dauerhaft erträgt. Die Länge der Hebelarme wurde dazu so bestimmt, dass die Eigenfrequenz mit einer vorgespannten Flachzugprobe (200 mm² Nennquerschnitt) 400 Hz beträgt. Sie verringert sich ohne Probe auf 340 Hz. Für eine hohe

Dauerfestigkeit ist der RPR aus Einsatzstahl gefertigt und einsatzgehärtet.

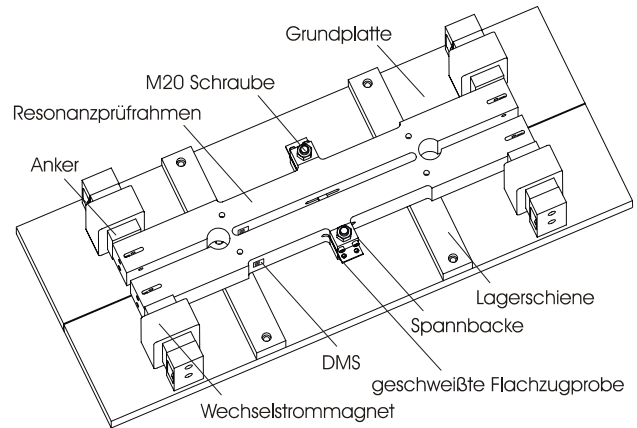


Abb. 3: 3D-Modell der neuen Resonanzprüfvorrichtung für Ermüdungstests an geschweißten Flachzugproben

2.3 Vorspannvorrichtung

Mit der Vorspannvorrichtung, die in Abb. 4 im Schnitt dargestellt ist, wird die gewünschte Mittellast bzw. Vorspannkraft vor dem Schwingversuch eingestellt. Die geschweißte Flachzugprobe, gemäß Abb. 7, besitzt auf einer Seite zwei Durchgangsbohrungen. In diesem Bereich werden die Probe und Vorspannvorrichtung, nachdem zuvor das bezeichnete Einschublech eingelegt wurde, über zwei M10 Schrauben miteinander verspannt.

Anschließend wird die Stellschraube, die ein Feingewinde besitzt, angezogen. Dabei zieht sie über das Gewinde, den Vorspannblock, die Probe und die Spannbäcke an der gegenüberliegenden Rahmenseite und drückt über das Schublech und die Spannbäcke auf die naheliegende Rahmenseite. Der Rahmen verbiegt sich bei diesem Vorspannvorgang, so dass der Vorspannblock von den Spannbäcken abzuheben scheint.

Um Setzungseffekte während des Versuches vorwegzunehmen, wird die Probe zuerst bis zur Oberspannung vorgespannt und auf diesem Lastniveau solange gehalten, bis keine nennenswerten Vorspannkraftverluste mehr auftreten. Nach einer vollständigen Entlastung erfolgt das zweite Vorspannen, diesmal aber nur bis zur Prüfmittellast. Wenn diese Kraft erreicht ist, werden die M20 Schrauben angezogen (s. Abb. 3), wodurch die Spannbäcke an die Flachzugprobe gedrückt werden. Eine gerändelte (geriffelte) Oberfläche der Spannbäcke prägt sich dabei in die Flachzugprobe ein und unterstützt so die prinzipiell reibschlüssige Verbindung durch einen leichten Formschluss. Abschließend wird die Stellschraube wieder gelöst und der Vorspannblock demontiert. Die Flachzugprobe ist vorgespannt. Um ein evtl. Verrutschen der Spannbäcke auf dem RPR im Schwingbetrieb zu verhindern, werden diese zusätzlich mit jeweils zwei M8 Schrauben gesichert. Die Messung der Vorspannkraft wird im nächsten Abschnitt zum Regelkreis beschrieben.

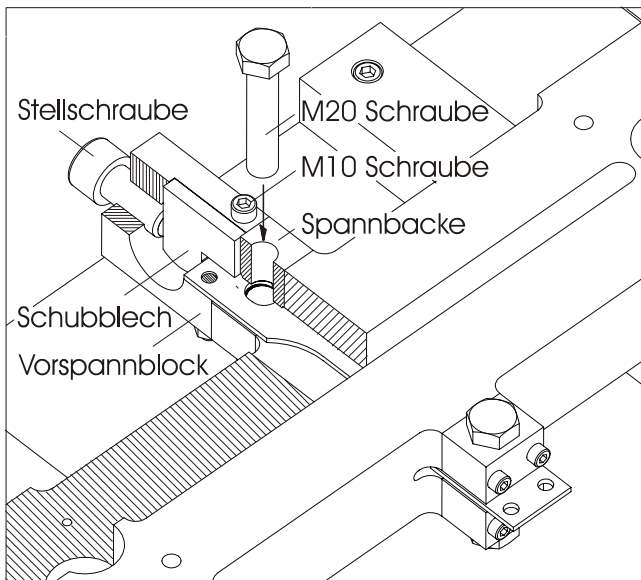


Abb. 4: Schnittdarstellung von Vorspanneinrichtung und Resonanzprüfrahmen

2.4 Regelkreis

Der Regelkreis ist in Abb. 5 dargestellt. Er setzt sich aus dem RPR, Dehnmessstreifen (DMS) und Messverstärker (HBM KWS 3073), Microcontroller (Atmega8515), Bandpassfilter, PI-Regler, Leistungsverstärker (BEAK BAA 1000) und den Wechselstrommagneten (Magnet-Schulz YZUW 120) zusammen.

Vier Dehnmessstreifen befinden sich auf gleicher Höhe gegenüberliegender Rahmenseiten jeweils einmal auf der Innen- und der Außenseite. Die DMS auf den Außenseiten werden beim Vorspannen gedehnt, die auf den Innenseiten gestaucht. Für den Schwingbetrieb gilt das gleiche, jedoch mit wechselndem Vorzeichen. In der Schaltung einer Wheatstoneschen Vollbrücke und mit Hilfe des Messverstärkers erzeugen sie elektrische Spannungssignale, die der statischen und schwingenden Belastung der Probe jeweils proportional sind. Die Kalibrierung der beiden Signale erfolgt je Probentyp einmalig mit einer wiederum mit DMS versehenen Probe, die zuvor in einer Zugprüfmaschine geeicht wurde.

Das dynamische DMS-Signal der Eigenschwingung des RPR wird im Microcontroller in einen Rechteckimpuls halber Frequenz und einstellbarer Phasenlage verarbeitet und betreibt die Wechselstrommagnete leistungsverstärkt als eine sinusförmige Spannung, nachdem es den Bandpassfilter durchlaufen hat. Magnetanker sind an den Hebelarmen des RPR befestigt und werden von den vier Wechselstrommagneten phasengleich angezogen, sodass die Eigenschwingung aufrechterhalten wird. Die Halbierung der Messfrequenz für die Anregung ist erforderlich, weil die ferromagnetischen Anker unabhängig vom Vorzeichen der magnetischen Kraft angezogen werden. Des Weiteren gibt es eine optimale Phasenlage für die Rückkoppelung des aufbereiteten Messsignals, die je Probentyp einmal für den Regelkreis bestimmt werden muss.

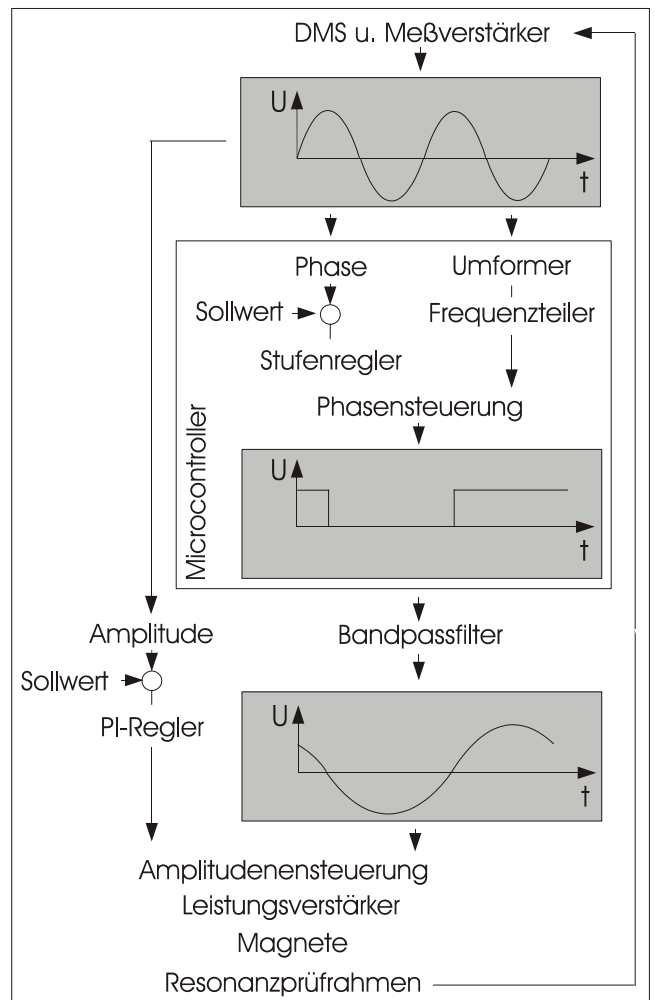


Abb. 5: Regelkreis

Die Schwingungsamplitude des Resonanzkörpers wird über die Amplitude der Sinusspannung aus dem Leistungsverstärker mit Proportional-Integral-Verhalten (PI) geregelt. Die Phasenlage wird ebenfalls geregelt.

Ein leichter Stoß mit dem Gummihammer genügt, um den RPR ein erstes Mal in Eigenschwingung zu versetzen. Um ein gleichbleibendes Regelverhalten mit optimierten PI Parametern zu erhalten, wird der Sollwert der Amplitude in zwei Stufen angefahren. Während des Einschwingvorganges, der das Anstoßen der Eigenschwingung beinhaltet, arbeitet der Regler mit reduzierter Versorgungsspannung. Er regelt voll aus, aber kann dabei nur einen Bruchteil der Sollwertamplitude erreichen. Der eigentliche Versuch beginnt anschließend, indem dem Regler die volle Versorgungsspannung zugeteilt wird. Je nach Höhe der Sollwertamplitude benötigt der PI Regler derzeit 10000 bis 20000 LW, um den Sollwert zu erreichen. Es wird damit gerechnet, das Einschwingen durch Erweiterung des Reglers um einen D-Anteil auf künftig 1000 bis 2000 LW verkürzen zu können.

Alle erforderlichen Komponenten der Prüfvorrichtung inklusive der Steuerungs- und Messtechnik sind in der Abb. 6 dargestellt. Ein Notebook mit LabView 8.5 und Messkarte (NI-6024-E) zeichnet die Messdaten wie Vorspannkraft, Kraftamplitude, Frequenz, Phase und

Amplitude des Stroms am Ausgang des Leistungsverstärkers auf und leitet den Abbruch des Versuches ein, sobald ein Abbruchkriterium erfüllt ist. Die Abbruchkriterien sind ein manuelles Not Aus über die Tastatur, das Erreichen der Versuchslastspielzahl, das Abfallen auf eine bestimmte Vorspannkraft und das Überschreiten einer Toleranz für den Istwert der Kraftamplitude. Wenn eines dieser Kriterien erfüllt ist, belegt das Notebook über einen Ausgang der Messkarte einen Eingang des Microcontrollers mit 5 V, der daraufhin ein konstantes 0 V Signal an den Leistungsverstärker weitergibt.

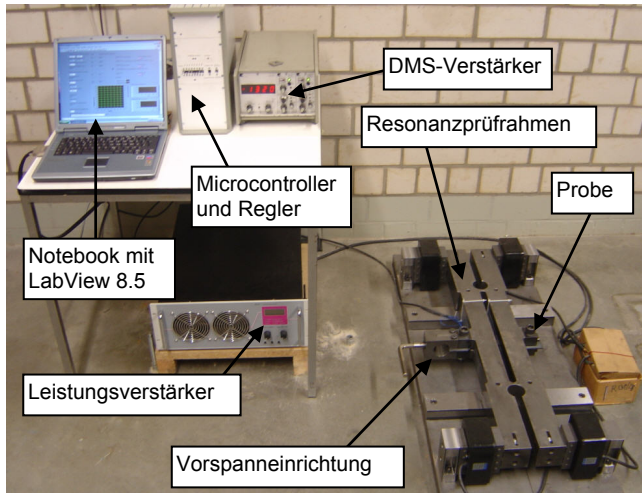


Abb. 6: Aufbau der Prüfvorrichtung

Der Sollwert der Kraftamplitude wird derzeit mithilfe eines Spindelpotentiometers als elektrischer Spannungswert eingestellt. Prinzipiell ist es natürlich auch möglich, sowohl einen konstanten als auch einen zeitlich veränderten Sollwert über die Messkarte automatisch vorzugeben.

2.5 Vor- und Nachteile

Die beschriebene Resonanzprüfvorrichtung besitzt wenige Nachteile. Sie ist keine Universalprüfmaschine, sondern für eine spezielle Probengeometrie ausgelegt. Zudem kann sie während des Betriebes keine Vorspannkraftverluste ausgleichen. Dieses Problem lässt sich jedoch umgehen, indem Ermüdungsversuche nicht bis zum Bruch, sondern bis zum Anriss ausgewertet werden, weil nennenswerte Vorspannkraftverluste erst im Bereich eines stabilen Risswachstums der Probe auftreten. Daneben besitzt die Prüfvorrichtung viele Vorteile.

Durch den Betrieb in Resonanz ist die erforderliche Antriebsleistung minimal. Die Verformungsarbeit für die größte Auslenkung in der Eigenform des RPR wird nur einmal verrichtet. Sie verteilt sich bei wachsender Schwingungsamplitude auf mehrere Schwingungsperioden. Wenn die Amplitude den Sollwert erreicht hat, verrichten die Magnete nur noch Dämpfungsarbeit.

Durch den Betrieb in Eigenschwingung sind unbeabsichtigte Belastungen ausgeschlossen, da die im Resonanzbetrieb aufgebrauchten Anregungskräfte zu

gering sind, um von der Eigenform abweichende quasi statische Verformungen zu erzwingen.

Der RPR muss nicht steif ausgelegt werden, um ungewünschte Schwingungen zu unterdrücken, sondern wird im Gegenteil beanspruchungsgerecht so dimensioniert, dass er in Eigenschwingung ähnlich hohe Spannungen wie die Probe erfährt. Die Prüfvorrichtung ist dadurch im Verhältnis zu den Kräften, die sie erzeugt, um ein Vielfaches leichter als herkömmliche Pulser.

Durch die Lagerung des RPR in den Knotenpunkten der Eigenschwingung und eine symmetrische Anordnung der anregenden Wechselstrommagnete gibt es keine resultierenden Lagerkräfte. Die Lager müssen nicht massiv sein. Es werden keine Schwingungen auf das Fundament übertragen.

Der RPR kann ohne Schwierigkeiten für Prüffrequenzen bis zu 1000 Hz und für große Flachzugproben (in Planung sind ca. 30 mm Blechdicke) ausgelegt werden, ohne dass sich die erforderliche Antriebsleistung wesentlich vergrößert.

3 Geschweißte Flachzugproben

Die Gestaltung geschweißter Flachzugproben für den quasistatischen Zugversuch wird in DIN EN 10002-1 geregelt. Für den Schwingfestigkeitsversuch gibt es keine Norm. Im Bereich der Versuchslänge L_c richtet sich die hier untersuchte Probe nach der genannten Norm. Im Bereich der Einspannung musste die Probe aus den Gründen der unterschiedlichen Versagensmechanismen von Gewalt- und Ermüdungsbruch, der gegebenenfalls wechselnden Belastung und der maschinenseitig begrenzten Vorspannwege anders gestaltet werden.

Während der Gewaltbruch grundsätzlich im Bereich des geringsten Probenquerschnittes (homogene Werkstoffeigenschaften vorausgesetzt) erfolgt, weil lokale Spannungsspitzen an anderer Stelle durch örtlich begrenztes Werkstofffließen ausgeglichen werden können, beginnt der Ermüdungsbruch gewöhnlich am Ort der höchsten lokalen Spannungsspitze. Die Probe nach DIN EN 10002-1 musste im Bereich der Einspannköpfe modifiziert werden (Breite und Ausgangsradius), um den Formzahl und Kerbfaktor zu reduzieren.

Im Zugversuch wird die Probe gewöhnlich in einer Keilverbindung eingespannt, deren Klemmkraft sich mit Aufbringen der Belastung selbst verstärkt. Für eine vergleichbare Einspannung müsste der RRP Vorspannwege einbringen können, aber die Einspannung eignet sich ohnehin nicht, da sie sich bei einer wechselnden Prüfbelastung lösen würde.

In Abb. 7 ist die endgültige Geometrie der geschweißten Flachzugprobe dargestellt. Sie wurde aus zwei quadratischen, 4 mm dicken Stahlblechen der Güte S355 J2G3 gefertigt, die am Institut für Stahlbau mit einem vollmechanischen MAG-Schweißverfahren zunächst mit einer Stumpfnah, mit einem Nahtöff-

nungswinkel von 45° für die V-Naht geschweißt wurden. Anschließend erfolgten mehrere Laserschnitte, um die Zeichnungsmasse in Abb. 7 zu erhalten.

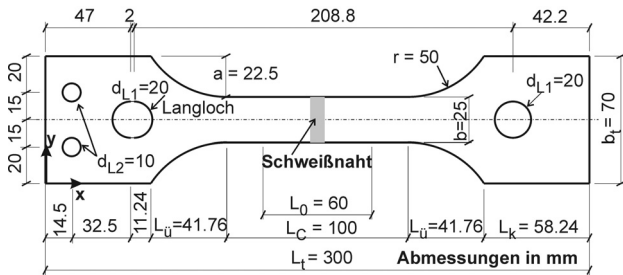


Abb. 7: Geometrie der geschweißten Flachzugprobe

Diese Prüfkörper besitzen eine Gesamtlänge von 300 mm und eine Breite von 70 mm an den Einspannköpfen. Mit Hilfe von Übergangsradien ($r = 50$ mm) wird die Breite auf 25 mm im mittleren Bereich reduziert. Der eigentliche Prüfquerschnitt S_0 mit $t = 4$ mm und $b = 25$ mm erstreckt sich über eine Anfangsmesslänge von $L_0 = 60$ mm. Die Schweißnaht befindet sich in der Mitte dieser Anfangsmesslänge. In den Bereichen der Einspannung befindet sich jeweils eine Durchgangsbohrung für eine M20 Schraube, welche die Einspannung gewährleistet (s. Abb. 3). Auf einer Seite befinden sich zusätzlich zwei Durchgangsbohrungen für M10 Schrauben, die für die Vorspannvorrichtung benötigt werden (s. Abb. 4).

Aufgrund des vollmechanischen Schweißprozesses haben die Schweißnähte über der gesamten Länge eine gleichmäßige Form und sehr gute Qualität. Wegen des Laserschnittes durch die fertige Schweißnaht gibt es auch an den Rändern keine Abweichungen.

4 Schwingversuche mit konstanter Amplitude

Nachdem die gewünschte Mittellast mit der Vorspanneinrichtung eingestellt wurde, werden der Microcontroller, der Verstärker und das Notebook mit dem Messprogramm LabView 8.5 gestartet (s. Abb. 6). Es werden der Sollwert der Zugkraftamplitude sowie Parameter und Abbruchkriterien wie Wiederholhäufigkeit der Messdatendokumentation oder Phasenwinkel der Signalkückkopplung über den Leistungsverstärker und zulässiges Absinken der Vorspannkraft oder maximale Anzahl der Versuchszyklen definiert. Anschließend wird der Schwingversuch als Zugsschwellbeanspruchung mit einem Spannungsverhältnis von $R = 0.1$ und konstanter Amplitude gestartet. Für den Einschwingvorgang auf niedrigem Lastniveau sind mit dem verwendeten PI-Regler ca. 10.000 Schwingspiele erforderlich. Danach wird der Sollwert der Zugkraftamplitude angesteuert, wofür nochmals ca. 10.000 bis 20.000 LW benötigt werden. Sowohl der Einschwingvorgang als auch der eigentliche Schwingversuch sind in Abb. 8 zu erkennen.

Auf der linken Ordinate (y-Achse) der Abb. 8 ist die Prüffrequenz in Abhängigkeit von der Schwingspielzahl dargestellt. Während des Einschwingvorgangs beträgt diese 388.2 Hz. Bis zum Erreichen des Sollwerts für die Zugkraftamplitude (7.0 kN) fällt die Prüffrequenz geringfügig auf 387.8 Hz ab. Hier zeigt sich

eine amplitudenabhängige Steifigkeitsänderung. Mit zunehmender Amplitude verringert sich die über eine Periode gemittelte Steifigkeit von RPR und Probe.

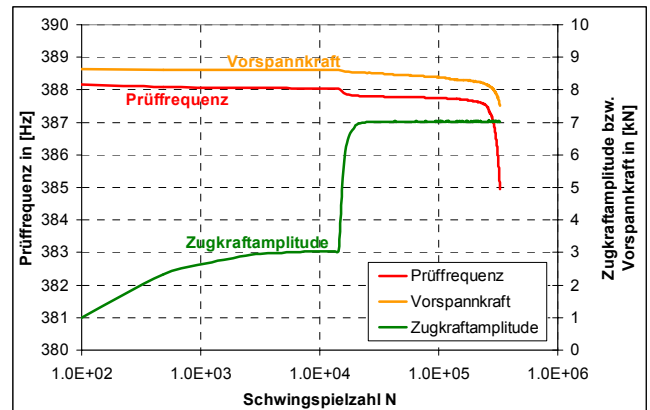


Abb. 8: Schwingversuch mit konstanter Amplitude

Auf der rechten Ordinate der Abb. 8 sind die Vorspannkraft und die Zugkraftamplitude in Abhängigkeit von der Schwingspielzahl (logarithmischer Maßstab) dargestellt. Während des Einschwingvorgangs bleibt die Vorspannkraft konstant bei 8.6 kN. Jedoch bereits beim Ansteuern der Zugkraftamplitude fällt die Vorspannkraft ab, was auf einen Steifigkeitsverlust hindeutet, der sich während des Versuches kontinuierlich fortsetzt. Da die gewählte Spannungsschwingbreite von $\Delta\sigma = 140$ MPa dem 3-fachen Wert der Dauerfestigkeit ($\Delta\sigma_D = 47$ MPa bei 10^7 LW) entspricht und somit dem Low-Cycle-Fatigue-Bereich (LCF) zuzuordnen ist, sind die Plastizierungen bzw. Mikrorisse von Beginn an als plausibel zu bewerten. Bei gekerbten Proben, wie es Schweißnähte sind, ist davon auszugehen, dass bereits vor dem Schwingversuch Mikrorisse vorhanden sind. Während der Anfangsphase des Schwingversuches schließen sich die Mikrorisse zu Makrorissen zusammen. Anschließend folgt die Phase mit dem stabilen Risswachstum, in Abb. 8 bis ca. 200.000 LW, in welcher der Makroriss allmählich anwächst. Das instabile Risswachstum begann im Fall der Probe von Abb. 8 bei ca. 200.000 LW. Während die Zugkraftamplitude in dieser Phase von der Regelung konstant gehalten wurde, sanken Prüffrequenz und Vorspannkraft mit zunehmender Geschwindigkeit ab. Mit dem Absinken der Vorspannkraft auf 7.5 kN wurde ein Abschaltkriterium erfüllt und der Versuch automatisch beendet. Der Vorspannkraftverlust betrug bis dahin ca. 15 %, die erzielte Lastspielzahl $N_F = 326.500$. Der Bruch wäre wenige 1000 LW später erfolgt. Insgesamt dauerte der Versuch 16 min.

Bei einem weiteren Schwingversuch auf gleichem Zeitfestigkeitshorizont ($\Delta\sigma = 140$ MPa) wurde eine Thermografiemessung durchgeführt (s. Abb. 9). Die Stumpfnäht wurde vor der Messung mit einem dunklen Lack besprüht, um einen hohen Absorptionsgrad zu erzielen. Dieser wurde anschließend zu 0.96 (maximal 1.0 möglich) bestimmt. Die Naht konnte vollständig beobachtet werden und war bedingt durch die mittige Position zwischen den beiden Balken des Schwingkörpers vor Strahlungseinflüssen geschützt.

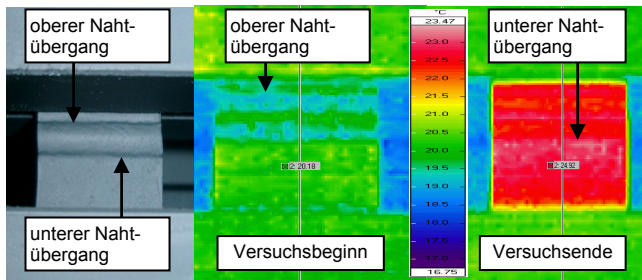


Abb. 9: Thermografiemessung während des Versuchs

In der Abb. 9 links sind sowohl der obere als auch der untere Nahtübergang mit Pfeilen gekennzeichnet. Die Probe hatte in diesem Fall eine Breite von $b = 25$ mm. Die Genauigkeit der verwendeten Infrarot-Kamera beträgt 0.1 Kelvin. Bei einem gewählten Objekt-Abstand von 500 mm war eine maximale Auflösung für das Pixelraster von $0.8 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$ möglich. Die IR-Kamera vom Typ NEC ThermoTracer TH7102WX wurde vorab mittels eines digitalen Temperaturmessgebers über die Oberflächentemperatur des Schwingkörpers kalibriert. Diese betrug im Mittel 20.3°C . Bei Versuchsbeginn (s. Abb. 9 mittig) weisen die Nahtübergänge infolge der dunkleren Oberflächenfarbe (höhere Absorption) etwas geringere Temperaturen auf als die Umgebungstemperatur. Mit steigender Schwingzahl stiegen auch die Temperaturen an der Schweißnaht, während die Umgebungstemperatur relativ konstant blieb. In der Abb. 9 rechts ist zu erkennen, dass die maximalen Temperaturen direkt am unteren Nahtübergang gemessen wurden. Dort lagen beim Erreichen der Bruchlastspielzahl von $N_F = 326.500$ Spitzenwerte zwischen 24 und 26°C vor. Das entspricht im Mittel einer Temperaturerhöhung gegenüber der Oberflächentemperatur von ca. 5°C bei einer vorliegenden Prüffrequenz von 383 Hz .

Insbesondere am Versuchsende kam es zu einem zunehmenden Anstieg der Temperaturen am unteren Nahtübergang, wie es die Abb. 10 verdeutlicht. Dort sind zusätzlich zur Vorspannkraft und Zugkraftamplitude die Temperaturverläufe am Schwingkörper und am unteren Nahtübergang in Abhängigkeit von der Schwingzahl dargestellt.

Bislang wurden 10 Schwingversuche mit dieser Resonanzprüfvorrichtung durchgeführt. Bei einer angenommenen Kerbfallklasse der Stumpfnähte von FAT 80 ergibt sich für die ertragbare Schwingzahl gemäß der IIW-Richtlinie [2] ein Wert von $N_R = 370.000$ bezogen auf den getesteten Zeitfestigkeitshorizont von $\Delta\sigma = 140 \text{ MPa}$. Die experimentell erzielten Bruchlastspielzahlen schwanken zwischen 326.500 und 959.200 . Die normative Bruchlastspielzahl wurde bislang nur einmal geringfügig unterschritten (326.500). Eine statistisch abgesicherte Bestimmung der experimentellen Ermüdungsfestigkeitskurve (Wöhlerkurve) bzw. Kerbfallklasse kann erst erfolgen, wenn der zweite Zeitfestigkeitshorizont sowie der Dauerfestigkeitsbereich getestet wurden.

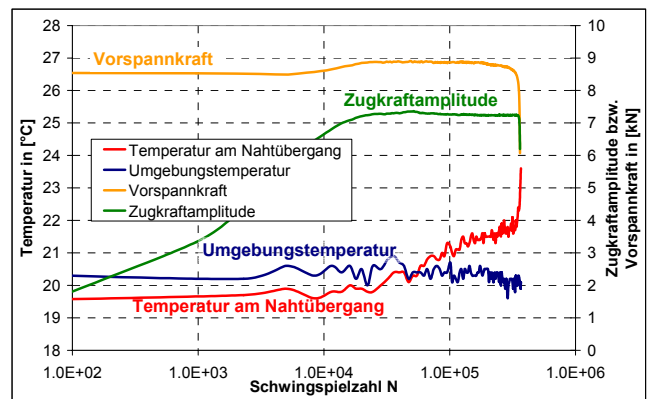


Abb. 10: Temperaturverläufe während des Versuchs

Als Anrissorte konnten sowohl der Schweißnahtübergang als auch die Nahtwurzel identifiziert werden. In Abb. 11 sind beispielhaft zwei Varianten von Ermüdungsrissen dargestellt.

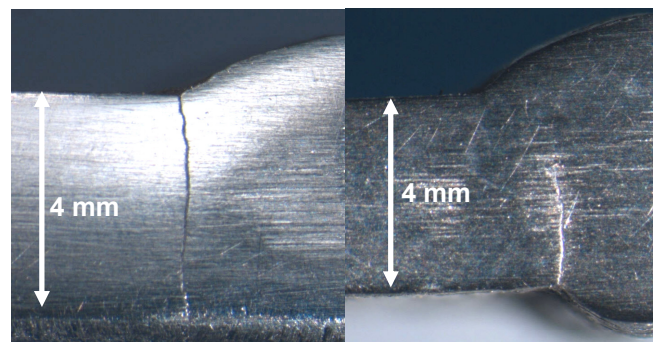


Abb. 11: Ermüdungsrisse am Schweißnahtübergang (links) und an der Nahtwurzel (rechts)

Die Bauteilzonen, die ein hohes Maß an strukturellen Diskontinuitäten und physikalischen Nichtlinearitäten aufweisen, sind vorzugsweise die Stellen mit Ermüdungsanrissen. Hinsichtlich der Schweißnähte stellen sowohl der Nahtübergang als auch die Nahtwurzel infolge der Kerbwirkung (Struktur) und infolge der Gefügeumwandlung in der Wärmeeinflusszone (Werkstoff) solche potenziellen Anrissorte dar. Bei Schwingversuchen in [3] mit niedrigen Prüffrequenzen (5 Hz) traten an geschweißten Stahlkonstruktionen mit großen Blechdicken (90 mm) die Ermüdungsrisse oftmals ebenfalls am Nahtübergang zwischen Schweißgut und Wärmeeinflusszone auf. Die Anrissorte, die also bei niedrigen Prüffrequenzen an Schweißnähten detektiert wurden, konnten qualitativ auch bei Ermüdungsversuchen in der neuen Resonanzprüfvorrichtung mit hohen Prüffrequenzen beobachtet werden.

5 Schwingversuche mit variabler Amplitude

Bei der Dimensionierung von Schweißnahtdetails, die mit konstanten Spannungsamplituden beansprucht werden, ist die entsprechende Wöhlerlinie des Kerbfalls nach [1] bzw. [2] anzusetzen. In der Realität tritt die Schwingbeanspruchung jedoch nur selten mit gleichbleibenden Amplituden auf, sondern meistens mit einer zufallsartigen Folge unterschiedlich großer Amplituden. Solche Beanspruchungsabläufe mit vari-

ablen Amplituden sind mit Verfahren der Betriebsfestigkeit zu beurteilen. Mit der Gaßner'schen Lebensdauerlinie besteht dabei eine der Wöhlerlinie im Zeitfestigkeitsbereich entsprechende Abhängigkeit zwischen der Beanspruchungshöhe und der endlichen Lebensdauer, ausgedrückt in der Anzahl der Schwingspiele [4]. Diese Lebensdauerlinie kann experimentell durch Simulation des zufallsartigen Beanspruchungsablaufs oder rechnerisch mittels einer Schadensakkumulations-Hypothese ermittelt werden. Im Rahmen der Forschungsaktivitäten des Instituts für Stahlbau der Leibniz Universität Hannover sind beide Varianten zur Ermittlung der Betriebsfestigkeit von Interesse. Deshalb wurde in Ergänzung zu den Schwingversuchen mit konstanter Amplitude überprüft, ob sich die neue Prüfvorrichtung auch für Blocklastversuche mit variablen Amplitudenverläufen eignet.

In der Abb. 12 ist das Ergebnis eines Schwingversuches mit variablem Amplitudenverlauf dargestellt. Die Änderung der Sollwertvorgabe erfolgte hier noch manuell über das oben erwähnte Spindelpotentiometer. In Abhängigkeit von der Schwingspielzahl, die diesmal nicht logarithmisch angegeben ist, sind die Verläufe für die Vorspannkraft, die Zugkraftamplitude und Prüffrequenz ausgewertet worden.

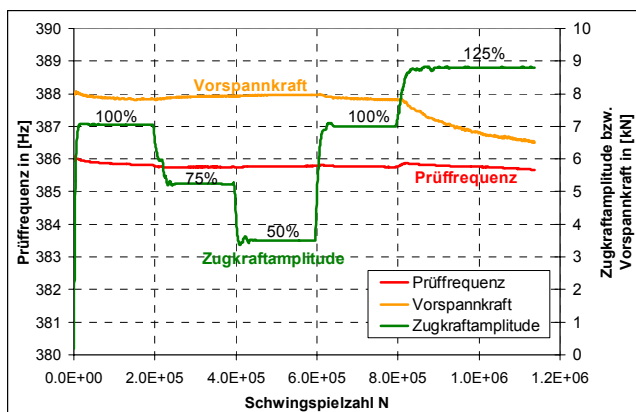


Abb. 12: Schwingversuch mit variabler Amplitude

Die Vorspannkraft wurde vor dem Versuch auf 8.0 kN eingestellt. Beim anschließenden Einschwingen des RPR lag die Prüffrequenz zunächst bei 386.0 Hz und fiel dann beim Erreichen der Zugkraftamplitude geringfügig auf 385.8 Hz ab. Als 100%-Wert für die Zugkraftamplitude wurde 7.0 kN gewählt, die auch für die ersten 200.000 LW beibehalten wurde. Danach erfolgte die Blocklastsimulation zur Ermittlung der Betriebsfestigkeit, wobei jeweils für die nächsten 200.000 LW eine Reduzierung auf 75% und auf 50% vorgenommen wurde (s. Abb. 12). Für die Änderung des Amplitudenwertes wurden zwischen 10.000 und 30.000 LW benötigt. Es wird damit gerechnet, dass diese Übergangsphase künftig durch eine automatische anstelle der manuellen Sollwertänderung und einen PID anstelle des PI Reglers auf 1000 bis 2000 LW verkürzt werden kann, sodass klar abgegrenzte Blocklastbereiche vorliegen. Anschließend wurde wieder der 100%-Wert der Zugkraftamplitude angesteuert. Sowohl die Prüffrequenz als auch die Vorspannkraft

blieben dabei annähernd konstant. Zum Schluss wurde eine Überlast simuliert, bei welcher die Zugkraftamplitude auf 125% (8.75 kN) gesteigert wurde. Bereits beim Ansteuern dieser höheren Amplitude fiel die Vorspannkraft kontinuierlich ab, was auf einen fortschreitenden Steifigkeitsverlust hindeutete. Auch bei der Prüffrequenz ergab sich ein geringfügiger Abfall, der aber weniger als Indikator für den Steifigkeitsverlust geeignet ist. Der Schwingversuch stoppte automatisch als das Abbruchkriterium für die Vorspannkraft von 7.5 kN bei 1.136.000 LW erreicht wurde. Zu diesem Zeitpunkt war die Vorspannkraft bereits deutlich unterhalb der Zugkraftamplitude, womit am Versuchsende ein negatives Spannungsverhältnis von $R = -0.08$ vorlag. Somit konnte als weiteres Ergebnis bei der Simulation einer Überlast gezeigt werden, dass diese neuartige Resonanzprüfvorrichtung auch für Schwingversuche mit Wechselbeanspruchungen geeignet ist.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Für Schweißverbindungen, die dynamisch beansprucht werden, ist die Ermüdungsfestigkeit des Grundwerkstoffs und der Schweißnaht von großer Bedeutung. Experimentelle Untersuchungen zur Ermüdungsfestigkeit von Schweißverbindungen dienen der Absicherung bzw. Erweiterung der bestehenden Vorschriften und Bemessungsgrundlagen. Mittlerweile werden viele geschweißte Stahlkonstruktionen mit bis zu 10^9 LW und mehr im Bereich des Giga-Cycle-Fatigue (GCF) beansprucht, für den es jedoch nur wenige experimentell abgesicherte Kurvenverläufe gibt. Nicht zuletzt stellt die Versuchszeit eine limitierende Größe für solche Experimente dar.

Um diese Schwierigkeiten zu überwinden, wurde eine neuartige Resonanzprüfvorrichtung mit einer Prüffrequenz von 400 Hz entwickelt. In dieser Vorrichtung wird die Flachzugprobe mit Schweißnaht zwischen den gegenüberliegenden Seiten eines geschlossenen Rahmens vorgespannt. Eine Biegeeigenschwingung des Rahmens belastet die Probe harmonisch. Aus der Einspannung der Probe jeweils im Schwingungsbauch der beiden Rahmenseiten ergibt sich je nach Höhe der Vorspannung eine wechselnde Zug/Druck- oder schwellende Zugbelastung. Das Prinzip eignet sich für hohe Prüffrequenzen, große Probenabmessungen und bei längsgeteilter Ausführung des Resonanzprüfrahmens auch für die Prüfung geschweißter Kreuzstöße und Quersteifen.

Es wurde gezeigt, dass die Vorrichtung bei ca. 400 Hz schwellende wie wechselnde Lasten mit konstanter oder blockweise veränderlicher Amplitude erzeugen kann, die bis in den Zeitfestigkeitsbereich zum Bruch der untersuchten Flachzugproben mit Schweißnaht führten. Die in diesem Bereich gefundenen Bruchlastspielzahlen stimmten mit den normativen Werten gut überein. Auch der Anrissort lag wie bei anderen Versuchen mit einer geringeren Frequenz von 5 Hz am Schweißnahtübergang. Mit Hilfe einer Thermografie-messung wurde schließlich gezeigt, dass eine frequenzabhängige Temperaturerhöhung nur in der Pha-

se des instabilen Risswachstums deutlich wird, und damit kein wesentlicher Einfluss auf die Rissbildung besteht. Die gemessene Temperaturerhöhung betrug max. 5°C.

Im Rahmen der Forschungsaktivitäten des Instituts für Stahlbau der Leibniz Universität Hannover sollen die Ermüdungsfestigkeitskurven für Schweißverbindungen mit dem vorgestellten Prüfverfahren bis in den Bereich des GCF von 10^9 Schwingspielzahlen abgesichert werden. Dafür ist geplant, an bereits vorhandene Versuchsreihen für ausgewählte Schweißdetails anzuknüpfen und mit Ermüdungstests hauptsächlich im Bereich von 10^7 bis 10^9 Lastzyklen zu erweitern. Durch ergänzende Berechnungen mit lokalen Ermüdungskonzepten sollen allgemeingültige Aussagen für den GCF-Bereich bei Schweißverbindungen in bestehende Vorschriften Eingang finden.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die freundliche Unterstützung der Firma MeKo GmbH für die Laserstrahlbearbeitung der geschweißten Flachzugproben. Weiterer Dank gilt dem Institut für Bauphysik der Leibniz Universität Hannover für die Durchführung der Thermografiemessungen.

Literatur

- [1] DIN EN 1993-1-9 Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-9: Ermüdung, 2005 DIN 18800: "Stahlbauten – Bemessung und Konstruktion", Fassung von 1990, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, 1990
- [2] Hobbacher, A.: Recommendations for fatigue design of welded joints and components, IIW-Doc. XIII-2151-07/XV-1254-07, International Institute of Welding, 2007
- [3] Schaumann, P.; Keindorf, C.: Enhancing Fatigue Strength by Ultrasonic Impact Treatment for Welded Joints of Offshore Structures, Third International Conference on Steel and Composite Structures (ICSCS07), pp. 921-926, Manchester, UK, 2007
- [4] Haibach, E.: Betriebsfestigkeit – Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung, 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2006
- [5] Deutsches Patent 102 04 258.6: Prüfvorrichtung zur Dauerschwingprüfung von Prüflingen, Alt, A., 2005