

Zerstörungsfreie Bestimmung der Faserorientierung und des Fasergehalts im Fest-UHFB mittels Magnetoskopie

Matthias Lierenfeld

Dr. sc. ETH Zürich in
Erdwissenschaften
Valtest AG
Lalden, Wallis, Schweiz

Marc Blumer

MSc Baustoffingenieur-
wissenschaften
Valtest AG
Lalden, Wallis, Schweiz

Summary

Die Faserorientierung und der Fasergehalt von UHFB sind entscheidend für die Tragfähigkeit von Bauteilen. Derzeit wird der Fasergehalt meist über Auswaschversuche am Frischbeton oder dem Brechen von Festbetonproben bestimmt. Eine flächige, zerstörungsfreie Erfassung ist jedoch für eine zuverlässige Bemessung unerlässlich. Im Schlusssentwurf zur Revision des SIA-Merkblatts 2052 wird die Magnetoskopie als mögliche Prüfmethode vorgeschlagen [1]. Hierbei werden magnetische Signale zur Bestimmung von Fasergehalt und -orientierung genutzt. Praxisbeispiele der Valtest AG zeigen jedoch gewisse Einschränkungen auf. Zum Beispiel beeinflussen variierende Schichtstärken, unterschiedliche Faserdimensionen und das Vorhandensein von Bewehrungen die Messergebnisse. Daher sind die Entwicklung von robusten Kalibrierverfahren und Signalverarbeitungen notwendig. Trotz dieser Herausforderungen bietet die Magnetoskopie das Potenzial für die Qualitätssicherung von UHFB – vorausgesetzt, ihre methodischen Schwächen werden gezielt adressiert und behoben.

Keywords: Magnetoskopie, UHFB, Fasergehalt, Faserorientierung, Bewehrung

1. Einleitung

Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB) zählt zu den innovativsten Baustoffen im modernen Ingenieurbau. Durch die gezielte Zugabe von Stahlfasern lassen sich mechanische Eigenschaften wie Biegezugfestigkeit, Rissverteilung und Duktilität erheblich verbessern – und zwar ohne die klassische Bewehrung. Damit eröffnen sich neue Möglichkeiten in der Gestaltung filigraner und hochbelastbarer Bauteile. Die Leistungsfähigkeit von UHFB im Bauteil hängt jedoch wesentlich von zwei schwer erfassbaren Parametern ab: dem Fasergehalt und der Faserorientierung.

Während bei konventionell bewehrtem Beton die Lage und Menge der Bewehrung bekannt und kontrollierbar sind, ist die Faserverteilung im UHFB infolge der Frischbetonverarbeitung schwer vorherzusagen und zu prüfen. Die üblichen Verfahren zur Ermittlung des Fasergehalts – etwa Auswaschversuche oder das Brechen von Probekörpern – a) liefern nur (Bulk) Informationen, da keine Aussage über die Orientierung getroffen werden können, b) bedingen teilweise das Zerstören der Bauteile bzw. Proben und c) liefern ausschliesslich punktuelle Informationen, welche zudem nur mit erheblichem Aufwand erlangt werden können. Eine zerstörungsfreie, flächige und gleichzeitig präzise Erfassung dieser Parameter war bislang nicht Stand der Praxis.

In diesem Kontext rückte die Magnetoskopie als potenziell geeignetes Verfahren in den Fokus. Sie verspricht, den Fasergehalt und die Faserorientierung berührungslos und zerstörungsfrei durch die Detektion magnetischer Signale zu erfassen. Erste Anwendungen zeigten vielversprechende Ergebnisse. Doch wie zuverlässig ist die Methode im baupraktischen Massstab?

Die folgende Untersuchung geht diesen Fragen nach und stellt das magnetoskopische Messprinzip sowie dessen technische Umsetzung und Kalibrierung in der Praxis im Detail vor.

2. Methode

2.1. Theorie

Die magnetoskopische Methode beruht auf der Messung der elektrischen Induktivität einer Spule, die ein hochfrequentes Magnetfeld erzeugt. Gelangen ferromagnetische Stahlfasern in das Feld, verändern sie dessen magnetische Leitfähigkeit (Permeabilität). Dies beeinflusst die gemessene elektrische Induktivität der Spule, die in Henry (H) gemessen wird.

Die gemessene Impedanz hängt vom Volumenanteil der Fasern, deren Ausrichtung, Abstand zur Spule sowie von weiteren Faktoren wie Schichtstärke oder vorhandener Bewehrung ab. Zur Quantifizierung des Fasergehalts wird eine Eichgerade erstellt. Dafür werden Referenzproben mit definiertem Fasergehalt und bekannten Fasertypen verwendet. Die dazugehörigen Impedanzwerte werden aufgezeichnet und in Beziehung zum tatsächlichen Fasergehalt gesetzt. Diese Kalibrierung ist essential um die späteren Messungen an realen Bauteilen (richtig) zu interpretieren.

Allerdings mussten wir feststellen, dass kleinste Variationen in Geometrie, Fasertyp oder Fremdmetallanteilen das Messergebnis erheblich beeinflussen können.

2.2. Prüfgerät

Das verwendete Messgerät (Abbildung 1), besteht aus einem U-förmigen Ferritkernsystem mit einer Öffnungsweite von 93 mm und einer Gesamthöhe von 76 mm. Die effektive Länge des Magnetkreises beträgt 189 mm. Die kompakte Bauform ermöglicht eine einfache Handhabung im Labor- und Baustellenbetrieb.

Im Inneren des Geräts ist eine Spule mit 1000 Windungen aus Kupferlackdraht verbaut (Klasse H, Typ C2.5, Durchmesser 0.56 mm). Die Spule ist auf dem Ferritkern vom Typ B67345B5X27 aufgewickelt, der für den Einsatz in magnetischen Messsystemen mit hoher Feldkonzentration geeignet ist. Die Wicklung ist thermisch und elektrisch isoliert, um auch bei längerem Betrieb eine stabile Signalqualität sicherzustellen.

Zur Auswertung der induktiven Signale wird das Gerät mit einem externen Präzisionsmessgerät vom Typ LCR6000 verbunden. Dieses misst die elektrische Induktivität des Magnetkreises bei definierter Frequenz und erlaubt so eine reproduzierbare Erfassung der Spuleneigenschaften in kompakter Bauweise. Die robuste Konstruktion des Sensors ermöglicht einen zuverlässigen Einsatz unter verschiedensten Umgebungsbedingungen.

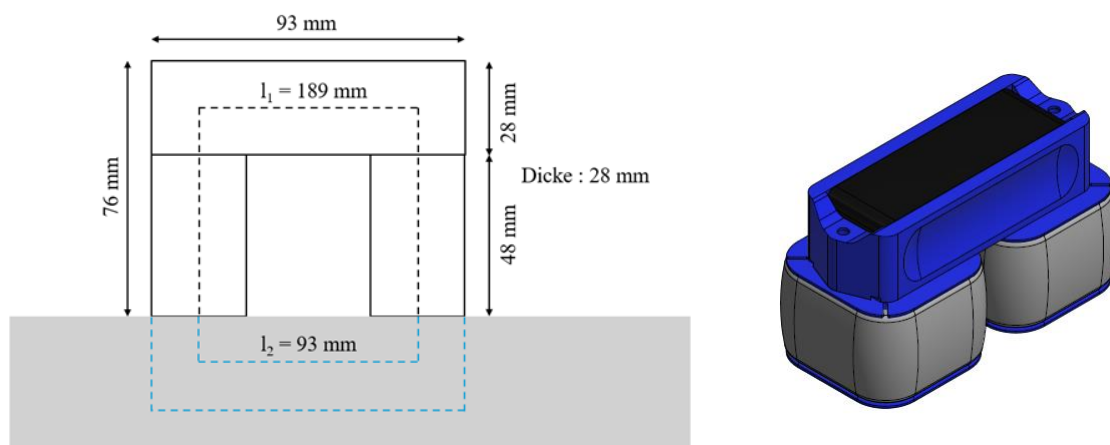


Abbildung 1. Darstellung des Prüfgeräts; Links: Schematischer Aufbau des verwendeten Ferritkerns; Rechts: Magnetoskopische Sonde mit 1'000 Windungen Kupferlackdraht (Klasse H, Typ C2.5, Durchmesser 0.56 mm).

2.3. Prüfablauf

Zur Durchführung der Magnetoskopieprüfung wird zunächst die Oberfläche des Prüfkörpers gereinigt. Anschließend wird eine Messschablone auf dem zu untersuchenden Bereich befestigt. Diese Schablone enthält ein definiertes Messraster, welches als Grundlage für die systematische Erfassung der Impedanzdaten dient.

Das Prüfgerät wird mit der Messelektronik über entsprechende Kabel verbunden und vor Beginn der Messung wird überprüft, ob eine stabile Nullstellung des Systems vorliegt, um systematische Abweichungen zu vermeiden. Die eigentliche Messung erfolgt rasterbasiert entlang eines objektspezifischen Koordinatensystems. Dabei ist die x-Achse alphanumerisch von A bis zum jeweils letzten Rasterpunkt beschriftet und die y-Achse numerisch beginnend bei 0 bis zur maximalen Rasterhöhe. An jedem Schnittpunkt des Rasters wird das Prüfgerät jeweils einmal in x- und einmal in y-Richtung aufgesetzt, um die elektrische Induktivitätswerte in Millihenry (mH) zu erfassen. Der Abstand zwischen den Messpunkten sowie die Gesamtgröße des Messfeldes sind abhängig von der Geometrie und Dimension des Prüfkörpers und werden entsprechend den Anforderungen des jeweiligen Bauteils festgelegt.

3. Resultate und Diskussion

3.1. Kalibrierung und Einfluss von Fasertypen

Um den Einfluss unterschiedlicher Fasertypen zu bestimmen, wurden jeweils eine separate Kalibrierkurve für vier verschiedenen Fasertypen erstellt (Abbildung 2). Hierfür wurden jeweils Kalibrierplatten mit einer Schichtstärke von 30 mm hergestellt. Die Induktivität wurde als Mittelwert über die gesamte Rasterfläche bestimmt. Alle vier Fasertypen zeigen einen nahezu linearen Zusammenhang zwischen der mittleren Induktivität μ_r und dem Fasergehalt, wobei die Steigung der Kalibrierfunktion vom jeweiligen Faserparametern abhängig ist.

Die höchsten Messwerte und damit die stärkste Induktivitätszunahme mit zunehmendem Fasergehalt wurden für Fasertyp 1 (14 mm Länge, 0.2 mm Durchmesser) beobachtet. Mit einer Steigung von 0.0446 und einem R^2 von 1 zeigt diese Kalibrierkurve die höchste Sensitivität. Auch der Fasertyp 3 (13 mm Länge, 0.2 mm Durchmesser) und Fasertyp 4 (12.5 mm Länge, 0.2 mm Durchmesser) liefern eine sehr ähnliche Steigung von 0.0434 ± 0.003 bzw. 0.0427 ± 0.003 , was darauf hindeutet, dass die Messung in erster Linie vom Durchmesser und weniger von der exakten Faserlänge abhängt. Alle drei Fasertypen führen aufgrund ihres größeren Durchmessers zu einer höheren magnetischen Wechselwirkung im Vergleich zu Fasertyp 2.

Fasertyp 2, mit reduziertem Durchmesser von 0.175 mm und einer Länge von 12.5 mm, weisen mit einer Steigung von nur 0.0321 ± 0.003 eine signifikant geringere Sensitivität auf. Die niedrigere Induktivität bei gleichem Volumenanteil ist plausibel, da die dünneren Fasern ein geringeres magnetisches Moment erzeugen und somit das Feld des Sensors weniger stark beeinflussen.

Die hohe Regressionsgüte von $R^2 = 0.99$ für alle vier Fasertypen zeigt jedoch, dass der Zusammenhang (Induktivität vs. Fasergehalt) robust ist und sich gut für quantitative Auswertungen eignet – vorausgesetzt, die verwendete Kalibrierkurve passt exakt zum verbauten Fasertyp. Eine falsche Kalibrierfunktion kann sonst zu erheblichen systematischen Fehlern führen.

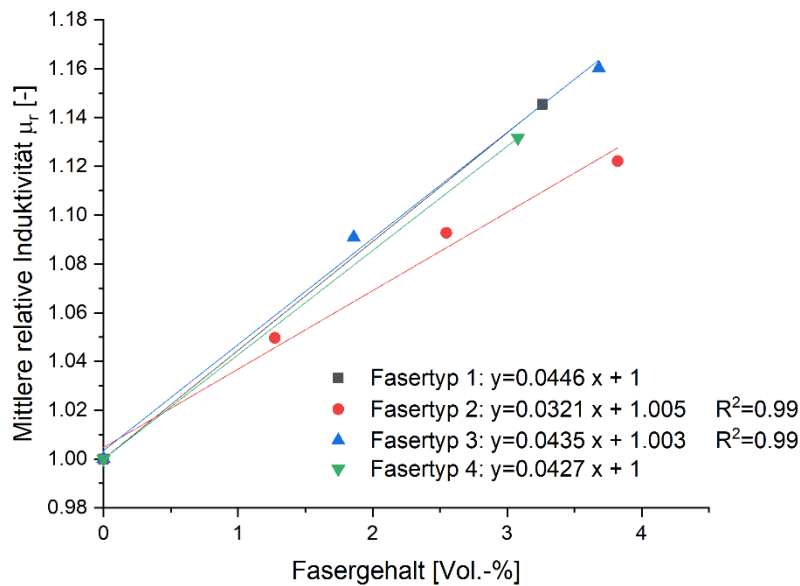


Abbildung 2. Mittelwert relativer Induktivität μ_r geplottet gegen den Fasergehalt in Vol.-%.

Wenn beispielweise zur Auswertung eines Prüfkörpers mit einem Fasertyp 3-Gehalt von 3.14 Vol.-% die Kalibrierkurve des Fasertyps 2 verwendet wird, wird die gemessene Induktivität fälschlich einem höheren Fasergehalt zugeordnet. Konkret ergibt sich bei einer gemessenen relativen Induktivität von etwa 1.14 (realer Wert bei Fasertyp 3, 3.14 Vol.-%) mit der Kurve von Fasertyp 2 ein rechnerischer Fasergehalt von rund 4.18 Vol.-%, also eine Überbewertung um über 30 %. Dies verdeutlicht, wie kritisch die exakte Übereinstimmung zwischen Kalibrierkurve und verwendetem Fasertyp ist – selbst geringfügige Unterschiede in Geometrie oder Magnetisierbarkeit der Fasern können zu systematischen Fehleinschätzungen führen.

3.2. Einfluss der Schichtstärke

Neben dem genauen Kenntnisstand über die verwendeten Fasertypen, ist auch das Wissen über die Schichtstärke des verbauten UHFBs von zentraler Bedeutung. Hierfür wurden bei der Valtest AG eine Serie Prüfkörper mit Schichtstärke (30, 40, 50 mm) und einem Fasergehalt von 3.08 Vol.-% des Fasertyps 4 hergestellt.

Trotz identischer Zusammensetzung weist das Messergebnis einen deutlichen systematischen Zusammenhang mit der Schichtstärke auf (Abbildung 3): Die gemessene relative Induktivität nimmt mit der Schichtstärke zu.

Der Anstieg bei Schichtstärken > 30 mm lässt sich dadurch erklären, dass die magnetoskopische Sonde nicht nur oberflächennahe Fasern erfasst, sondern, dass das Magnetfeld der Spule tiefer als 30 mm eindringt (siehe Kalibrierplatten mit Schichtstärke 30 mm 3.1). Daraus ergibt sich eine Überschätzung bei Schichtstärken, welche grösser sind als die der Kalibrierproben.

Diese Ergebnisse zeigen, dass bei der magnetoskopischen Fasergehaltsbestimmung eine Korrektur in Abhängigkeit der Schichtstärke der UHFB-Probe notwendig ist, sofern diese von der Schichtstärke der Kalibrierplatten abweicht. Die hier vorgestellten Ergebnisse bieten eine erste quantitative Grundlage für eine solche Korrektur. Alternativ könnten separate Kalibrierkurven für unterschiedliche Schichtstärkenbereiche erstellt werden, was jedoch mit erheblichem experimentellem Aufwand verbunden ist.

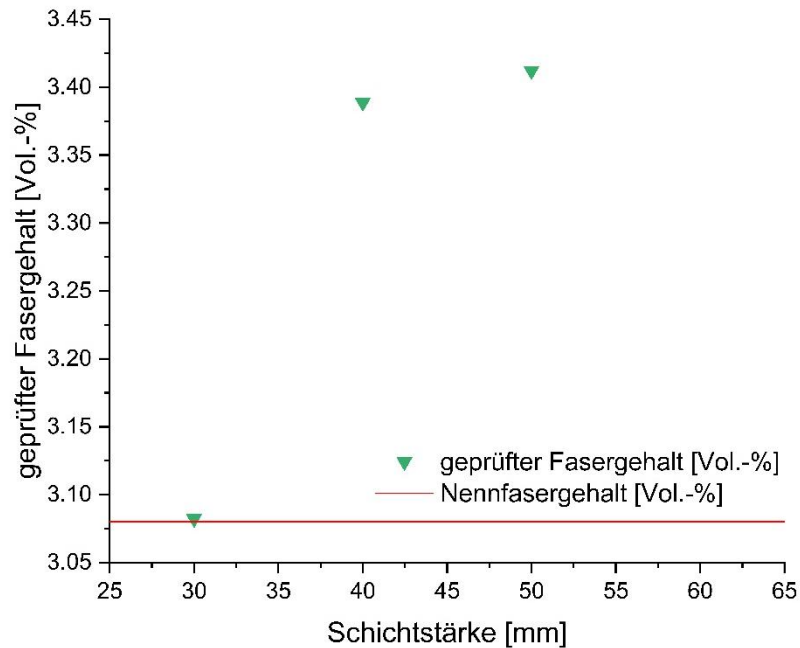


Abbildung 3. Fasergehalt (Fasertyp 4) in Vol.-% geplottet gegen die Schichtstärke der Proben in mm.

3.3. Einfluss von Bewehrung

Zur Beurteilung des Einflusses von Bewehrungen auf die Bestimmung der Verteilung und Ausrichtung von Stahlfasern im Bauteil wurden zwei Probekörper bei der Valtest AG hergestellt und untersucht. Der UHFB wurde dabei mittig auf die Betonplatte eingebracht und konnte sich selbstständig verteilen. Einer der Probekörper enthält eine einachsige Bewehrung mit 8 mm Stäben in x-Richtung, mit einer Bewehrungsüberdeckung von 30 mm und einem Stababstand von 15 cm. Der zweite Probekörper weist eine zweiachsige Bewehrung mit senkrecht zueinander angeordneten Stäben auf, wobei die Bewehrung in y-Richtung oberhalb jener in x-Richtung liegt (Abbildung 4). Der rezeptierte Fasergehalt beträgt 2.88 Vol.-%.

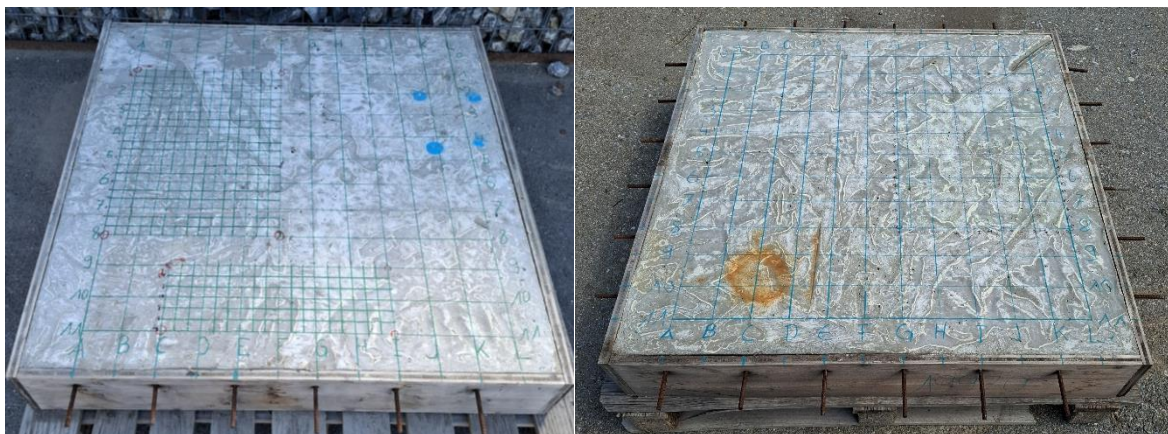


Abbildung 4. UHFB-Proben mit Bewehrung, links: Einfachbewehrung; rechts: Zweifachbewehrung.

Die Messungen wurden zunächst in einem groben Raster von 75 mm durchgeführt. Auffällige Bereiche wurden anschließend gezielt mit einem feineren Raster von 25 mm nachuntersucht. Die Ergebnisse sind in vier Diagrammen dargestellt wobei die roten Linien die Lage der Bewehrungsstäbe und die schwarzen Punkte die Messpositionen kennzeichnen (Abbildung 5 bis Abbildung 8).

Die Fasergehaltsverteilungen (Abbildung 5 und Abbildung 7) liegen im Bereich zwischen 2.60 und 3.20 Vol.-%. Der Mittelwert stimmt mit 2.88 bzw. 2.86 Vol.-% für die einachsig respektive zweiachsig bewehrte Prüfprobe sehr gut mit dem Sollwert von 2.88 Vol.-% überein.

Im Probekörper mit der einachsigen Bewehrung (Abbildung 5) zeigt sich im unteren Bereich ($y > 75$ cm) eine Zone mit deutlich reduziertem Fasergehalt (< 2.6 Vol.-%), was auf entmischungsbedingte Verluste beim Einbau hindeutet. Entlang einzelner Bewehrungslinien (z. B. bei $x \approx 15, 30$ und 45 cm) sind lokal leicht tiefere Fasergehalte zu erkennen, welche jedoch nicht systematisch auftreten. Dies deutet auf einen punktuellen Einfluss der Bewehrung auf die Faserverteilung hin.

Im Hinblick auf die Faserorientierung zeigt sich ein deutlich ausgeprägter Einfluss der Bewehrung. In Abbildung 6 (einachsige Bewehrung) dominieren in der linken Bauteilhälfte ($x < 45$ cm) zwischen den Bewehrungsstäben positive Orientierungswerte (ca. $+10$), was auf eine bevorzugte Faserausrichtung in x-Richtung hindeutet. Entlang der Bewehrungsstäbe ist hingegen eine Reduktion der Orientierungswerte zu beobachten, was auf eine lokal veränderte oder gestörte Ausrichtung schließen lässt. In der rechten Bauteilhälfte ($x > 60$ cm) treten vermehrt negative Werte auf, was eine bevorzugte Faserausrichtung in y-Richtung vermuten lässt – entgegen der Lage der Bewehrung.

Diese Muster deuten darauf hin, dass entweder die Bewehrung während des Einbaus eine kanalisierende Wirkung auf die Faserbewegung hatte und somit die Orientierung beeinflusst wurde oder, dass die Bewehrung selbst das magnetische Messsignal beeinflusst und insbesondere in y-Richtung zu einer erhöhten Induktivität führt.

Beim Probekörper mit doppelter Bewehrung (Abbildung 7 und Abbildung 8) ist der Fasergehalt insgesamt gleichmäßiger verteilt als bei einachsiger Bewehrung, jedoch treten im rechten Bereich des Messauschnitts ($x > 52.5$ cm) lokal reduzierte Werte < 2.7 Vol.-% auf. Diese Abweichungen konzentrieren sich in einem begrenzten Bereich innerhalb des überlagerten Bewehrungsgitters. Eine systematische Reduktion entlang einzelner Bewehrungslinien lässt sich jedoch nicht feststellen.

Die Faserorientierung zeigt einen höheren Gehalt an isotropischer Ausrichtung im Vergleich zu dem einachsigen Probekörper. Es lassen sich hauptsächlich isotrope Ausrichtungen bzw. Ausrichtungen in y-Richtung entlang der Bewehrung erkennen. Entlang der Bewehrung in x-Richtung tritt keine klar bevorzugten Orientierungsrichtungen auf.

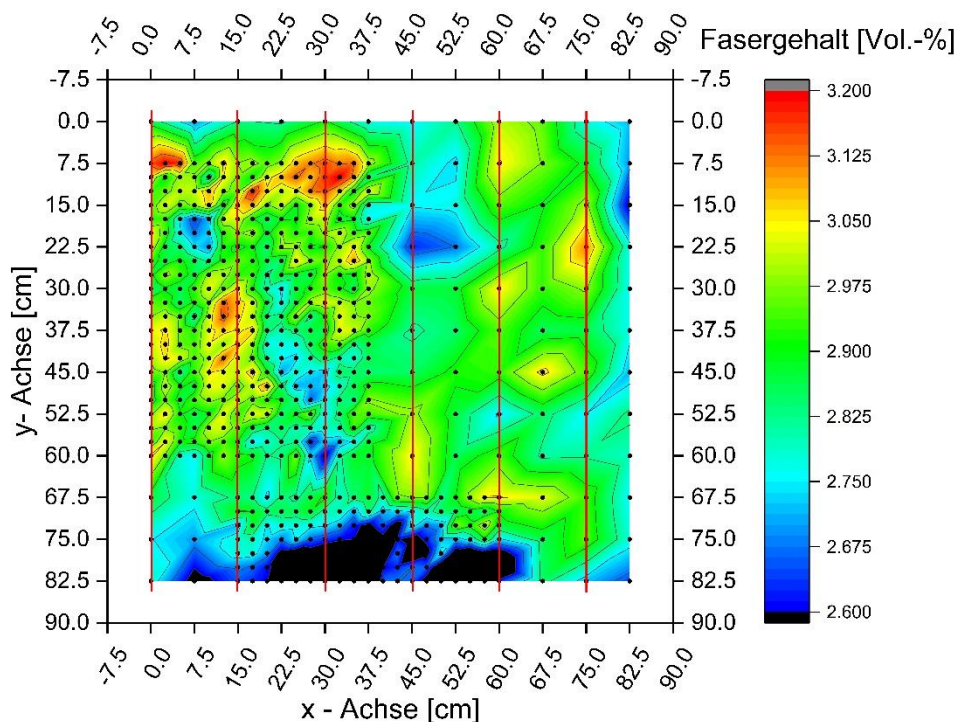


Abbildung 5. Verteilung des Fasergehalts [Vol.-%]; Die roten Linien markieren die Lage der Bewehrung. Die schwarzen Punkte entsprechen den einzelnen Messpositionen. Der rezeptierte Zielwert beträgt 2.88 Vol.-%.

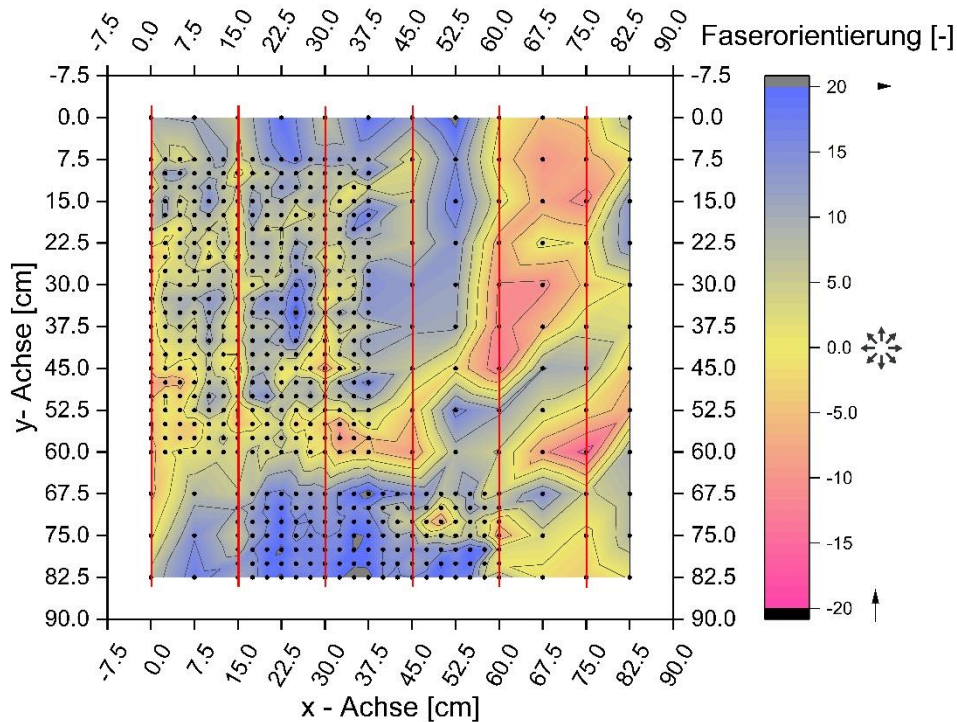


Abbildung 6. Verteilung der Faserorientierung im untersuchten Bereich. Farbskala: rot: unidirektionale Faserausrichtung in y-Achse; gelb: isotrope Faserausrichtung; blau: unidirektionale Faserausrichtung in x-Achse. Die roten Linien markieren die Lage der Bewehrung. Die schwarzen Punkte entsprechen den einzelnen Messpositionen.

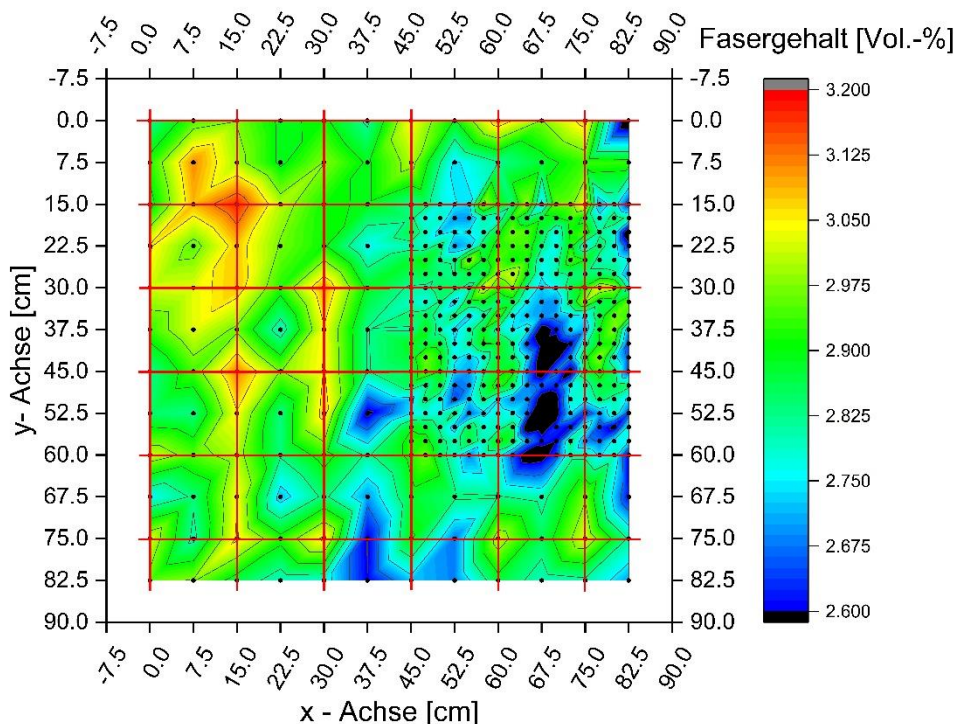


Abbildung 7. Verteilung des Fasergehalts [Vol.-%] Die roten Linien markieren die Lage der Bewehrung. Die schwarzen Punkte entsprechen den einzelnen Messpositionen. Der rezeptierte Zielwert beträgt 2.88 Vol.-%.

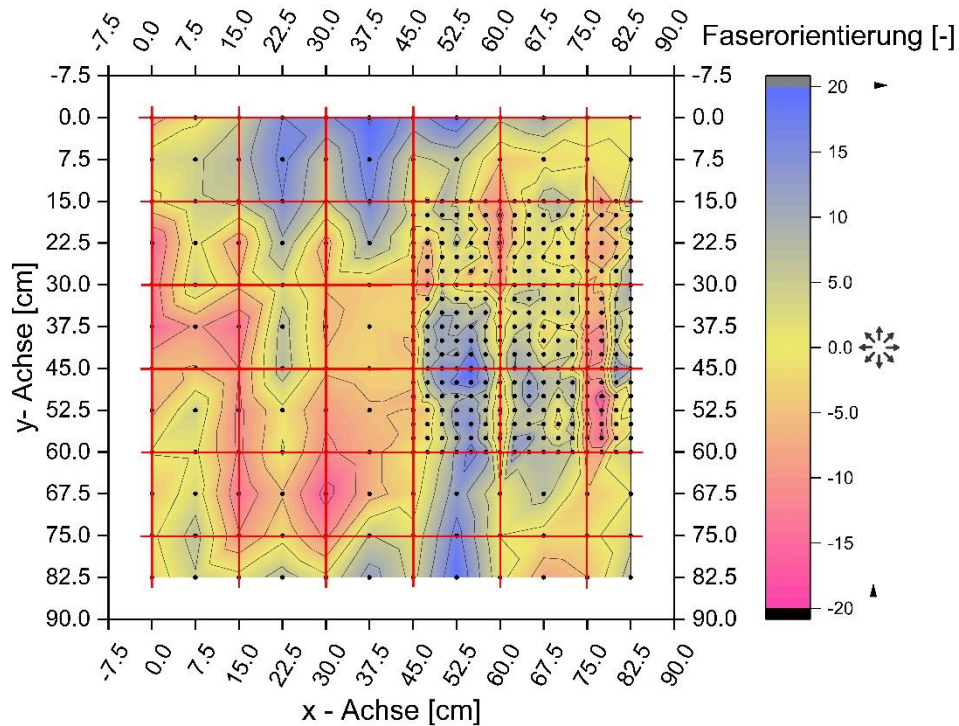


Abbildung 8. Verteilung der Faserorientierung im untersuchten Bereich. Farbskala: rot: unidirektionale Faserausrichtung in y-Achse; gelb: isotrope Faserausrichtung; blau: unidirektionale Faserausrichtung in x-Achse. Die roten Linien markieren die Lage der Bewehrung. Die schwarzen Punkte entsprechen den einzelnen Messpositionen.

4. Fazit

Die durchgeführten magnetoskopischen Untersuchungen zeigen, dass die Magnetoskopie grundsätzlich geeignet ist, sowohl den Fasergehalt als auch die Faserorientierung in UHFB-Bauteilen flächendeckend und zerstörungsfrei zu bestimmen.

Die Ergebnisse verdeutlichen jedoch, dass Unterschiede in den Faserdimensionen bzw. im Fasertyp sowie Abweichungen der Schichtstärke gegenüber den verwendeten Kalibrierproben einen systematischen Einfluss auf die Messergebnisse haben können. Solche Abweichungen bergen das Risiko von Fehlinterpretationen, wenn sie bei der Auswertung nicht berücksichtigt werden.

Bewehrungselemente im UHFB zeigten in den untersuchten Proben keinen systematischen Einfluss auf den gemessenen Fasergehalt. Hinsichtlich der Faserorientierung wurde jedoch festgestellt, dass entlang der Bewehrung eine bevorzugte Ausrichtung in Bewehrungsrichtung gemessen wird. Ob diese gemessene Orientierung tatsächlich der physikalischen Faserorientierung entspricht oder ob die Bewehrung das Messergebnis beeinflusst, kann auf Basis der vorliegenden Untersuchungen nicht abschließend beurteilt werden und erfordert weiterführende Studien.

5. Verweise

- [1] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, *Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB) – Baustoffe, Bemessung und Ausführung, Schlussentwurf FprSIA/TS 2052:2025-05*, Zürich: SIA Zurich, 2025.