

Neue Technologie zur Prüfung der Ermüdungsbeanspruchung von großen zugbeanspruchten Bauteilen

Bernd Köberl, Sonja Dallinger & Johann Kollegger

Technische Universität Wien, Institut für Tragkonstruktionen – Betonbau

ZUSAMMENFASSUNG: Zyklische Belastungen, auch wenn diese unterhalb der statischen Traglast oder der Fließgrenze des Werkstoffes liegen, rufen Schädigungen im Materialgefüge hervor, die letztendlich zum Ermüdungsversagen des Werkstoffes führen können. Für die Beurteilung des Ermüdungsverhaltens von Schrägkabeln, -seilen oder Spanngliedern für vorgespannte Stahlbetonkonstruktionen werden Dauerschwingversuche herangezogen. Üblicherweise wird die zyklische Belastung bei diesen Versuchen mit Hilfe von servohydraulisch gesteuerten Pressen aufgebracht. Bei einer Oberlast von 2.500 kN reduziert sich die Prüffrequenz bei den bekannten Prüfanstalten in Europa auf maximal 1 Hz. Für die Durchführung dieser Versuche ist ein sehr hoher Zeit- und Energieaufwand erforderlich. Einerseits dauern die üblicherweise erforderlichen 2 Millionen Lastwechsel bei einer Prüffrequenz von 1 Hz rund 23 Tage und andererseits ist für den Betrieb des Hydraulikaggregates ein sehr hoher Energieaufwand nötig. An der Technischen Universität Wien wurde ein neues Verfahren zur Durchführung von Dauerschwingversuchen an zugbeanspruchten Bauteilen wie Schrägkabel oder Spannglieder entwickelt. Die neue Prüfmethode nutzt den Resonanzeffekt aus und ermöglicht damit wesentlich schnellere Prüffrequenzen und gleichzeitig einen wesentlich geringeren Energieeinsatz (Kollegger et al, 2006). Im Labor des Instituts für Tragkonstruktionen wurde, auf dieser Technologie basierend, eine Prüfvorrichtung mit einer maximalen Last von 20.000 kN errichtet.

1. EINLEITUNG

Seit dem Auftreten von plötzlichen Brüchen an Eisenbahnachsen nach einer bestimmten Einsatzdauer in der Mitte des 18. Jahrhunderts ist das Phänomen der Materialermüdung bekannt. Erste Forschungen auf diesem Gebiet gehen auf August Wöhler zurück (Wöhler, 1870). Die von ihm entwickelten Wöhler- oder S-N –kurven sind bis heute gemeinsam mit der Schadensakkumulations-Hypothese von Palmgren und Miner ein wichtiges Instrument in der Bemessung um Ermüdungsbrüche zu vermeiden (Palmgren, 1924). Ein weitere Ansatz zur Bestimmung der Ermüdungsfestigkeit von Werkstoffen sind bruchmechanische Konzepte. Diese Ansätze sind wirklichkeitsnäher jedoch auch mit einem wesentlich größeren Aufwand verbunden (Klesnil und Lukas, 1992, McEvily, 2002).

Nicht immer kann mit den beiden genannten Möglichkeiten zur Bestimmung der Ermüdungsfestigkeit das Auslangen gefunden werden. Für große Bauteile, wie zum Beispiel Schrägkabel oder Spannglieder, wird ein ausreichender Widerstand gegen ein

Ermüdungsversagen experimentell bestimmt. Richtlinien und Normen regeln den jeweiligen Versuchsablauf, in der Regel muss der Prüfkörper 2 Millionen Mal einer vorgegebenen Spannungsamplitude standhalten (fib, 2005, pti, 2001, ETAG 013, 2002). Diese Dauerschwingversuche werden in der Regel mit servo-hydraulisch gesteuerten Prüfvorrichtungen durchgeführt, die erzielbare Prüffrequenz ist jedoch gering, meist im Bereich von einem Lastzyklus pro Sekunde. Ein Dauerschwingversuch mit einer Prüffrequenz von einem Herz dauert demnach 23 Tage. Für den Betrieb des Hydraulikaggregates für diesen Zeitraum ist ein sehr großer Energieaufwand erforderlich. Eine Prüfmethode, welche schnellere Prüfzeiten bei einem gleichzeitig geringern Energieeinsatz erlaubt wäre daher wünschenswert.

An der Technischen Universität Wien wurden ein neues Prüfverfahren und eine Prüfvorrichtung für Dauerschwingversuche entwickelt, welche diese Vorteile vereinen soll. Die neue Prüfvorrichtung ermöglicht je nach Versuchsaufbau Prüffrequenzen zwischen 20 und 40 Herz bei einer Oberlast von 10.000 kN und einer Schwingbreite von 2.500 kN. Statische Zugversuche können bis zu einer Last von 20.000 kN durchgeführt werden.

2. WIRKUNGSWEISE

In der Abbildung 1 ist die Prüfvorrichtung schematisch dargestellt. Der Prüfkörper, z.B. ein Schrägkabel, ein Spannglied oder eine Spanngliedkopplung und das Behelfskabel werden mit Hilfe eines Hohlkolbenzylinders und eines Prüfrahmens auf das Grundkraftniveau vorgespannt. Zwischen dem Prüfkörper und dem Behelfskabel befindet sich eine Kopplungseinheit zur Verankerung des Prüf- und Behelfskabels sowie zur Aufnahme eines Schwingungserregers. Die Prüfvorrichtung kann, vorausgesetzt die Steifigkeit des Prüfrahmens ist ausreichend groß und die notwendige schwingungsisolierende Lagerung wird vernachlässigt, als Einmassenschwinger beschrieben werden. Die erste Eigenfrequenz hängt von der Federsteifigkeit K und von der schwingenden Masse M ab. Die erste Eigenfrequenz kann über die Steifigkeit K , durch Variation des Behelfskabels, und über die Masse M , Variation der Zusatzmassen bei der Verankerungseinheit, eingestellt werden. Wird nun mit Hilfe eines Schwingungserregers das System harmonisch angeregt, so kommt es, wenn die Erregerfrequenz gleich der Eigenfrequenz ist zur Resonanz. Die Erregerkraft wird durch den dynamischen Vergrößerungsfaktor im Resonanzzustand vervielfacht und somit ist nur ein Bruchteil der erforderlichen Schwingbeanspruchung durch den Schwingungserreger zu erzeugen. Die neue Prüfmethode ermöglicht somit höhere Prüffrequenzen (25-50 Hz), und damit wesentlich kürzere Prüfzeiten bei einem gleichzeitig sehr geringen Energieeinsatz.

Die Anordnung der Prüfvorrichtung kann sowohl stehend als auch liegend sein und richtet sich nach den Gegebenheiten der Prüfhalle. Bei einer liegenden Anordnung muss die Schwingungseinheit entsprechend gelagert werden, damit eine Bewegung in Prüfkörperlängsrichtung gegeben ist. Dies kann durch eine entsprechende rollende oder gleitende Lagerung oder durch eine Abhängung realisiert werden.

An einer horizontalen und vertikalen Versuchseinrichtung wurden im Sommer 2005 Vorversuche durchgeführt, um die praktische Anwendungsmöglichkeit der Erfindung zu bestätigen (Maier, 2005). Beide untersuchten Varianten zeigten den gewünschten Effekt und eine sehr gut Übereinstimmung mit dynamischen Vergleichsberechnungen.

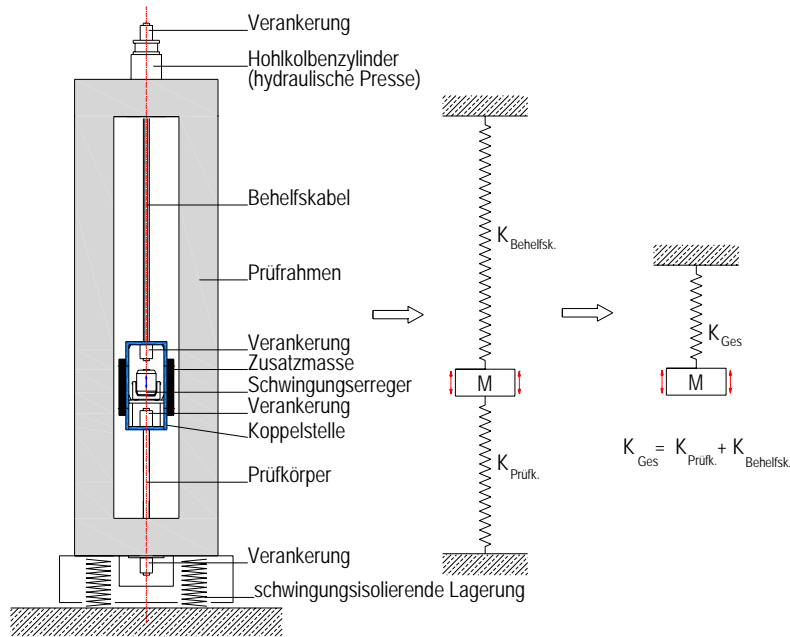


Abbildung 1: Schematische Übersicht der Prüfvorrichtung und Ersatzsystem des Einmassenschwingers

Aufgrund der viel versprechenden Vorversuche und durch Fördermittel aus dem Forschungsprogramm „Uniinfrastruktur III“ sowie der finanziellen Unterstützung der Abteilung Gebäude und Technik (TU Wien) wurde die Errichtung einer großen Prüfvorrichtung für Dauerschwingversuche am Institut für Tragkonstruktionen möglich.

3. BAU DER VERSUCHSEINRICHTUNG BIS 20.000 KN

Aufgrund der örtlichen Gegebenheiten im Labor des Instituts für Tragkonstruktionen wurde eine horizontale Versuchsanordnung gewählt. Ein wesentlicher Bestandteil bei der Planung der Versuchseinrichtung war der auf Druck beanspruchte Prüfrahmen. Die wesentlichen Anforderungen an den Bauteil waren zum einen große Steifigkeit und zum anderen große Masse. Gewählt wurde daher ein trogförmiger Stahlbetonbauteil mit einer Masse von rund 150 Tonnen. Der Prüfrahmen ist 2,8 m breit, 2 m hoch und 16 m lang. Um eine mögliche Rissbildung zu verhindern bzw. zu minimieren wurde der Prüfrahmen mit Spanngliedern mit nachträglichem Verbund in drei Richtungen vorgespannt. Zum Erreichen eines geringen Dämpfungsmaßes ist dies von besonderer Bedeutung.

Der Prüfrahmen wurde zunächst auf einer Rüstung im Erdgeschoß des Labors geschalt, bewehrt und betoniert. Nach dem Erhärten des Betons und dem Vorspannen wurde mit Hilfe von zwei Stahlportalen und vier Litzenhebern der Prüfrahmen in das Kellergeschoß abgesenkt. Abbildung 2 (rechts) zeigt ein Bild während des Absenkvorganges. Die Lagerung des Prüfrahmens erfolgte auf 14 Stahlfedernpaketen, um eine schwingungsisolierende Lagerung des Prüfrahmens zu erreichen. Abbildung 2 (links) zeigt eine Untersicht des Prüfrahmens vor dem Absenken und die verwendeten Auflager.



Abbildung 2: Untersicht des Prüfrahmens und Federelemente als Auflager für eine schwingungsisolierende Lagerung (rechts); Prüfrahmen während des Absenkens (links).

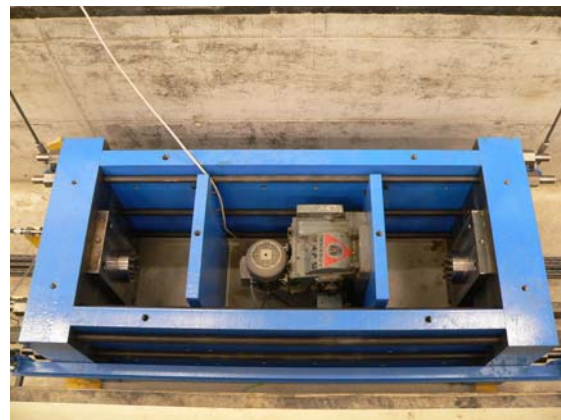
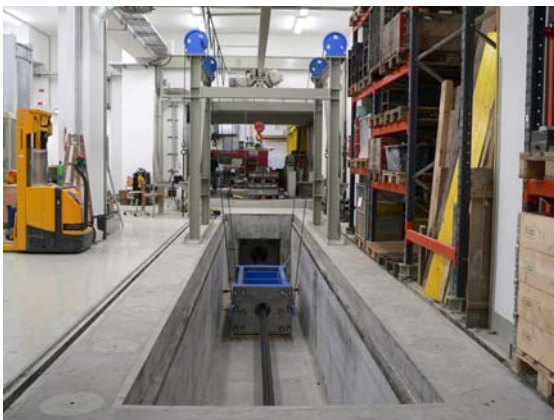


Abbildung 3: Ansicht der fertig gestellten Prüfvorrichtung mit Portalrahmen und Kopplungseinheit (links); Blick von oben auf die Kopplungseinheit mit mechanischem Unwuchterreger (rechts).

Die Kopplungseinheit und deren Lagerung stellten einen weiteren wichtigen Punkt bei der Planung der Versuchseinrichtung dar. Zunächst wurde eine Kopplungseinheit mit einer maximalen Oberlast für Dauerschwingversuche von 4.500 kN errichtet. Im Herbst 2007 wird eine weitere und größere Kopplungseinheit bis 10.000 kN zur Verfügung stehen. Die Lagerung bzw. die Bewegungsmöglichkeit in Längsrichtung des Prüfkörpers wird durch eine Aufhängung über Stahlseile an einem auf dem Prüfrahmen aufgestellten Portalrahmen erreicht. In Abbildung 3 sind die Kopplungseinheit mit Unwuchterreger und deren Aufhängung am Portalrahmen dargestellt.

Die schwingende Beanspruchung wird durch einen mechanisch betriebenen Unwuchterreger aufgebracht. Durch zwei gegenläufig rotierende Unwuchtmassen wird eine sinusförmige Kraft in Längsrichtung auf den Prüfkörper aufgebracht. Der derzeit verwendete Unwuchterreger wurde von der Fa. „arsenal research“ zur Verfügung gestellt.

4. DYNAMISCHE BERECHNUNGEN

Um negative Einflüsse auf die umgebenden Gebäude und das Prüflabor zu vermeiden wurde, wie bereits in Punkt 3 erwähnt, die Prüfmaschine auf Federelementen gelagert. Dazu wurden Federelemente mit einer Steifigkeit in horizontaler Richtung von $14 \times 1,87 \text{ kN/mm}$ und $14 \times 2,67 \text{ kN/mm}$ in vertikaler Richtung verwendet. In der Abbildung 4 ist ein Finite Element Model der Prüfvorrichtung und das vereinfachte Ersatzmodell eines Zweimassenschwingers dargestellt. Die Steifigkeit k_1 entspricht dabei der horizontalen Steifigkeit der Federelemente von $14 \times 1,87 \text{ kN/mm}$ und die Steifigkeit k_2 der Summe der Dehnsteifigkeit von Prüf- und Behelfskabel. Für einen fiktiven Versuch an einem Spannglied bestehend aus 55 Litzen zu 150 mm^2 ergibt die Finite Element Berechnung, mit einer Dehnsteifigkeit $k_2=459 \text{ kN/mm}$, Eigenfrequenzen von $f_1=2,06 \text{ Hz}$ und $f_2=35,9 \text{ Hz}$. Die Ergebnisse des Zweimassenschwingermodells liefern annähernd dieselben Resultate, $f_1=1,95 \text{ Hz}$ und $f_2=35,3 \text{ Hz}$.

Es ist bekannt, dass für das funktionieren einer schwingungsisolierenden Lagerung das Abstimmungsverhältnis η größer als die Quadratwurzel aus zwei sein muss. Ist das Abstimmungsverhältnis bekannt kann für ein ungedämpftes System der Isolierwirkungsgrad mit Gleichung (2) bestimmt werden.

$$\eta = \frac{f_2}{f_1} > \sqrt{2} \quad (1)$$

$$I = \frac{\eta^2 - 2}{\eta^2 - 1} \quad (2)$$

Werden die oben genannten Werte eingesetzt ergibt sich ein Isolierwirkungsgrad von 0,997, das heißt nur 0,33 % der freien Massenkraft F werden in die Fundamentplatte eingeleitet. Die Finite Elemente Berechnung liefert aufgrund der berücksichtigten Dämpfung einen etwas größeren Wert von 0,36 %. Die durchgeführten Berechnungen haben gezeigt, dass die Prüfmaschine sehr gut mit einem einfachen System eines Zweimassenschwingers beschrieben werden kann. Die Finiten Elemente Berechnungen stimmten sehr gut mit den analytischen Lösungen überein. Weiters hat sich bei der Durchführung der ersten Versuche an Litzenspanngliedern in der Prüfmaschine eine sehr gute Übereinstimmung der berechneten und gemessenen Ergebnisse gezeigt (siehe dazu auch Punkt 5).

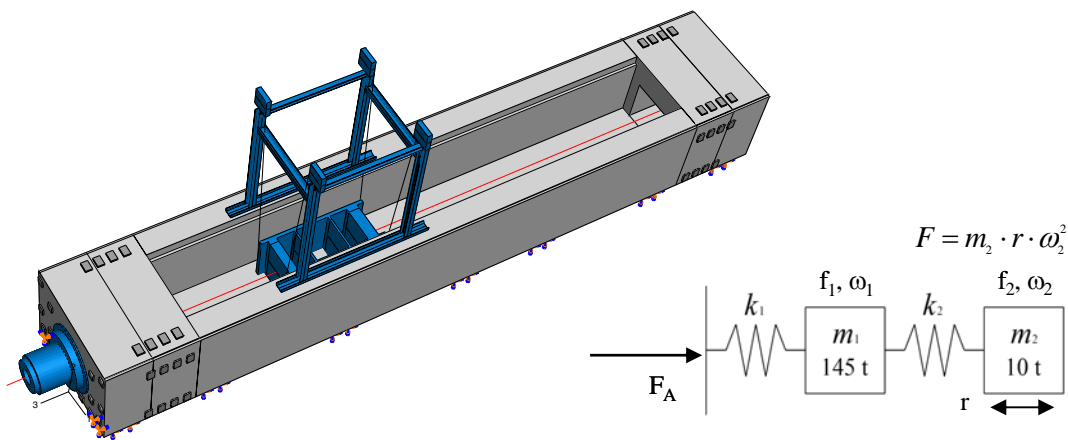


Abbildung 4: Finite Element Model (links); Vereinfachtes Model eines Zweimassenschwingers (rechts).

5. ERMÜDUNGSVERSUCHE AN LITZENSPANNGLIEDERN

Nach der Fertigstellung der Versuchseinrichtung wurden die ersten Pilotversuchen an Litzenspanngliedern im Labor des Instituts für Tragkonstruktionen durchgeführt. Als Prüfkörper wurde ein 9-litziges Spannkabel mit einer Länge von 5,80 m und als Behelfkabel ein Spannglied mit 12 Litzen mit einer Länge von 10,80 m verwendet. Die Litzen, Spannstahlgüte ST150/1770, wurden von der Fa. „voestalpine Austria Draht“ zur Verfügung gestellt. Die Verankerungen und der Einbau der Spannkabel in die Prüfmaschine wurden von der Fa. „VT – Vorspanntechnik“ bereitgestellt und durchgeführt.

Die Ermüdungsversuche erfolgten entsprechend der europäischen Prüfvorschrift ETAG – 013 (Post tensioning kits for prestressing of structures). Das bedeutet, dass das zu prüfende Spannglied einer Schwingbreite von 80 N/mm² bei einer Oberlast von 65 % der Nennzugfestigkeit mindestens 2 Millionen Mal Stand halten muss. Dabei darf kein Bruch im Verankerungsbereich auftreten, auf freier Länge des Spanngliedes dürfen nicht mehr als 5 % der Querschnittsfläche versagen.

5.1 VERGLEICHSBERECHNUNGEN

Der eingebaute Versuch wurde mit dem in Punkt 4 bereits dargestellten Finite Elemente Modell simuliert, Abbildung 5 zeigt die Verschiebung der Kopplungseinheit während der harmonischen Anregung in der entsprechenden Eigenfrequenz. In Abbildung 6 (links) ist ein Diagramm der ersten beiden Sekunden des Einschwingvorganges der Prüfvorrichtung unter harmonischer Anregung in der ersten Eigenfrequenz dargestellt. Die berechnete Eigenfrequenz beträgt 20,1 Hz, in den Versuchen wurde eine geringfügig höhere Prüffrequenz von 20,5 Hz festgestellt. In Abbildung 6 (rechts) ist die einhüllende des Einschwingvorganges für 180 sec dargestellt. Ein Vergleich mit gemessenen Verschiebungen beim Einschwingen der Anlage zeigt, abgesehen von der etwas anderen Anfangssteigung eine sehr gute Übereinstimmung. Nach rund 100 sec ist eine konstante Amplitude erreicht (steady state response).

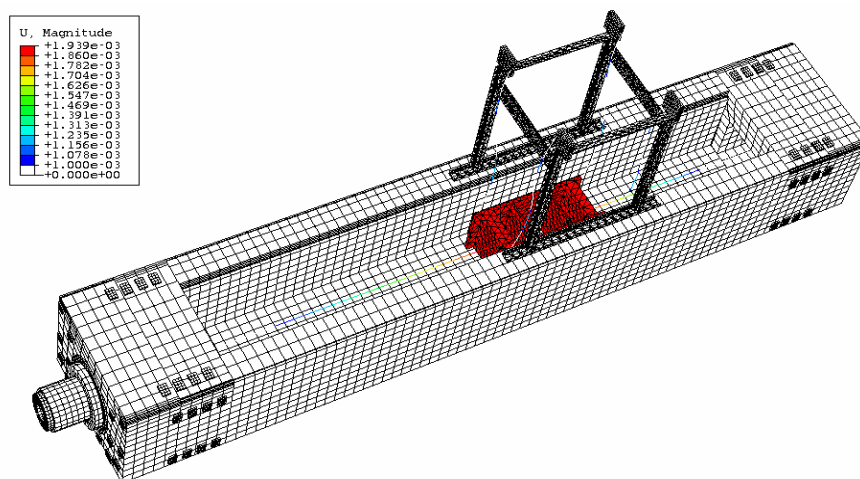


Abbildung 5: Berechnete Verschiebung während der harmonischen Anregung in der entsprechenden Eigenfrequenz (20,1 Hz) des Versuchsaufbaues.

Die Dämpfungswerte für die unterschiedlichen Materialien wurden dabei so gewählt, dass der Dynamische Vergrößerungsfaktor der Berechnung mit dem im Versuch bestimmten Vergrößerungsfaktor übereinstimmt. In der Literatur finden sich Dämpfungsbeiwerte für verschiedene Materialien und Konstruktionsarten (Flesch, 1993), es zeigte sich, dass diese angegebenen Werte für die errichtete Versuchseinrichtung zu groß sind. Die angegebenen Dämpfungszahlen sind für reale Bauwerke abgeleitet worden und entsprechen damit nicht den Verhältnissen der Prüfvorrichtung.

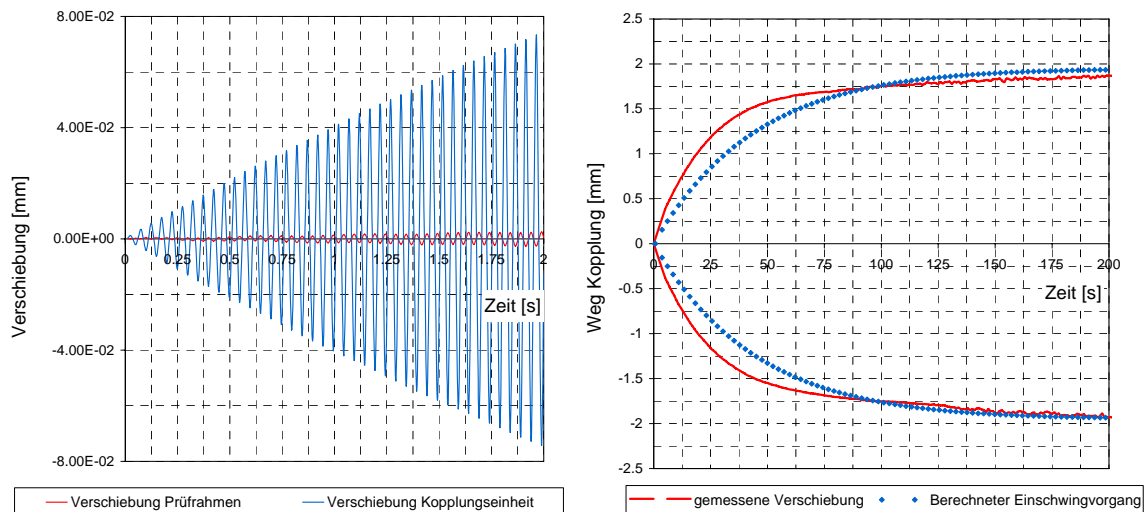


Abbildung 6: Verschiebung der Kopplungseinheit und Verschiebung des Prüfrahmens während des Einschwingvorganges in den ersten zwei Sekunden (links); Gemessene Verschiebung der Kopplungseinheit während des Einschwingvorganges vs. berechnete Verschiebung während des Einschwingvorganges in den ersten 200 Sekunden (rechts)

5.2 VERSUCHSERGEBNISSE

In Abbildung 7 sind die während eines Ermüdungsversuches gemessene Beschleunigung, die Verschiebung der Kopplungseinheit und die gemessene Kraft im Prüfkabel gegenübergestellt. Die Abbildung zeigt die gemessene Kraft, die aus der gemessenen Beschleunigung zurück gerechnete Kraft und die aus den gemessenen Verschiebungen zurück gerechnete Kraft im Prüfkörper für einen Zeitausschnitt von einer halben Sekunde. Dieser Plot zeigt eine sehr gute Übereinstimmung der maßgebenden Messgrößen. Für den dargestellten Zeitraum von einer halben Sekunde ergeben sich rund 10 Lastwechsel für den Prüfkörper. Die Prüffrequenz von 20,5 Hz bestimmt sich, wie einleitend beschrieben aus den Masse- und Steifigkeitsverhältnissen des Versuchsaufbaues.

In der Abbildung 8 sind für einen Dauerlauf von 31 Stunden wiederum die gemessene Kraft, die rück gerechnete Kraft aus der gemessenen Beschleunigung und die rück gerechnete Kraft aus den gemessenen Wegen dargestellt. Der Dauerlauf wurde in zwei Versuchstagen aufgezeichnet, der erste Versuchstag entsprach 830.000 Lastwechseln und der zweite Versuchstag 1.600.000 Lastzyklen. Dies erklärt auch den Abfall der Kraft bei 830.000 Lastwechseln und regelungstechnisch bedingte kleine Schwankungen beim der Wiederinbetriebnahme des Dauerschwingversuches. Eine

konstante Kraftamplitude kann jedoch nach wenigen Lastzyklen wieder erreicht werden.

Der Prüfkörper hat mit rund 2,3 Millionen Lastwechseln mehr als die nach ETAG-013 geforderten 2 Millionen Lastwechseln standgehalten. Der untersuchte Prüfkörper kann damit als „Durchläufer“ bezeichnet werden.

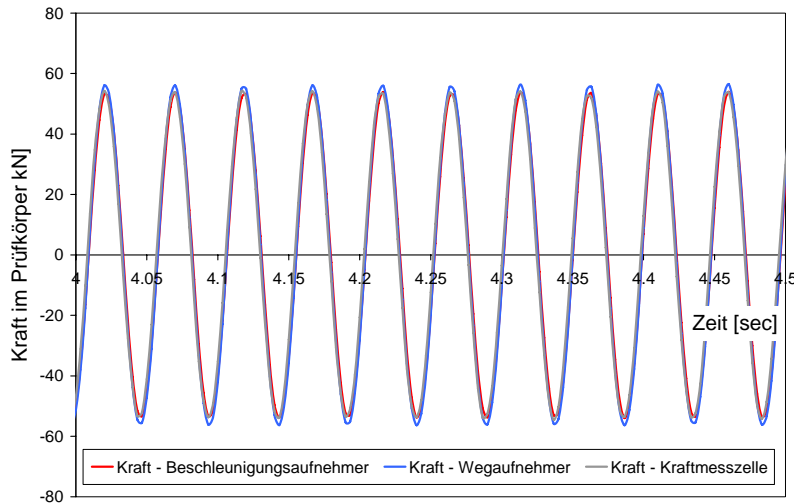


Abbildung 7: Gegenüberstellung der gemessenen Kraft im Prüfkörper während eines Dauerschwingversuches - Detailausschnitt

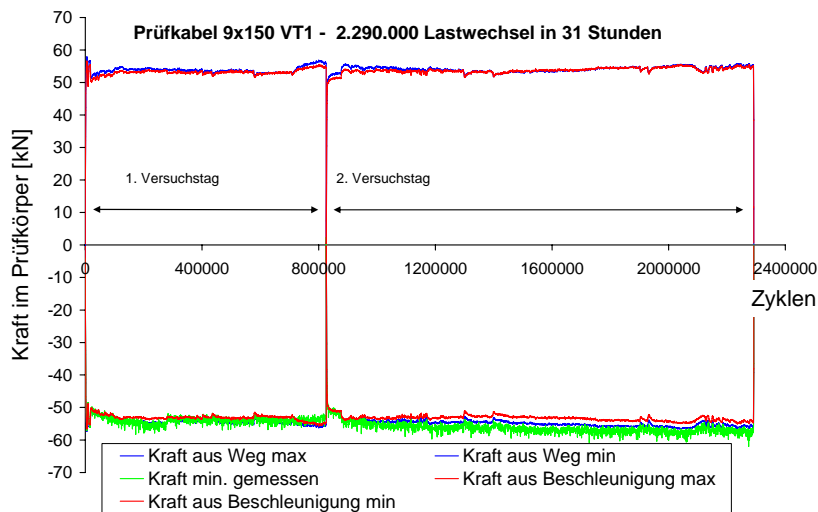


Abbildung 8 Gegenüberstellung der gemessenen Kraft im Prüfkörper während eines Dauerschwingversuches - Dauerlauf

6. AUSBLICK

Die neu am Institut für Tragkonstruktionen der Technischen Universität Wien errichtete hochfrequente Prüfvorrichtung für Dauerschwingversuche ermöglicht erstmals eine erhebliche Steigerung der Prüffrequenz bei Ermüdungsversuchen an zugbeanspruchten Bauteilen, wie zum Beispiel Schrägkabel. Die Prüffrequenz kann dabei mindestens um

den Faktor 20 gesteigert werden. Durch das Wegfallen des Betriebs eines Hydraulikaggregates während des Versuches kann zusätzlich eine große Menge an Energie gespart werden. Die Kosten für Auftraggeber und Auftragnehmer können damit drastisch gesenkt werden.

Der derzeitige Ausbau der Dauerschwinganlage ermöglicht Oberlasten bei Ermüdungstests von 4.500 kN. Derzeit wird der Ausbau auf eine Oberlast von 10.000 kN vorbereitet und dieser wird ab Herbst 2007 zur Verfügung stehen. Damit können Ermüdungsversuche und statische Bruchversuche an Schrägkabeln mit bis zu 73 Litzen durchgeführt werden.

7. DANK

Wir möchten uns für die großzügige Unterstützung der Abteilung Gebäude und Technik der Technischen Universität Wien beim Bau der Dauerschwinganlage sehr herzlich bedanken. Der Firma „VT-Vorspanntechnik“ in Salzburg danken wir uns sehr herzlich für das Bereitstellen und für den Einbau der Versuchskörper. Bei der Firma „voestalpine Austria Draht“ bedanken wir uns sehr herzlich für das Bereitstellen des Spannstahls für die Prüfkörper. Bei „arsenal research“ bedanken wir uns sehr herzlich für das Bereitstellen des Unwuchterregers.

SCHRIFTENVERZEICHNIS

- ETAG 013, 2002. Post tensioning kits for prestressing of structures. EOTA.
- Fédération Internationale du Béton (fib), 2005. Acceptance of stay cable systems using prestressing steels. fib 1st edition.
- Flesch, R., 1993. Baudynamik praxisgerecht. Bauverlag GmbH: 1. Auflage, Wiesbaden und Berlin.
- Kollegger, J., Köberl, B., Pardatscher, H., Vill, M., 2006. Verfahren zur Durchführung von Dauerschwingversuchen an einem Prüfkörper sowie eine Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens. Austrian Patent AT 501 168 B1.
- Klesnil, M. Lukaš; P., 1992. Fatigue of Metallic Materials. ELSEVIER: New York.
- Maier, Ch., 2005. Entwicklung einer Prüfvorrichtung für Dauerschwingversuche mit einer Oberlast bis zu 20.000kN. Master Thesis – Vienna University of Technology; Vienna.
- McEvily A. J., 2002. Metal Failures – Mechanisms, Analysis, Prevention. John Wiley & Sons, Inc.: New York 2002
- Palmgren, A., 1924. Die Lebensdauer von Kugellagern. Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure, 58, S. 339-341.
- Post Tensioning Institute (pti) Publication, 2001. Recommendations for Stay Cable Design, Testing and Installation. pti 4th edition.
- Wöhler, A., 1870. Über die Festigkeitsversuche mit Eisen und Stahl. Zeitschrift für Bauwesen, 20, S. 73-106.