

Zerstörungsfreie Bestimmung der Längsspannung in Bewehrungsstäben von Bauwerken

Eckhardt SCHNEIDER, Santosh-Kiran BALIJEPALLI, Melanie KOPP

Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP;
Campus E3 1; 66123 Saarbrücken

Kurzfassung. Änderungen in der Nutzung von Bestandbauwerken setzen eine Analyse des Beanspruchungszustandes voraus und nach Meinung von Fachleuten ist die Längsspannung in den Bewehrungsstäben eine aussagekräftige Information dazu. Zerstörungsfreie mikromagnetische Verfahren zur Spannungsanalyse an ferromagnetischen Bauteilen sind entwickelt und bieten im Vergleich zu anderen zerstörungsfreien Verfahren den Vorteil einer einfachen Anwendung auf der Baustelle. Mikromagnetische Verfahren müssen kalibriert werden. Um den Kalibrieraufwand zu minimieren wurden die Bewehrungsstäbe gemäß ihrer elektromagnetischen Eigenschaften in Gruppen sortiert, gruppenspezifische Kalibrierungen durchgeführt und durch Anwendung getestet. Die mittels mikromagnetischem Verfahren erzielten Ergebnisse haben zwar mit bis zu ca. ± 100 MPa noch unakzeptabel große Abweichungen von den Referenzwerten aber sie ermutigen zur weiteren Anpassung des Verfahrens an diese Prüfaufgabe.

1. Einführung und Zielsetzung

Änderungen in der Nutzung von Bauwerken, z. B. bei geplanter Erhöhung der Deckenlasten in Industriegebäuden oder der Verkehrsdichte bei Brücken, erfordern eine Information über den tatsächlichen Beanspruchungszustand des Bestandbauwerkes. Laut Aussage von Fachleuten ist die Längsspannung von Bewehrungsstäben eine aussagekräftige Größe zur Beurteilung des Beanspruchungszustandes. Schon 2008 wurden auf Initiative von enertec engineering ag [1] erste Untersuchungen mit Ultraschall- und mikromagnetischen Verfahren begonnen, die zeigten, dass die mikromagnetischen Verfahren insbesondere wegen der einfacheren Anwendung auf der Baustelle Vorteile haben. Wie alle elektromagnetischen müssen auch die mikromagnetischen Verfahren zur Spannungsanalyse kalibriert werden. Eine einfache und sehr zutreffende Kalibrierung ergibt sich, wenn nach Messdatenaufnahme am Objekt ein Stück des untersuchten Bewehrungsstabes zur Kalibrierung im Zugversuch herausgetrennt wird. Die Experten halten die damit einhergehende Schwächung der Tragfähigkeit des Bauwerkes für vernachlässigbar. Vorteilhafter wäre allerdings eine Kalibrierung im Vorfeld, sodass bei der Messung vor Ort der Wert der am Messort wirkenden Längsspannung unverzüglich angezeigt werden könnte. Ziel ist die Anpassung eines mikromagnetischen Verfahrens zur Bestimmung der Längsspannung entlang der Spannweite von Bewehrungsstäben am Objekt auf der Baustelle.

2. Grundlegendes

Die Nutzung mikromagnetischer Verfahren zur Bestimmung von Eigenschaften und Zuständen ferromagnetischer Bauteile ist nichts Neues. Die häufigsten Anwendungen sind zur Bestimmung von Härte, Härtetiefe, von Streckgrenzwerten und Zugfestigkeiten sowie zur Detektion und Charakterisierung von Schleiffehlern. Alle angebotenen Systeme, genannt seien die RollScan-Systemvarianten und MikroScan 600 von Stresstech [2], Introscan von V. Vengrinovich [3] sowie die 3MA-Technologie mit den Systemvarianten 3MAII, MikroMach und FracDim des IZFP [4], ermöglichen auch die Bestimmung mechanischer Spannungen. Bei den erstgenannten Systemen wird ausschließlich das Barkhausen-Rauschen ausgenutzt; bei den IZFP-Systemen werden weitere Messgrößen aufgenommen insbesondere mit dem Ziel, Störgrößen zu unterdrücken oder mehrere Bauteileigenschaften mit einer Messdatenaufnahme zu bestimmen.

Die Amplitude der Barkhausen-Rauschsignale ändert sich systematisch, wenn der unter dem Sensor liegende Bauteilbereich von einigen μm bis zu wenigen mm Tiefe durch ein angelegtes Magnetfeld gemäß der Hysteresekurve magnetisiert wird. Diese systematische Veränderung der Barkhausen-Rauschsignale ändert sich ebenfalls systematisch unter dem Einfluss mechanischer Spannungen. Das Maximum der gleichgerichteten Barkhausen-Rauschamplituden M_{Max} ist der häufig genutzte Messwert. In der Mehrzahl aller Fälle wird eine S-förmige Änderung von M_{Max} mit der in Magnetisierungsrichtung wirkenden Spannung festgestellt: sehr kleine Werte im Bereich der Druckspannung, größer werdende Amplituden mit abnehmenden Druck- und zunehmenden Zugspannungen. Abbildung 1 zeigt im linken Teilbild einen Ausschnitt aus dem S-förmigen Verlauf der Messgröße M_{Max} . Mit den Änderungen der Barkhausen-Rauschamplitude verschiebt sich auch die Lage des Maximums der Rauschkurve mit dem mechanischen Spannungszustand. Der Wert des angelegten Magnetfeldes beim Maximum der Rauschkurve ist in guter Übereinstimmung mit der Koerzitivfeldstärke des Werkstoffes. Die aus der Barkhausen-Rauschkurve abgeleitete Koerzitivfeldstärke ist in Abbildung 1 mit H_{CM} bezeichnet. Mit abnehmender Druck- und zunehmender Zugspannung nimmt H_{CM} geringere Werte an.

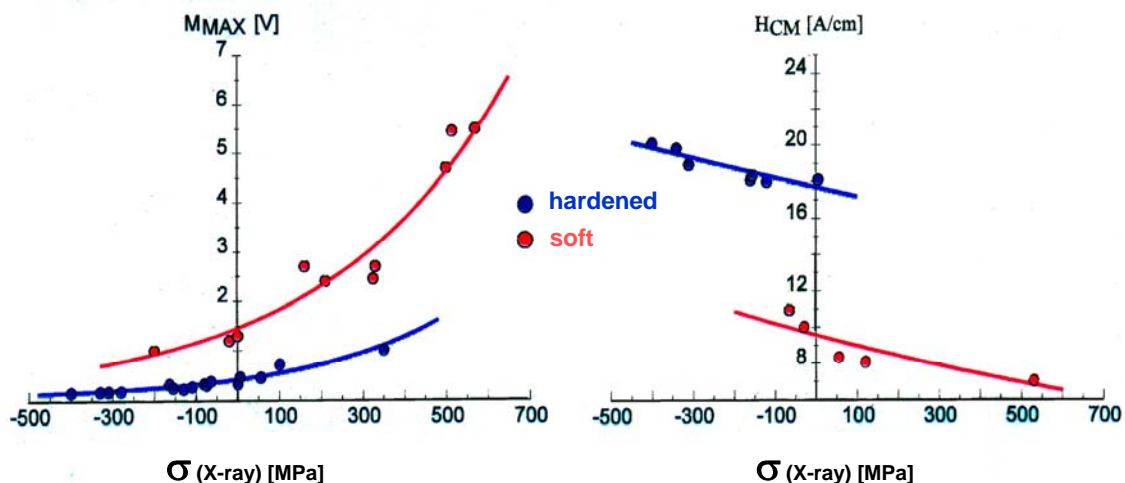


Abb. 1: Änderung der aus dem Barkhausen-Rauschen abgeleiteten Messgrößen Rauschamplitude M_{Max} und Koerzitivfeldstärke H_{CM} im Falle eines Stahles in einem weichen (rot) und harten (blau) Zustand.

Die Abbildung 1 zeigt im linken Teilbild exemplarisch für einen weichen (rot) und harten (blau) Zustand des gleichen Stahles die Änderung des Messwertes M_{Max} mit der angelegten Druck- bzw. Zugspannung. Die Zweideutigkeit -200 MPa (rot) oder 350 MPa (blau) des Messwert $M_{\text{Max}} = 1\text{V}$ wird durch die entsprechenden H_{CM} -Werte geklärt.

Die 3MA-Technologie des IZFP setzt auf die Aufnahme weiterer Messgrößen, die in Abbildung 2 schematisch dargestellt sind. Alle aus den vier Effekten abgeleiteten Messgrößen verändern sich mit dem mechanischen Spannungs- und dem Gefügestand [5]. Bis zu 41 Messgrößen werden pro Messung aufgenommen; die 3MA-Software routine ermittelt die signifikanteste Messgröße im Hinblick auf die Bestimmung der Zielgröße, hier der Längsspannung im Bewehrungsstab und berechnet durch die Zunahme bzw. Ablehnung einzelner Messgrößen eine Kalibrierfunktion. In vielen Fällen, so auch hier, wird die Kalibrierung im einaxialen Zugversuch vorgenommen. Eine Kalibrierung im zwei axialen Zugversuch oder im Biegeversuch oder durch Verwendung der z. B. röntgenographisch festgestellten Vergleichswerte ist ebenfalls üblich.

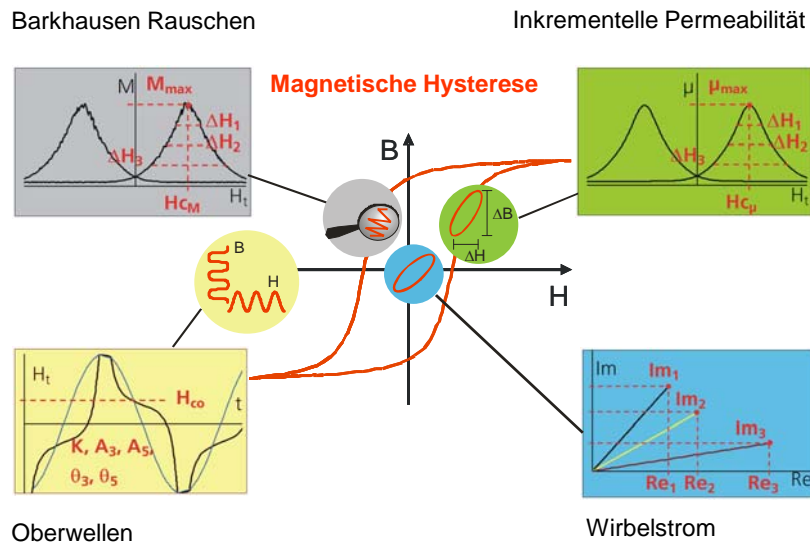


Abb. 2: Schematische Darstellung der 4 Messeffekte und der Messgrößen, die bei der 3MA-Technologie des IZFP genutzt werden.

Vergleichsweise neu ist eine Selbstkalibrierung, bei der die oben erwähnte S-förmige Veränderung der Barkhausen-Rauschamplitude mit den Druck-, Zugspannungen funktional beschrieben wird. Die Parameter der Kalibrierfunktion werden so gewählt werden, dass die am Prüfobjekt gemessenen Barkhausen-Rauschwerte möglichst gut angenähert werden [6].

3. Vorgehensweise

3.1 Gruppierung der Stäbe

Nach Aussage von Fachleuten gibt es in vielen Fällen, insbesondere bei älteren Bestandsbauten keine Dokumentation der verbauten Bewehrungsstäbe. Stäbe unterschiedlicher Hersteller, Dicken und Festigkeitsklassen können an unterschiedlichen Stellen des Bauwerkes vorliegen. Ein anwendungsfreundliches Prüfverfahren kann erzielt werden, wenn es gelingt, die vor Ort zur Spannungsanalyse ausgewählten Stäbe aufgrund ihrer elektromagnetischen Eigenschaften in Gruppen mit sehr ähnlichen Eigenschaften, unabhängig von Hersteller und Dicke, zu sortieren.

3.2 Kalibrierung der Stäbe

Die quantitative Spannungsanalyse setzt eine Kalibrierung voraus. Die Vorab-Kalibrierung an repräsentativen Probestäben ist sehr aufwendig und scheitert in vielen Fällen an der Nichtverfügbarkeit von Probestäben insbesondere im Fall der Prüfung älterer Bauwerke. Von Vorteil wäre es, wenn die Kalibrierung eines Stabes einer Gruppe anwendbar wäre zur Spannungsanalyse an anderen Stäben der gleichen Gruppe und zu erkennbar falschen Resultaten führen würde, wenn diese Kalibrierung zur Spannungsanalyse an Stäben einer anderen Gruppe eingesetzt werden würde.

3.3 Test des Verfahrens

Anzustreben ist der Vergleich der mit den mikromagnetischen Verfahren erzielten Spannungsergebnisse an einem Bewehrungsstab mit den Ergebnissen eines etablierten Verfahrens wie z. B. des Bohrloch- oder Segmentierungsverfahrens. Zunächst jedoch wird die Qualität der Kalibrierung an Stäben überprüft, die im einaxialen Zugversuch belastet werden. Der Vergleich der mittels magnetischem Verfahren festgestellten Zugspannung mit dem von der Zugmaschine angegebenen Wert charakterisiert die Kalibrierung und damit die Anwendbarkeit des mikromagnetischen Verfahrens und der beschriebenen Vorgehensweise.

4 Experimentelle Untersuchungen

4.1 Probestäbe und Messortvorbereitung

enertec engineering ag stellte 11 Probestäbe mit Durchmessern von 10, 12 und 14 mm von 4 verschiedenen Herstellern und 2 Festigkeitsklassen zur Verfügung. Die Stäbe 1-6 haben, mit z. B. 1.1 und 1.2 bezeichnet, jeweils 2 ca. 500 mm lange Teilstäbe (Partnerstäbe), die unmittelbar hintereinander aus dem Originalstab herausgetrennt wurden. Die Probestäbe 7-11 sind ohne Partnerstab.

Die Stäbe haben insbesondere durch die thermo-mechanischen Einflüsse bei der Herstellung Eigenspannungen und mehr oder weniger stark ausgeprägte Eigenspannungsgradienten von der Oberfläche zur Mitte. Auch die Längseigenspannungen verändern sich mit dem Abstand von der Oberfläche. Diese Eigenspannungen sind und bleiben zunächst unbekannt. Im Bauwerk haben die verbauten Stäbe ebenfalls Eigenspannungen, denen sich die Lastspannungen additiv überlagern; das Ergebnis der Spannungsanalyse am Bauwerk ist immer die Summe von Last- und Eigenspannungen. Diese Situation wird während der Kalibrierung nachgestellt; dem im Probestab vorliegenden Eigenspannungszustand wird im Zugversuch die Zugspannung überlagert und beide beeinflussen den Messwert; die aufgebrauchten Zugspannungen verursachen die Messwertänderungen.

Es kann angenommen werden, dass sich der Gradient der Längsspannung in der oberflächennahen Zone deutlich stärker mit den jeweiligen Herstellungsbedingungen ändert als der Wert der Längseigenspannungen in tieferen Lagen. Um den Einfluss des (vermuteten) oberflächennahen Spannungsgradienten zu minimieren, wurde von der Oberfläche ausgehend, ca. 2 mm Material so abgefräst, dass sich eine ebene Messspur von ca. 8-10 mm Breite ergab. Das Abfräsen und anschließende Abschleifen wurde in einzelnen Schritten möglichst schonend durchgeführt, um nur geringe Bearbeitungseigenspannungen einzubringen. Neben der Minimierung des Einflusses des Spannungsgradienten war die Herstellung einer möglichst ebenen Ankoppelfläche für den Sensor weiterer Grund für das Abarbeiten. Die Qualität der Messwerte verbessert sich mit der Gleichförmigkeit des oberflächennahen Magnetfeldes während der Messdatenaufnahme.

4.2 Gruppierung

Eine 3MAII-Softwareroutine zur Mustererkennung wurde benutzt, um die Ähnlichkeiten der elektromagnetischen Eigenschaften der Stäbe zu quantifizieren: Die Differenz $X_1 - Y_1$ zwischen dem Wert der 1. der 41 Messgrößen an Probestab X und dem Wert der 1. der 41 Messgrößen an Probestab Y wird auf die Streubreite S_1 der Messgröße 1 normiert. Wie aus der Beziehung (1) deutlich wird, ergeben die relativen Differenzen zwischen den entsprechenden Werten aller Messgrößen einen dimensionslosen Kennwert der Ähnlichkeit.

$$d = 1/41 \left((|X_1 - Y_1|) / S_1 + (|X_2 - Y_2|) / S_2 + \dots + (|X_{41} - Y_{41}|) / S_{41} \right) \quad (1)$$

Die Ähnlichkeit in den Eigenschaften ist umso größer je kleiner der Zahlenwert d ist.

4.3 Kalibrierung

Auch die Kalibrierung wird von einer 3MAII-Routine unterstützt. Zur Kalibrierung wurde jeweils ein Partnerstab in der Zugmaschine schrittweise bis etwa zur halben Streckgrenze, 250 MPa, gezogen und bei jeder Laststufe wurden alle 41 3MAII-Messgrößen aufgenommen. Die Berechnung der Kalibrierfunktion wird ohne weiteres Zutun des Bedieners vom Messsystem durchgeführt.

4.4 Spannungsanalyse an den Probestäben

Die an einem Probestab ermittelte Kalibrierfunktion wurde zur Spannungsanalyse an allen anderen Stäben der gleichen Gruppe sowie an Stäben der anderen Gruppen genutzt. Dazu wurden die Stäbe in der Zugmaschine belastet und die mittels 3MAII Software berechneten Spannungen mit den Angaben der Zugmaschine aufgezeichnet. Bleibt noch zu erwähnen, dass die experimentellen Untersuchungen mit der 3MA-Systemvariante MikroMach durchgeführt wurden.

5 Ergebnisse

5.1 Gruppierung

Die oben beschriebene Ermittlung der Ähnlichkeit der elektromagnetischen Eigenschaften der Stäbe hat zum Ergebnis:

Die jeweiligen Partnerstäbe der Stabproben 1-6 haben Ähnlichkeiten mit Kennzahlen d von 2,2 bis 3,1; Ausnahme sind die Partnerstäbe 4 mit $d = 4,7$.

Der Stab 7 hat Ähnlichkeit mit den Partnerstäben 3.1 und 3.2 ebenso wie die Stäbe 8 und 9 zum Einen und 10 und 11 zum Anderen. Die entsprechenden Kennzahlen sind $< 3,4$.

Es wurde willkürlich ein Ähnlichkeitsgrenzwert $d \leq 3,6$ festgelegt. Stäbe mit Kennzahlen $\leq 3,6$ werden als ähnlich und der gleichen Gruppe zugehörig betrachtet. Stäbe mit Kennzahlen $\geq 3,6$ sind nicht ähnlich. Mit diesem Ähnlichkeitsgrenzwert können die Stäbe in 3 Gruppen sortiert werden:

Gruppe I: Stäbe 2, 5, 8, 9;

Gruppe II: Stäbe 3 und 7;

Gruppe III: Stäbe 6, 10, 11.

Die Stäbe 1 und 4 sind einander unähnlich und können auch keiner anderen Gruppe zugeordnet werden.

5.2 Spannungsanalyse

Die folgenden Abbildungen zeigen exemplarisch drei der durchgeführten Vergleiche der mit MikroMach ermittelten Zugspannungen mit den von der Zugmaschine angegebenen Werten. Die in Abbildungen 3 dargestellten Vergleiche wurden mit der Anwendung der an Stab 2.1 bzw. Stab 5.1 ermittelten Kalibrierung zur Spannungsanalyse an den anderen Stäben der gleichen Gruppe I erzielt.

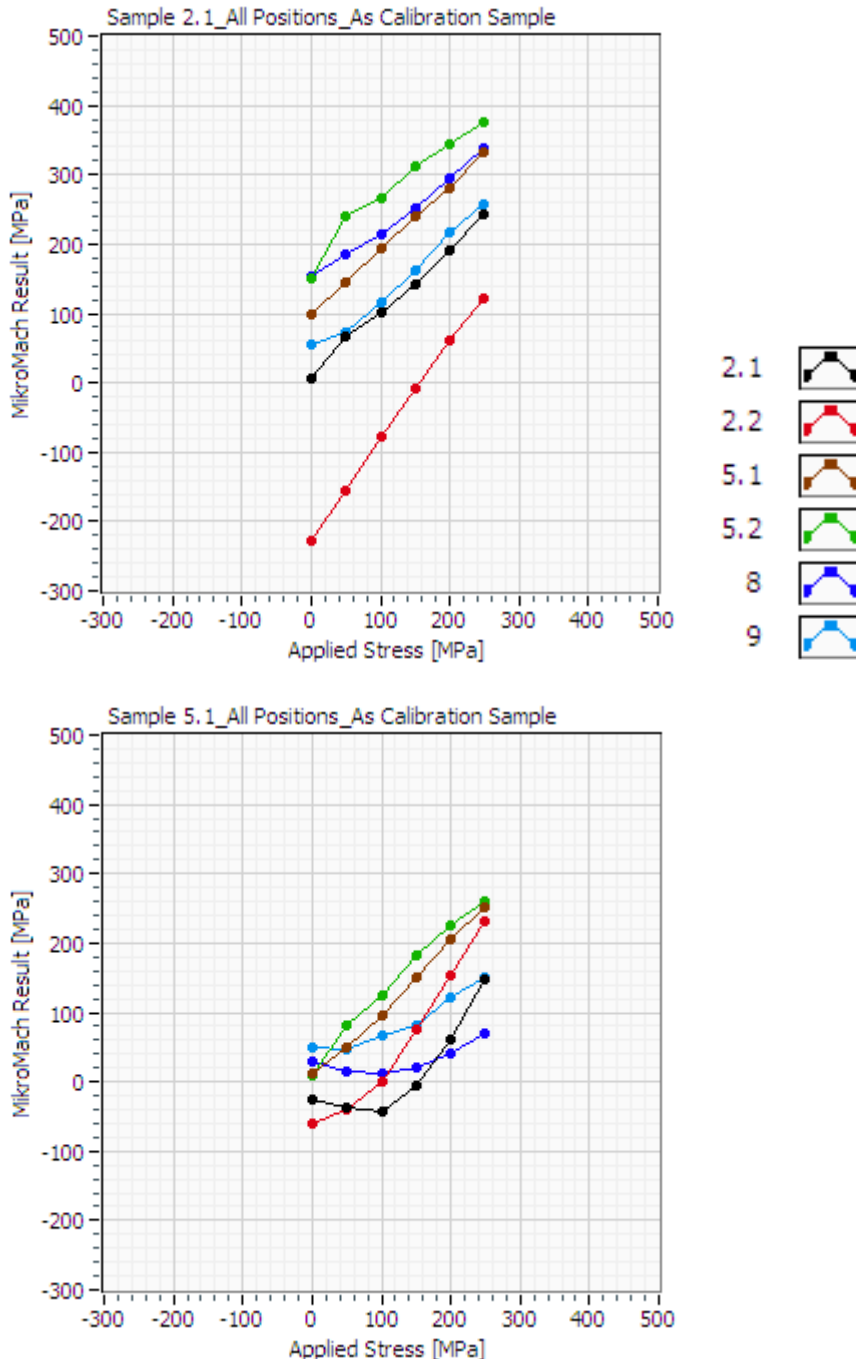


Abb. 3: Gegenüberstellung der mikromagnetisch bestimmten Zugspannungen und der von der Zugmaschine angegebenen Werte. Kalibrierung von Stab 2.1 (oben) und Stab 5.1 (unten) zur Spannungsanalyse an den anderen Stäben der gleichen Gruppe I.

Die in Abbildung 3 oben insbesondere bei Stab 2.2 (rot) zu erkennende Verschiebung der MikroMach Ergebnisse in Richtung Druckspannungen sowie die in

Abbildung 3 unten dargestellten nicht zur 45°-Geraden parallelen Ergebnisänderungen mit den zunehmenden Zugspannungen wird wahrscheinlich von den Eigenspannungen in den Stäben verursacht. Hier kann nur eine Eigenspannungsanalyse mit einem etablierten Verfahren Klarheit verschaffen.

In Abbildungen 4 sind Ergebnisse dargestellt, die sich bei Anwendung der Kalibrierung von Stab 2.1 (Gruppe I) zur Spannungsanalyse an den Stäben der Gruppen I und II ergeben. Wie weitere Ergebnissen gleicher Art machen auch die hier dargestellten deutlich, dass die an den jeweils anderen Gruppen ermittelten Ergebnisse deutlich größere Abweichungen von den Vergleichswerten haben, als die bei Stäben aus der Gruppe des Kalibrierstabes festgestellt.

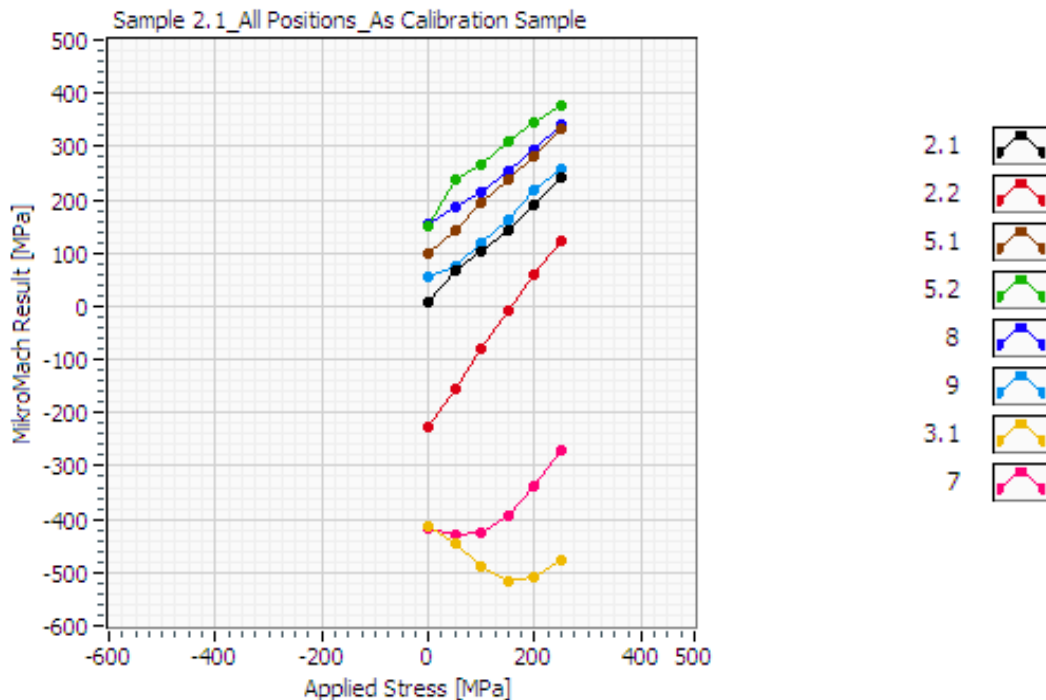


Abb. 4: Gegenüberstellung der mikromagnetisch bestimmten Zugspannungen und der von der Zugmaschine angegebenen Werte. Kalibrierung von Stab 2.1 zur Spannungsanalyse an den anderen Stäben der gleichen Gruppe I und an den Stäben 3.1 und 7 der Gruppe II.

6 Anwendung des Verfahrens auf der Baustelle

Die Fachhochschule Kaiserslautern beauftragte die erste Anwendung des oben beschriebenen Vorgehens an einem ca. 70 Jahre alten Kasernengebäude [7]. Mehrere ca. 6 m lange Bewehrungsstäbe der Decke waren von unten freigelegt; eine ca. 10 mm breite Messspur wurde durch Abfräsen und Schleifen von der Unterseite der ca. 20 mm dicken Stäbe hergestellt. Zur Kalibrierung stand ein Probestab aus einem benachbarten Bewehrungsstab zur Verfügung. Die Ähnlichkeitsuntersuchung bestätigte mit Kennwert $2,4 \leq d \leq 3,7$ die vermutete gleiche Qualität der beiden Bewehrungsstäbe. Auffallend dabei war, daß die Ähnlichkeit des Kalibrierstabes mit den Eigenschaften des Bewehrungsstabes in der Decke im Messbereich von 0 bis ca. 2000 mm mit $d = 3,7$ deutlich weniger gut ausgeprägt ist. Entlang der gleichen Messspur wurde auch das System Introsan eingesetzt; die Auswertungen der Daten hat Prof. Schreiber vom IZFP Dresden unter Nutzung des Verfahrens der Selbstkalibrierung durchgeführt [8]. In Abbildung 5 sind die mit MikroMach und Introsan erzielten Ergebnisse entlang der Messspur am Bewehrungsstab in der Decke vergleichend dargestellt. Auffallend ist die größere Abweichung der Ergebnisse in dem Mess-

bereich von 0 bis ca. 2000 mm, in dem auch die geringeren Ähnlichkeitskennwerte festgestellt wurden.

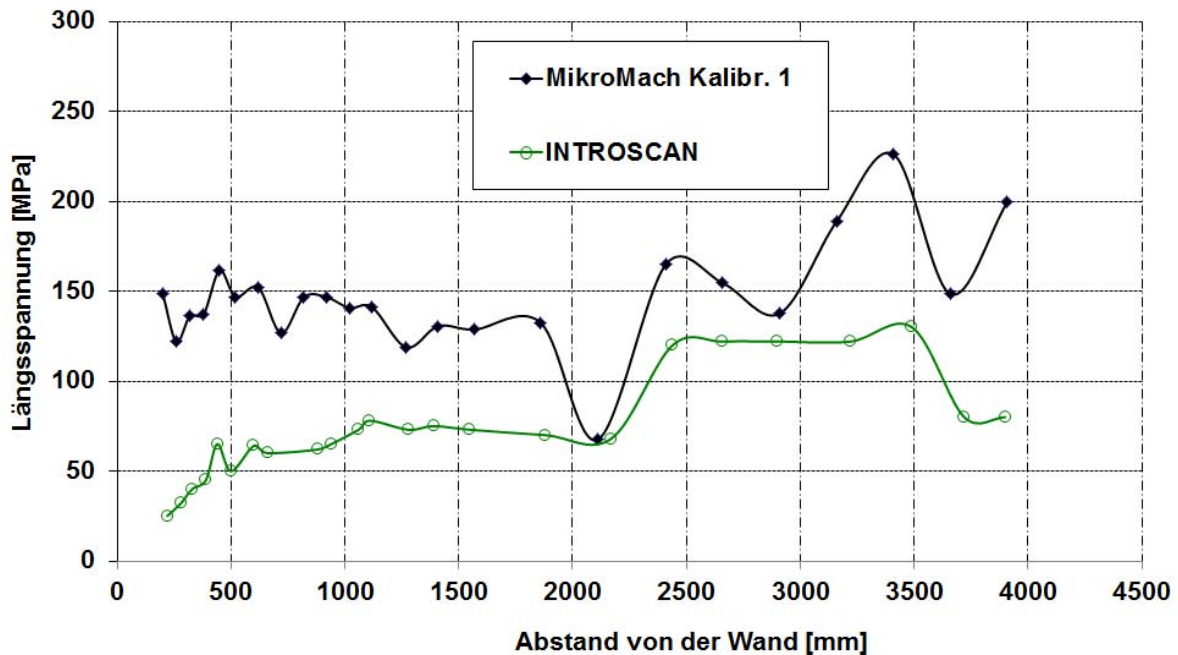


Abb. 5: Gegenüberstellung der entlang eines Bewehrungsstabe in einer Decke eines Altbaus mit MikroMach und Introscan ermittelten Längsspannungen.

7 Bewertung des bisher Erreichten

Die Gruppierung von Bewehrungsstäben an Hand ihrer elektromagnetischen Eigenschaften scheint die Vereinfachung des Kalibrieraufwandes zu ermöglichen und die gute Übereinstimmung ($\leq \pm 50$ MPa) der mit zwei unterschiedlichen Verfahren erzielten Ergebnisse an einem Bewehrungsstab auf der Baustelle ermutigt zur weiteren Anpassung der mikromagnetischen Verfahren an diese Prüfaufgabe.

REFERENZEN

- [1] H. Gundelwein, enertec engineering ag; Unterer Graben, CH 8402 Winterthur.
- [2] Stresstech GmbH; D-56462 Höhn; info@stresstech.de.
- [3] V. Vengrinovich, National Academy of Sciences (NAS) of Belarus, Minsk.
- [4] I. Altpeter, K. Szielasko, J. Schreiber; info@izfp.fraunhofer.de.
- [5] G. Dobmann: Physical Basics and Industrial Applications of 3MA – Micromagnetic Multiparameter Microstructure and Stress Analysis; European Federation for Non-Destructive Testing (EFNDT): European Conference on Non-Destructive Testing (10) ECNDT. 2010, Vortrag 1.1.1.
- [6] U. Cikalova, B. Bendjus, J. Schreiber: Bewertung des Spannungszustandes und der Materialschädigung von Komponenten industrieller Anlagen; MP Materials Testing 51 (2009) 10, 678-685.
- [7] P. Bindseil, Fachhochschule Kaiserslautern; Postfach 1573, D 67604 Kaiserslautern.
- [8] J. Schreiber; persönliche Information.