

Anwendung eines Baustellenmessgeräts zur Bestimmung der Spannung in Bewehrungsstählen

Harald GUNDELWEIN¹

¹ enertec engineering ag, Winterthur, Schweiz
gundelwein@enertec.ch

Kurzfassung. Die Kenntnis der in einem bestehenden Stahlbeton- oder Spannbetonbauwerk herrschenden Spannung in den Bewehrungsstählen ist ein wichtiger Parameter für die Tragwerksbeurteilung. Bei der rechnerischen Ermittlung der Spannung in der Bewehrung müssen viele Annahmen zu Bauteilabmessungen, Steifigkeiten und Lasten getroffen werden, die das Ergebnis stark beeinflussen. Eine messtechnische Ermittlung der Stahlspannung infolge ständigen Lasten mit zerstörungsfreien Prüfmethoden wäre deshalb sehr hilfreich. Die enertec engineering ag in Winterthur hat ein solches Messgerät zur Anwendungsreife entwickelt. Das auf der Messung von mikromagnetischen Eigenschaften beruhende Verfahren wird beschrieben, die praktische Anwendung wird erläutert und der Nutzen an Hand von zwei durchgeführten Messkampagnen aufgezeigt.

1. Einführung und Zielsetzung

Die Notwendigkeit zur Überwachung und Beurteilung der Tragsicherheit und des Ermüdungsverhaltens von Bauwerken nimmt mit deren Alter und den damit verbundenen Instandhaltungs- und Unterhaltsmaßnahmen, aber auch durch Änderungen der Nutzungsanforderungen und Erweiterungen stetig zu. Der überwiegende Teil bestehender Infrastrukturbauten weltweit wurde in Stahlbeton- oder Spannbetonbauweise errichtet. Auch im Hochbau macht diese Bauweise einen erheblichen Anteil aus.

Bisher konnten die Spannungen infolge ständigen Lasten in bestehenden Stahlbetonbauwerken nur unter Annahme vieler Randbedingungen berechnet und nicht gemessen werden. Die tatsächlich auftretenden Spannungen sind aber von großem Interesse für die genauere Zustands- und Schadenserfassung.

Die enertec engineering ag aus Winterthur, Schweiz hat in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP) in Saarbrücken und der Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften (ZHAW) in Winterthur ein Messgerät (MME) entwickelt, mit dem sich erstmals die vorhandenen absoluten Spannungen in Bewehrungsstählen bestimmen lassen. Aus dem Einsatz des MME-Gerätes zur Zustandserfassung lassen sich neue Erkenntnisse gewinnen und erhebliche Einsparungen bei der Bauwerksinstandsetzung erzielen. Dies wird an zwei ausgeführten Beispielen gezeigt.

Mit einer zerstörungsfreien Messung der effektiven Längsspannung in bestehenden Stahlbetonbauwerken ergeben sich neue Möglichkeiten im Bereich des Bauwerksmonitorings und der Bauwerksüberprüfung. Darauf basierend können finanzielle Mittel für Instandhaltungs- und Verstärkungsmaßnahmen effektiver und wirtschaftlicher eingesetzt



werden. Die mit dem MME mögliche Messung der real vorhandenen Spannung in den Bewehrungsstäben der Stahlbetonbauwerke führt einerseits zur Verringerung der Instandsetzungskosten und andererseits zur Erhöhung der Sicherheit und Nachhaltigkeit.

2. Zerstörungsfreie Bestimmung der mechanischen Spannung mit mikromagnetischen Verfahren

2.1 Werkstoff, Herstellung und Besonderheiten von Bewehrungsstahl

Heute hergestellte Betonstähle entsprechen der Werkstoffnummer 1.0439 für Betonstahl und 1.0466 für Betonmattenstahl. Diese Stähle liegen typischerweise mit einem ferritisch-perlitischen Gefüge vor. Je nach thermomechanischer Behandlung kann neben dem ferritisch-perlitischen Kern der Außenbereich der Bewehrungsstähle martensitisch sein. Aus werkstofftechnischer Sicht lässt sich die Herstellung von Betonstählen in vier Kategorien einteilen

- Warmgewalzte Betonstähle: Die warmgewalzten Betonstähle werden nach dem Walzen langsam an der Luft abgekühlt. Es liegt daher ein ferritisch-perlitisches Gefüge vor. Die mechanischen Festigkeiten werden durch Legieren eingestellt. Um zusätzlich eine gute Schweißbarkeit zu erhalten, können warmgewalzte Betonstähle durch Zugabe von Niob und/oder Vanadium mikrolegiert werden.
- Thermomechanisch behandelte Betonstähle: Die Festigkeit wird durch eine Kombination aus Härten und Anlassen eingestellt. Nach dem Abschrecken der Oberfläche wird die aus dem Kern des Betonstahls abgegebene Wärme genutzt, um den Martensit an der Oberfläche anzulassen (Handelsnamen „Tempcore“, „Thermex“, Bezeichnungen: „aus der Walzhitze vergütet“).
- Kaltverfestigte Betonstähle: Diese Betonstähle erhalten ihre Festigkeit durch Recken oder Tordieren bei Umgebungstemperatur (Bezeichnung: „kaltverformtes Ringmaterial“).
- Naturharte Betonstähle: Die mechanischen Festigkeiten werden durch Legieren eingestellt. Nach dem Walzen erfolgt keine weitere Behandlung.

Die Einbeziehung von Stählen eines langen Herstellungszeitraumes mit unterschiedlichen Mikrostrukturen und Eigenspannungszustände stellte eine wesentliche Herausforderung dar.

2.2 Technische Grundlagen des Messverfahrens

Zur Bestimmung der Längsspannung in Bewehrungsstählen kommen aus heutiger Sicht zwei Verfahren prinzipiell in Frage, zum einen das Ultraschallverfahren und zum anderen das mikromagnetische Verfahren. Beide Verfahren werden in [1] genauer beschrieben und einander gegenübergestellt.

Die mechanischen und magnetischen Eigenschaften eines ferromagnetischen Eisenwerkstoffs bei einer bestimmten Temperatur und Belastung werden durch seine Mikrostruktur festgelegt, welche sich als Resultat der chemischen Zusammensetzung, sowie der thermischen und mechanischen Vorbehandlung herausgebildet hat. Empirisch wurden Wechselbeziehungen zwischen magnetischen Eigenschaften und mechanischen Materialspannung gefunden, welche auch als magnetoelastischer Effekt bekannt sind: Änderungen der Zugbelastung führen zu Änderungen der elektrischen Leitfähigkeit und der magnetischen Permeabilität des Materials. Darüber hinaus sind mikromagnetische Effekte bekannt (Barkhausen-Rauschen, Änderungen der Überlagerungs-Permeabilität), deren Ausprägung sowohl von der Mikrostruktur des Materials als auch vom jeweiligen Belastungszustand abhängt [2, 3].

Der Zusammenhang zwischen messbaren mikromagnetischen Effekten, Mikrostruktur und Materialspannung konnte bislang aufgrund seiner Komplexität nicht allgemeingültig beschrieben werden [4]. Um von magnetischen Messgrößen auf die Zielgröße der

Materialspannung schließen zu können, ist daher prinzipiell eine Kalibrierung an Referenzproben des untersuchten Materials durchzuführen, in welche mehrere Kenngrößen mit komplementärem Informationsgehalt einbezogen werden. Dabei wird vorausgesetzt, dass sich die für die Zielgröße relevanten Veränderungen der Mikrostruktur in den Mess- respektive Kenngrößen abbilden.

Das realisierte Messgerät ermöglicht die Aufnahme verschiedener makro- und mikromagnetischer Kenngrößen über vier verschiedene Auswerteverfahren, welche in ihrer Kombination als 3MA-Prüftechnik bezeichnet werden [5]. Sie beinhalten

- Oberwellenanalyse des Zeitsignals der magnetischen Tangentialfeldstärke (OA),
- Analyse des Barkhausen-Rauschen-Signals (BR),
- Analyse des Überlagerungspermeabilität-Signals (ÜP) und
- Analyse des Mehrfrequenz-Wirbelstrom-Signals (WS).

Bis auf den Mehrfrequenz-Wirbelstrom basieren alle Verfahren der 3MA-Prüftechnik auf dem zyklischen Ummagnetisieren des Werkstoffs mit Hilfe eines starken Wechsellmagnetfeldes, dessen Amplitude die Koerzitivfeldstärke des Werkstoffs deutlich übersteigt. Das Wechsellmagnetfeld wird mit einem Elektromagneten erzeugt, der an zwei Punkten auf die Oberfläche des Stahls aufgesetzt wird.

2.3 Randbedingungen

2.3.1 Vorbemerkungen

Die beim praktischen Einsatz des MME-Gerätes auftretenden Randbedingungen wurden gründlich untersucht. Auf Grund der Untersuchungsergebnisse wurden die bei der Kalibration und dem Messen auf der Baustelle einzuhaltenden Randbedingungen definiert. Im Folgenden werden die äußeren Einflüsse und die getroffenen Maßnahmen beschrieben.

2.3.2 Umgebungsbedingungen

Der Einfluss der Temperatur der Stahlproben sowie des Messgerätes auf die mikromagnetischen Signale wurde untersucht. Bei einer Temperatur des Betonstahls und des Messgerätes zwischen 5°C und 25 °C treten keine messbaren Einflüsse auf. Versuche an Betonprüfballen zeigten, dass sowohl der umgebende Beton sowie seine Feuchte keinen messbaren Einfluss haben. Auch elektromagnetische Felder üblicher Größe haben keinen Einfluss.

2.3.3 Prüfkopf

Es wurde ein Prüfkopf mit ebenen Polschuhen und ebenem Sensorkopf entwickelt. Vorversuche haben gezeigt, dass dieses Design gegenüber V-förmigen Polschuhen ein stabileres und reproduzierbareres Magnetfeld erzeugt. Aus diesem Grund muss auf dem Betonstahl eine 6 mm breite und 150 mm lange ebene Koppelfläche erzeugt werden. Durch die Festlegung einer 6 mm breiten Koppelfläche für alle Durchmesser ergibt sich je nach Durchmesser des Betonstahles eine unterschiedliche Abtragstiefe. Für die Anwendung auf der Baustelle wurde eine portable Fräseinrichtung mit einem Hartmetallfräser entwickelt. Nach dem Herstellen der Koppelfläche ist die Nettoquerschnittsfläche maximal 5% geringer als die Querschnittsfläche ohne Rippen. Für die Oberflächengüte ist ein fixer Rauigkeitskennwert festgelegt.

Der Prüfkopf muss während der Messung gerade und ohne Spaltänderung auf dem Bewehrungsstahl fixiert werden. Um dies zu gewährleisten wird eine Zentriereinrichtung und Fixierung eingesetzt, wie in Abbildung 1 dargestellt. In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ist das gesamte verfügbare Messsystem dargestellt.

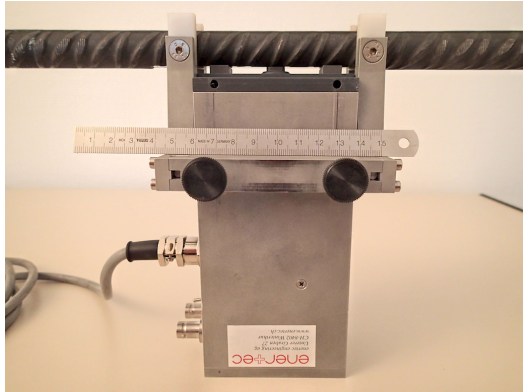


Abbildung 1 Prüfkopf mit Zentriereinrichtung

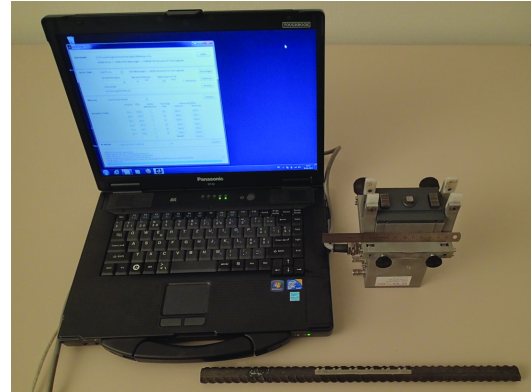


Abbildung 2 MME System bestehend aus Prüfkopf und Baustellenlaptop

2.3.4 Einfluss des Materials der Betonstäbe

Bei der Anwendung des MME-Verfahrens auf Bewehrungsstähle wird vorausgesetzt, dass die Bewehrungsstähle weder korrodiert sind noch Risse enthalten, damit Fehlinterpretationen der mikromagnetischen Signalkurven vermieden werden. Dies kann durch Anschleifen des Stahls vor dem Aufsetzen des Prüfkopfes sowie durch optische Kontrolle an der Messstelle sichergestellt werden.

Wie oben beschrieben, gibt es für die Herstellung und Vergütung von Betonstahl verschiedene Prozesse. Zudem ist die chemische Zusammensetzung von Betonstahl nicht so genau festgelegt wie bei höher legierten Stählen. Bei der Entwicklung des Messgerätes wurden über 120 Proben in einer Prüfmaschine auf Zug und Druck kalibriert. Es wurden Proben aller beschriebenen Herstellungsverfahren aus Europa von den 1930er Jahren bis 2012 untersucht. Die naturharten Bewehrungsstähle zeigten sich im Hinblick auf die mikromagnetischen Eigenschaften am reproduzierbarsten und am genauesten zu messen. Die thermomechanisch behandelten Tempcorestähle mit ihrer ausgebildeten Martensitschicht zeigten sich in dieser Hinsicht am schwierigsten. Die große Anzahl von chemischen Zusammensetzungen und Mikrostrukturen sowie ihre Kombinationen macht eine Klassifikation der Betonstäbe für eine mikromagnetische Analyse von Hand unmöglich. Deswegen wurde am Institut für Datenanalyse und Prozessdesign (IDP) der ZHAW ein nichtlineare Regressionsverfahren (Regressionsbäume) eingesetzt, mit welchem die Kalibration auf die gewünschte Zielgröße (mechanische Spannung) auch mit einer sehr großen Anzahl von Parametern und unter Berücksichtigung stark nichtlinearer Zusammenhänge möglich ist.

2.3.5 Auswertung der mikromagnetischen Kennwerte

Aus den in 2.2 beschriebenen 4 Auswerteverfahren werden von der von uns entwickelten Software 76 mikromagnetische Parameter extrahiert und 40 Parameter für die Spannungsberechnung verwendet. Die verwendeten Parameter teilen sich folgendermaßen auf die Auswerteverfahren auf:

- Oberwellenanalyse OA: 21 Parameter
- Barkhausenrauschen BR: 13 Parameter
- Überlagerungspermeabilität ÜP: 2 Parameter
- Wirbelstrom WS: 4 Parameter

Es ist ersichtlich, dass die Oberwellenanalyse und das Barkhausenrauschen die meisten spannungsabhängigen Parameter beisteuern. Es ist zu beachten, dass nicht alle Parameter spannungsabhängig sein müssen. Ein Teil der Parameter dient auch zur internen Klassifi-

zierung der Proben. Zusätzlich zu den mikromagnetischen Parametern werden aus den 6 zu einer Messung gehörenden Einzelmessungen (Trials) Qualitätskriterien berechnet, die garantieren, dass die mikromagnetischen Eigenschaften (Eigenspannungen) oder die Messqualität (Verwackeln während der Messung) für eine Berechnung der Spannung ausreichend gut sind.

Die Kalibrationsdaten wurden auf Universalprüfmaschinen ermittelt. Dazu wurden die Bewehrungsstahlproben eingespannt und mit verschiedenen Spannungen belastet. Gleichzeitig wurden die mikromagnetischen Parameter aufgezeichnet. Mit den während der Kalibration der 120 Proben an einer Universalprüfmaschine gesammelten Messdaten wurde ein nichtlineares Regressionsmodell (Regressionsbaum) trainiert, wobei die Zielgröße mechanische Spannung, welche an der Prüfmaschine im Zug- und Druckbereich eingestellt wurde, als Vorgabe dient. Der Regressionsbaum kann mit jeder weiteren Kalibrationsmessung (Messung bei der die Zielgröße mechanische Spannung bekannt ist) dazu lernen und die Messgenauigkeit weiter verbessern.

2.4 Validierung

Die Validierung des fertigen Messsystems wurde an Stahlbetonbalken, Deckenplatten und Fahrbahnplatten von Brücken durchgeführt. Dazu wurden die Bewehrungsstähle freigelegt, die Koppelfläche erstellt und mit dem MME-Gerät gemessen. Auf die Koppelfläche wurden anschließend Dehnmessstreifen appliziert. Die Bewehrungsstäbe wurden mit einem durchgetrennt und die Dehnung des freigeschnittenen Stahles gemessen. Aus dieser Dehnung wurde die Spannung berechnet und mit der Spannung aus dem MME-Verfahren verglichen.

2.5 Erzielbare Genauigkeit

Auf Basis der aktuell vorhandenen Kalibrationsdaten kann die Spannung in Bewehrungsstäben für unbekannte, aber den gesetzten Randbedingungen entsprechende Bewehrungsstähle auf +/- 100 MPa genau ermittelt werden. Die Spannung für Bewehrungsstähle deren Typ, Hersteller, Durchmesser und Alter schon in der Kalibrationsdatenbank enthalten sind, kann auf +/- 50 MPa genau gemessen werden. Diese Streuung erscheint auf den ersten Blick relativ groß. Es ist aber zu bedenken, welches breites Spektrum an Stahllegierungen, Herstellungsverfahren und Vorbehandlung der Messobjekte abgedeckt werden muss. Mit zunehmendem Einsatz des MME-Gerätes und dem Sammeln zusätzlicher Kalibrationsdaten wird sich die Messgenauigkeit in Zukunft weiter verbessern.

Die Ergebnisse der stabweisen Kreuzvalidierung des gesamten Datensatzes sind in Tabelle 1 angegeben. Dabei wird ein Stab genommen, das Regressionsmodell ohne den zu validierenden Stab erstellt und der Messwert des MME mit dem Istwert der Prüfmaschine verglichen. Der zu validierende Bewehrungsstab ist also für das Regressionsmodell unbekannt.

Tabelle 1. Statistische Kennwerte der stabweisen Kreuzvalidierung

Anteil der absoluten Prognoseabweichung ≤ 50 MPa	79.4%
Anteil der absoluten Prognoseabweichung ≤ 100 MPa	98.4%
Median der absoluten Prognoseabweichungen	23.8 MPa
Erwartetes Prognoseintervall	
2.5% - Quantil	-83.3 MPa
97.5% - Quantil	+74.4 MPa

Es existiert derzeit kein anderes zerstörungsfreies Verfahren mit dem das MME-Gerät validiert werden kann. Als zerstörendes Verfahren bietet sich das Aufkleben von

Dehnmessstreifen auf den freigelegten Stab an, welcher dann durchtrennt und die Dehnungsdifferenz gemessen wird. Die Genauigkeit dieses Verfahrens ist hauptsächlich abhängig von der Qualität der Klebung der DMS. Die Dehnmessstreifen haben eine sehr hohe Genauigkeit von besser als 1 %. Die Umrechnung der gemessenen Dehnung in mechanische Spannung ist nur so genau wie der Elastizitätsmodul des spezifischen Exemplars bekannt ist.

2.6 Einschränkungen

Das jetzt vorhandene Messsystem ist in der Lage Bewehrungsstähle der Durchmesser 10 bis 20 mm zu untersuchen. Für größere Durchmesser müsste ein zusätzliches Gerät mit einer stärkeren Magnetisierungsleistung gebaut werden. Die Kalibrationsdatenbasis umfasst europäische Bewehrungsstähle aus den 60er Jahren bis 2012. Nichtmagnetische Stähle sind nicht messbar. Vorspannlitzen können wegen ihrer verdrehten Struktur nicht gemessen werden. Vorspanndrähte müssten gesondert untersucht und kalibriert werden. Die Messung von Baustahl mit flächigen und räumlichen Spannungszuständen ist nicht zuverlässig möglich.

3. Ablauf einer Spannungsmessung am Bewehrungsstahl

3.1 Messstellenvorbereitung

Der zuständige Ingenieur identifiziert die Bereiche und die Bewehrungsrichtung die untersucht werden soll. Anschließend wird die genaue Lage der Bewehrung mit einem Bewehrungsortungsgerät eingemessen. Die Messstelle wird üblicherweise senkrecht zu einem Riss im Beton liegen. Der Bewehrungsstahl wird auf einer Länge von 200 mm und einer Breite von 70 mm freigelegt. Der Betonstahl wird mindestens bis zur Tiefe der Koppelfläche freigelegt. Wenn der Bewehrungsstahl frei von Beton ist, wird die Fräsvorrichtung, wie in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt, mit drei Dübeln am Beton befestigt. Das Fräsen kann in jeder Lage, auch über Kopf, durchgeführt werden. Anschließend wird eine ebene und glatte Koppelfläche für das MME-Gerät hergestellt. Abbildung 4 zeigt einen freigelegten Bewehrungsstab mit gefräster Koppelfläche.



Abbildung 3 Baustellenfräseinrichtung zur Herstellung der Koppelfläche



Abbildung 4 Freigelegter Bewehrungsstahl mit Koppelfläche

3.2 Messdurchführung

Wenn die Koppelfläche erstellt ist, kann die Messung der vorhandenen Stahlspannung beginnen. Mit dem MME-Gerät können keine dynamischen Spannungswechsel gemessen werden. Eine Einzelmessung dauert rund 10 Sekunden. Ein Messwert an einem Bewehrungs-

rungsstab wird aus 6 Einzelmessungen ermittelt. Daher sollten für eine Zeit von ca. 5 Minuten keine starken Laständerungen auftreten. Im Hochbau ist dies meistens gegeben, bei der Messung an Brücken sollte der Schwerverkehr gesperrt oder auf eine andere Spur verlegt werden. Es werden 6 Einzelmessungen mit einem jeweiligen Versatz von ca. 1 cm längs dem Bewehrungsstahl durchgeführt. Die Messwerte werden auf einem Laptop aufgezeichnet. Die Stromversorgung kann über das 220 V Netz oder über eine Batterie erfolgen. Abbildung 5 zeigt den fixierten MME-Prüfkopf während einer Messung.



Abbildung 5 An der Messstelle fixierter Prüfkopf

3.3 Berechnung des Messwertes

Die Messdaten der 6 Einzelmessungen werden in das Analyseprogramm geladen. Das Regressionsmodell berechnet den Spannungswert der Einzelmessungen und einen robusten Mittelwert. Der Berechnung liegen alle während der Kalibration gesammelten Daten zu Grunde.

4. Praktische Anwendung

Die Autoren sind mit der beschriebenen MME-Messmethode bereits am Markt tätig. Anhand zweier Anwendungsbeispiele soll verdeutlicht werden, welchen praktischen Nutzen Messungen der real vorhandenen Spannungen in der Tragstruktur bestehender Bauwerke haben.

4.1 Lagerhaus

Das bestehende Logistikzentrum eines großen Möbelhauses ist ein mehrstöckiges Stahlbetongebäude aus dem Jahre 1971. Die mit 18 cm Dicke sehr schlanken Geschossdecken sind als mehrfeldrige Plattenbalken-Rippendecken auf Stützen und Wänden gelagert. Die bestehenden Unterzüge sind 50 cm breit und 57 cm hoch, die Decke ist durch Dilationsfugen segmentiert. Die Stützen und Unterzüge sind in Abbildung 6 gut erkennbar.

Durch Umstellung des Betriebs der Lagerhalle von fahrerlosen automatischen Staplern auf manuell gefahrene Stapler mit einer höheren Nutzlast und höherer Fahrgeschwindigkeit ergibt sich rechnerisch eine ungenügende Ermüdungssicherheit der Rippendecke in stegnahen Bereichen. Die Rippendecke ist ein Durchlaufträger, bei dem die Lage des Momentennullpunktes stark von der Steifigkeit der Platte und der Unterzüge abhängt. Das statische Modell ergab rechnerisch ein großes Defizit an unterer Plattenbewehrung. Der

Ermüdungsnachweis konnte in den stegnahen Zonen nicht erbracht werden. Durch die Messung der effektiven Spannung an den Bewehrungsstäben mittels der MME-Messung konnte die reale Situation unter ständiger Last und infolge unterschiedlichen Staplerverkehrs gemessen und exakt bewertet werden. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Momentennullpunkte wesentlich weiter Richtung Plattenmitte lagen als im statischen Modell ermittelt. Die Bereiche mit ermüdungsrelevanten Zugspannungen konnten genau definiert werden.



Abbildung 6. Rippendecke mit Staplerverkehr

Auf Grundlage dieser Zustandsanalyse konnte die zwar notwendige Verstärkung der Plattenbewehrung mit CFK-Lamellen zum einen in ihrer Lage optimiert und zum anderen wesentlich verringert werden. Da es sich um ein sehr großes, mehrgeschossiges Lagerhaus handelte bei denen ein redundantes Problem mit wenigen Messungen behandelt werden konnte, sparte der Eigentümer mehrere Hunderttausend Schweizer Franken an Kosten für Verstärkungsmaßnahmen ein.

4.2 Autobahnbrücke

Im Auftrag des Tiefbauamtes des Kantons Zürich wurde das 1970 fertiggestellte, bestehende Viadukt über die Gleisstrecke der Schweizer Bahn in Bülach (Nord), welches Bestandteil der Unterlandautobahn S-10 ist, der statischen Überprüfung unterzogen. Das Bauwerk besteht aus zwei getrennten Hohlkastenbrücken mit je zwei Fahrspuren und überspannt mit neun Feldern die Schützenmattstraße, weitere Industrieplätze und Bahngleise der Schweizer Bahn. Das Viadukt weist einen geraden Überbau auf, der aus einem vorgespannten Hohlkastenträger mit ca. 1,65 m Höhe gebildet wird. Abbildung 7 zeigt den Hohlkastenquerschnitt und in Abbildung 8 ist eine Messung während einem Lastversuch zu sehen.

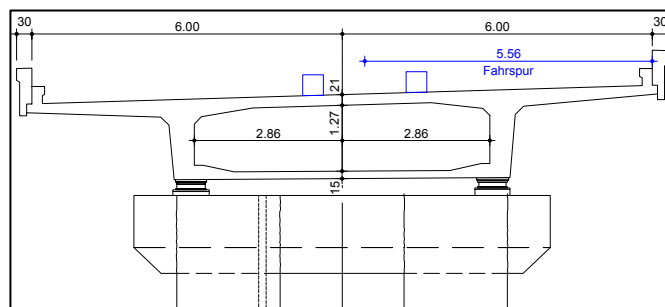


Abbildung 7. Hohlkastenquerschnitt mit Radstellung für Lastversuch

In der statischen Überprüfung ergab sich rechnerisch hinsichtlich Ermüdung der Bewehrung ein stark mangelhafter Widerstand. Es wurde nach Möglichkeiten gesucht, die Ermüdungssicherheit genauer zu untersuchen. Somit wurde beschlossen, sowohl weitere rechnerische Untersuchungen an verfeinerten Modellen vorzunehmen als auch Spannungsmessungen direkt am Bauwerk durchzuführen.



Abbildung 8. Aufnahme der Messwerte im Hohlkasten

Zur Abschätzung des tatsächlichen Ermüdungsproblems wurden die Spannungen im Bewehrungsstahl der untersten Lage der Fahrbahnplatte gemessen. Da die Fahrbahnplatte parallel zur Brückenlängsachse verlaufende Biegerisse hat, wurden alle Messstellen über einem Riss positioniert. Es wurden die Spannungswechsel in der Bewehrung infolge Verkehrsüberfahrten mit Dehnungsmessstreifen und die Spannungen aus ständigen Lasten mit dem MME-Gerät gemessen. Zusätzlich wurde ein Belastungsversuch mit einem Lastwagen mit bekannter Geometrie und bekannten Achslasten durchgeführt. Zur jeweiligen Stahldehnung wurden bei jeder Fahrzeugüberfahrt auch die entsprechenden Rissweitenänderungen aufgenommen. Es konnten Spannungsänderungen ab ca. 4 N/mm^2 aufgezeichnet werden, womit auch leichtere PKW erfasst wurden. Neben den Spannungswerten wurde auch die Temperatur erfasst. Die Messergebnisse wurden über einen Messzeitraum von 4 Monaten kontinuierlich aufgezeichnet. Nach Auswertung der Messergebnisse ließ sich zeigen, dass die Beanspruchung der Bewehrung auf Ermüdung unter der Dauerfestigkeit und somit weit unter einer kritischen Größe liegt. An Hand der gemessenen Spannungswerte aus ständigen Lasten liess sich das statische Modell mit seinen Steifigkeiten so kalibrieren, dass die Messwerte der Lastversuche auch rechnerisch bestätigt werden konnten. Somit konnte mittels der MME-Messung und der Auswertung der tatsächlich auftretenden Spannungen auf weitreichende strukturelle Verstärkungsmaßnahmen verzichtet werden, welche durch eine rein rechnerische Überprüfung des Ermüdungszustands angezeigt gewesen wären.

Grundsätzlich ermöglicht eine solch genaue Bauwerksuntersuchung einen effektiveren Einsatz der finanziellen Mittel zur Instandsetzung bestehender Bauwerke oder sogar die Vermeidung von Instandsetzungsmaßnahmen bei gleicher Sicherheit.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Artikel gibt einen Überblick über ein neu entwickeltes Messgerät zur zerstörungsfreien Spannungsmessung in Bewehrungsstählen. Mit dem zunehmenden Alter und der hohen Beanspruchung der vorhandenen Stahlbetonbauwerke müssen immer mehr Bauwerke überprüft und instandgesetzt oder sogar verstärkt werden. Das hier beschriebene neue Messgerät kann sehr nutzbringend bei der Beurteilung des Zustandes von Stahlbeton- und

Spannbetonbauwerken eingesetzt werden. Eine große Bandbreite der in der europäischen Bauindustrie verwendeten Bewehrungsstähle mit ihren unterschiedlichen chemischen Zusammensetzungen, Herstellungsverfahren und Lastgeschichten musste bei der Entwicklung des Messgerätes berücksichtigt werden. Dies konnte nur mit dem Einsatz eines leistungsfähigen Regressionsmodells erreicht werden. Das jetzt vorhandene Messgerät ist baustellen-tauglich und konnte schon bei anspruchsvollen Zustandsuntersuchungen erfolgreich eingesetzt werden.

Die künftige Weiterentwicklung des Messgerätes zielt auf die weitere Verbesserung der Messgenauigkeit und die Vergrößerung des Anwendungsspektrums. Das Gerät und die Software sind so konzipiert, dass „neue“ Bewehrungsstähle leicht „dazukalibriert“ werden können und die Datenbasis damit vergrößert wird. Dies führt zu einer Verbesserung der Messgenauigkeit. Auf der Basis des vorhandenen Gerätes kann ein Gerät mit einer größeren Magnetisierungsleistung gebaut werden, mit welchem auch die Bewehrungsdurchmesser 22 mm bis 40 mm magnetisiert und gemessen werden können.

Referenzen

- [1] SCHNEIDER, E.; BINDSEIL, P.; BOLLER, CH.; KURZ, W.: *Stand der Entwicklungen zur zerstörungsfreien Bestimmung der Längsspannungen in Bewehrungsstäben von Betonbauwerken*. Beton- und Stahlbetonbau 107 [(2012), Heft 4, S. 244–254.
- [2] THEINER W. A.: *Micromagnetic techniques*. Structural and Residual Stress Analysis by Nondestructive Methods, V. Hauk (ed), Elsevier (1997), Seite 564
- [3] OBERBECK-SPINTIG I.: *Einsatz der Barkhausenrauschenanalyse zur zerstörungsfreien Eigenschaftsprüfung geschweisster Feinbleche*. Fortschritts-Berichte VDI. Reihe 2, Fertigungstechnik ; Nr. 540. ISBN 3-18-354002-9.
- [4] ALTPETER I.; THEINER W. A.: *Spannungsmessung mit magnetischen Effekten*. Handbuch für experimentelle Spannungsanalyse, Chr. Rohrbach (ed), VDI-Verlag Düsseldorf (1989), S. 619.
- [5] DOBMANN G.; ALTPETER I.; WOLTER B.; KERN R.: *Industrial Applications of 3MA -Micromagnetic Multiparameter Microstructure and Stress Analysis*. 5th International Conference Structural Integrity of welded Structures (ISCS 2007) Timisoara 2007.