

ORIGINAL ARTICLE



Funktionalisierung faserverstärkter Hochleistungsbetone mittels Formgedächtnislegierungen

Bernhard Middendorf¹ | Maximilian Schleiting¹ | Ekkehard Fehling¹

Correspondence

Prof. Dr. rer. nat.
Bernhard Middendorf
Inst. for Structural Engineering
Department of Structural Materials and Construction Chemistry
Mönchebergstraße 7
34125 Kassel
Email: middendorf@uni-kassel.de

¹ University of Kassel, Kassel, Germany

Abstract

Faserverstärkte (Ultra-)Hochleistungsbetone ((U)HPC) werden bereits seit den 1970er Jahren in großen Mengen für die Herstellung von Betonfertigteilen verwendet. Fasern werden eingesetzt, um die Zugfestigkeit zu erhöhen und sprödes Versagen in duktilen Nachbruchverhalten umzuwandeln. Funktionale Formgedächtnislegierungen (FGL) als Bewehrung haben das Potenzial, in Form von Vorspannelementen im erhärteten Beton zu wirken und die Frischbetoneigenschaften zu verbessern.

FGL haben die Eigenschaft, sich an eine eingeprägte Form zu "erinnern". Durch thermische oder mechanische Aktivierung geht die zuvor verformte Legierung in eine eingeprägte Form zurück. Dieser Prozess beruht auf einer vollständig reversiblen Umwandlung der Tieftemperaturphase Martensit in die Hochtemperaturphase Austenit. Dadurch können zwei Effekte ausgenutzt werden: Superelastizität und Einweg-Effekt.

Die Superelastizität ist im Bauwesen wegen der vorhandenen Dämpfungsfähigkeit gut bekannt und wird bereits bei dämpfenden und selbstzentrierenden Elementen eingesetzt. Der Einweg-Effekt wurde bisher weniger genutzt, bietet aber ein enormes Potenzial für das Bauwesen. Diese Arbeit zeigt, dass der Effekt zur Vorspannung von UHPC sowie zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit von Frischbeton genutzt werden kann.

Keywords

Ultra-high performance concrete (UHPC), fibre reinforced concrete, bond strength, rheology, shape memory alloys

1 Einleitung

Die effiziente Nutzung von Rohstoffen in zukünftigen Gebäuden ist eine große Herausforderung für die Industrie und die Forschung im Bereich des Bauwesens. Leichteres Bauen spart Material und ermöglicht es, den Anteil der Vorfertigung zu erhöhen und dadurch Produktionsprozesse von der Baustelle in die industrielle Fertigung zu verlagern. Effizienz kann auf verschiedene Weise erreicht werden: Durch den Einsatz von geringeren Zementgehalten bei der Betonherstellung, durch filigrane, stahl- oder kohlefaserbewehrte Betonbauteile, durch dünnere, formstabilisierte Platten und durch die Verwendung von Holz als nachwachsendem Rohstoff. Aufgrund seiner weltweiten Verfügbarkeit, freien Formbarkeit und guten Druckfestigkeitseigenschaften prägt Beton seit rund 140 Jahren das Bauwesen. In dieser Zeit wurde Beton vor allem in Bezug auf seine Festigkeit und Dauerhaftigkeit kontinuierlich verbessert. Die Bemessung von Bauteilen und Tragwerken wurde wissenschaftlich erforscht [1; 2]. So wurde an der Universität

Kassel im Rahmen eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten koordinierten Forschungsprogramms der Hochleistungswerkstoff Ultra-hochleistungsbeton (UHPC) erforscht und optimiert [2]. UHPC hat Druckfestigkeiten von bis zu 250 MPa, was auf einen niedrigen Wasser/Zement-Wert, eine optimierte hohe Packungsdichte und den Zusatz von Fließmitteln zurückzuführen ist [3]. Eine Erhöhung der Druckfestigkeit von UHPC führt jedoch zu einem spröden Nachbruchverhalten. Im Vergleich zu den hohen Druckfestigkeiten weisen UHPC und andere Betone jedoch nur geringe Zugfestigkeiten auf. Für die in Bauteilen auftretenden Zugkräfte wird Beton daher traditionell und standardmäßig mit Bewehrungsstäben und Spanngliedern bewehrt [4]. Der Vorspannprozess ist jedoch oft komplex und kostspielig. Außerdem verringert sich die aufgebrauchte Vorspannung im Laufe der Zeit durch Kriechen und Schwinden des Betons sowie durch Relaxationsprozesse im Stahl, was wiederum zu kostspieligen Reparaturmaßnahmen und der Notwen-

digkeit einer Erneuerung der Bauwerke führt [5]. Zusätzlich zur Stabbewehrung kann aber auch eine Faserbewehrung in den Beton eingebracht werden, um das Nachbruchverhalten weiter zu verbessern [1]. Beide Verstärkungsmaterialien stehen seit langem im Fokus der Forschung und im Laufe der Jahre wurden neue Materialien, Anwendungen und Methoden identifiziert und entwickelt.

Eines dieser neueren Materialien sind metallische Legierungen mit Formgedächtniseffekten. Diese Legierungen haben die Fähigkeit, sich durch eine reversible Phasenumwandlung von einer Hochtemperaturphase Austenit in eine Niedrigtemperaturphase Martensit an eine vorgegebene Form zu erinnern. Dieser Effekt ist als Formgedächtniseffekt bekannt. Obwohl dieser bereits seit den 1930er Jahren bekannt ist, sind Anwendungen im Bereich der Konstruktionstechnik erst seit Anfang der 1990er Jahre in den Fokus der Forschung gerückt [6; 7]. Formgedächtnislegierungen (FGL) haben aufgrund ihrer einzigartigen Eigenschaften und Funktionalität ein großes Potenzial für den Einsatz in Konstruktionen [8; 9]. Allerdings ist nicht jede FGL gleichermaßen für das Bauwesen geeignet. Dies ist im Allgemeinen auf die spezifischen mechanischen Eigenschaften zurückzuführen, die für den Einsatz im Bauwesen erforderlich sind. Darüber hinaus sind die Materialkosten für Großanwendungen von Bedeutung, was den Einsatz von teuren FGL einschränkt.

Im Prinzip sind drei Formgedächtniseffekte für das Bauwesen von Interesse: (1) die Superelastizität (Abbildung 1a), (2) der Einwegeffekt (auch Pseudoplastizität genannt) mit Dehnungsbegrenzung (Abbildung 1b) und (3) der Einwegeffekt ohne Dehnungsbegrenzung (Abbildung 1c). Aufgrund des inhärenten Dämpfungsvermögens und der Reversibilität der Umwandlung steht die Superelastizität im Fokus des Bauwesens [7; 10; 11]. Bereits 1991 untersuchten Graesser und Cozzarelli Möglichkeiten zur Dämpfung seismischer Belastungen mit einer Legierung aus Nickel und Titan (Ni-Ti) [12]. Witting und Cozzarelli untersuchten mit Cu-Zn-Al-FGL verstärkte Balken auf Torsions-, Biege- und Zugdämpfung [13]. Zwei große Forschungsprojekte, die sich bereits in den 1990er Jahren mit dem Einsatz von FGL im Bauwesen befassten, sind die in Italien durchgeführten und von der Europäischen Kommission finanzierten Projekte "Manside" (1995 bis 1999) und "Istech - Shape Memory Alloy Devices for Seismic Protection of Cultural Heritage Structures" (1996 bis 1999) [14]. Beide Projekte befassten sich im Wesentlichen mit der Nutzung der superelastischen Eigenschaften von Ni-Ti [7]. Sie führten zu vereinzelt Anwendungen bei der Gebäudeinstandsetzung, z.B. als FGL-Kupplungselemente oder Verstärkungselemente für Mauerwerk [15; 16]. Bis 2008 wurden jedoch nur etwa 20 Gebäude auf diese Weise mit FGL-Komponenten verstärkt [17]. Saiidi and Wang [18], Alam et al. [19] und Abdulridha et al. [20] untersuchten die energiedissipierende und selbstzentrierende Wirkung von in Beton eingebetteten FGL. Sie kamen zu dem Schluss, dass durch den Einsatz von FGL die bleibende Verformung von Betonbauteilen nach der Belastung erheblich reduziert werden kann.

Neben den superelastischen Eigenschaften steht der Einweg-Effekt, insbesondere durch die Möglichkeit, eine Vorspannung auf Bauelemente aufzubringen, im Mittelpunkt

der Forschung. Bei dieser Anwendung wird die Rückstellung des FGL aufgrund des Formgedächtniseffekts durch eine Verankerung blockiert und somit eine Spannung erzeugt. Die Aktivierung der FGL erfolgt durch Erwärmung des zuvor gedehnten FGL-Elements. In verschiedenen Studien wurde gezeigt, dass neben der Verwendung von Ni-Ti FGL zum Aufbringen von Vorspannung [21] auch selbstheilende Anwendungen zum Schließen von Rissen und damit zur Induktion von Druckeigenspannungen im Beton [22; 23] relevant sind. Trotz der Vorteile von Ni-Ti FGL sind die Anwendungen bisher auf wenige Anwendungen beschränkt, was teilweise auf die hohen Kosten der Legierung zurückzuführen ist, wodurch deren Anwendung bisher nicht über eine Nischentechnologie herauskam.

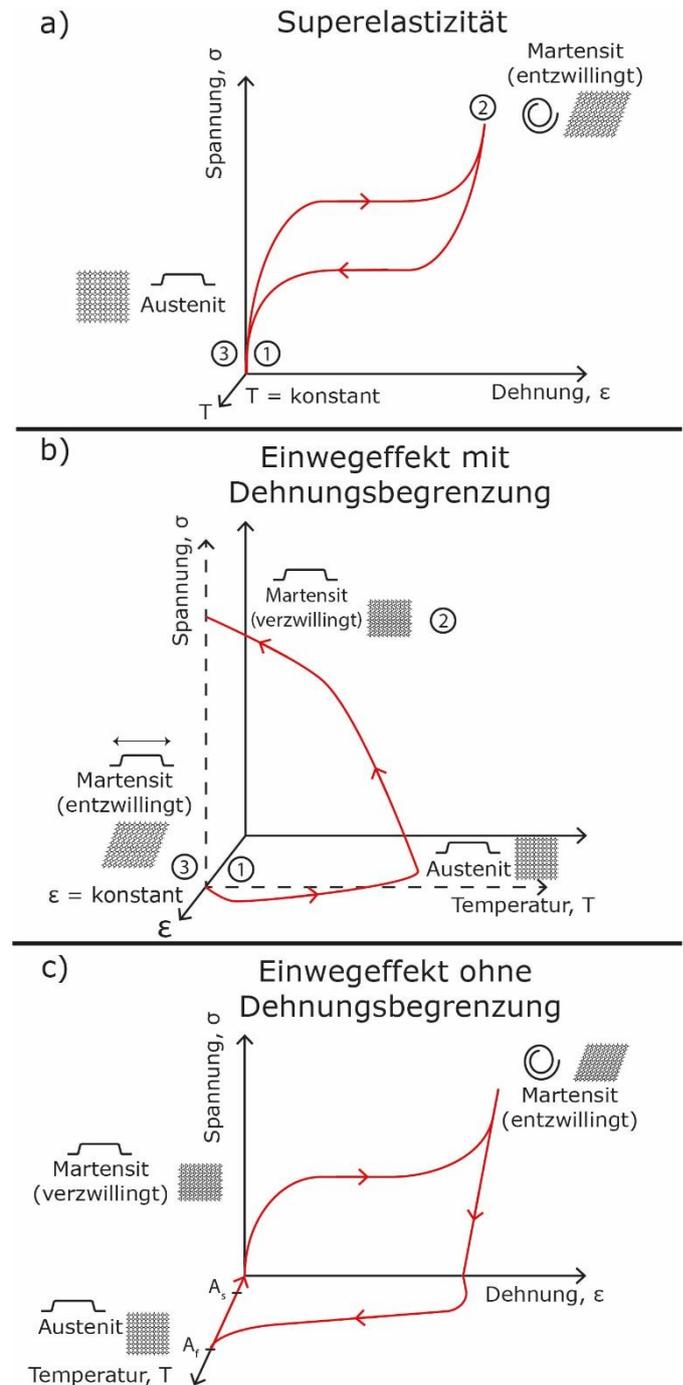


Abbildung 1 Schematische Darstellung der drei untersuchten Formgedächtniseffekte im Spannungs-Dehnungs-Temperaturdiagramm. a) Superelastizität. b) Einwegeffekt mit Dehnungsbegrenzung. c) Einwegeffekt ohne Dehnungsbegrenzung.

Eisenbasierte FGL haben sich als geeignete Alternativen zu Ni-Ti FGL erwiesen, so dass es bereits erste Anwendungen vor allem im Bereich der Instandsetzung von Strukturen mit Fe-Mn-Si-basierten FGL gibt. [24–27]. Es bestehen jedoch noch erhebliche Herausforderungen, z. B. in Bezug auf die langfristige Stabilität der Vorspannung und das Ermüdungsverhalten [7; 22].

Diese Arbeit zeigt neue Anwendungen für Formgedächtnislegierungen als Bewehrungsmaterial in UHPC sowie bekannte Anwendungen mit neuen Materialien. Diese Methoden ermöglichen eine Verbesserung der Verarbeitbarkeit von Frischbeton sowie die Vorspannung von UHPC-Elementen mit einer neuartigen Fe-Mn-Al-Ni FGL.

2 Experimentelles

2.1 Fe-Mn-Al-Ni Formgedächtnislegierungen für Vorspannungsanwendungen

Die Fe-Mn-Al-Ni Formgedächtnislegierung ist seit den frühen 2010er Jahren in den Fokus der Forschung über metallische Werkstoffe gekommen [28]. Das Material wies vielversprechende superelastische Eigenschaften auf [29; 30]. Doch auch pseudoplastische Eigenschaften wurden durch gezieltes Materialdesign in den Werkstoff integriert und zeigen ebenfalls erfolgsversprechende erste Ergebnisse [26].

Für eine Anwendung als Vorspannelement in UHPC muss das FGL-Element vor der Aktivierung im Bauelement gedehnt werden. Es ist wichtig, dass die Aktivierung der FGL hier im erhärteten Beton erfolgt (Abbildung 2). Bei Erwärmung wird so der Einwegeffekt des Elementes aktiviert.

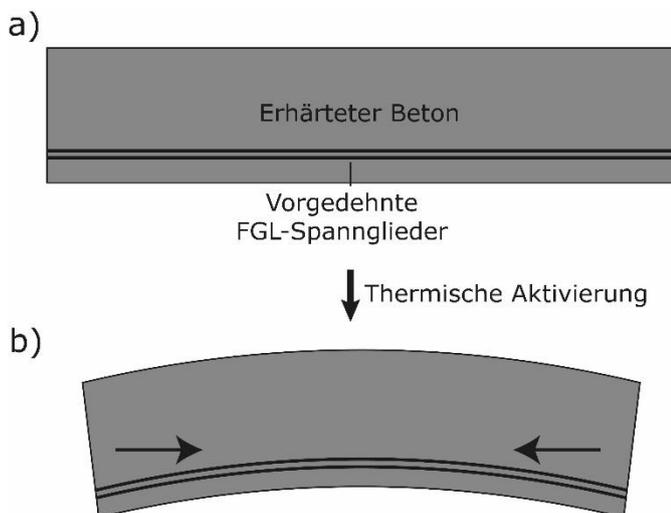


Abbildung 2 Prinzip der Vorspannung von Beton mittels Formgedächtnislegierungen.

Dabei müssen jedoch zwei parallele Effekte berücksichtigt werden. Zum einen dehnt sich das FGL-Material infolge des Temperaturanstiegs aus, und zum anderen kommt es beim Überschreiten der Austenit-Starttemperatur zur Phasentransformation des durch die Vordehnung verformten Martensits in die austenitische Hochtemperaturphase. Mit fortschreitender Phasenumwandlung bei Temperaturerhöhung (das Material zieht sich zusammen), wird die Temperaturexpansion des Werkstoffs durch den Formgedächtniseffekt (über)kompensiert und es kommt zu einem

leichten Anstieg der Spannung. Wenn das Material im weiteren Verlauf wieder abkühlt, kommt es zu einer (thermisch induzierten) Schrumpfung des FGL-Vorspannelements infolge der Temperaturabsenkung und damit verbunden durch den Verbund zur Betonmatrix zu dem Aufbringen einer Vorspannung. Dies geschieht bis zu dem Punkt, an dem sich wieder spannungsinduzierter Martensit bildet. Diese Methode hat im Vergleich zu dem gewöhnlich genutzten Spannstahl den Vorteil, dass keine komplexe Spannvorrichtung notwendig ist. Außerdem kann im Falle eines Vorspannverlustes aufgrund von Schwinden oder Kriechen des Betons [31] ein Nachspannen durch eine erneute thermische Aktivierung durchgeführt werden.

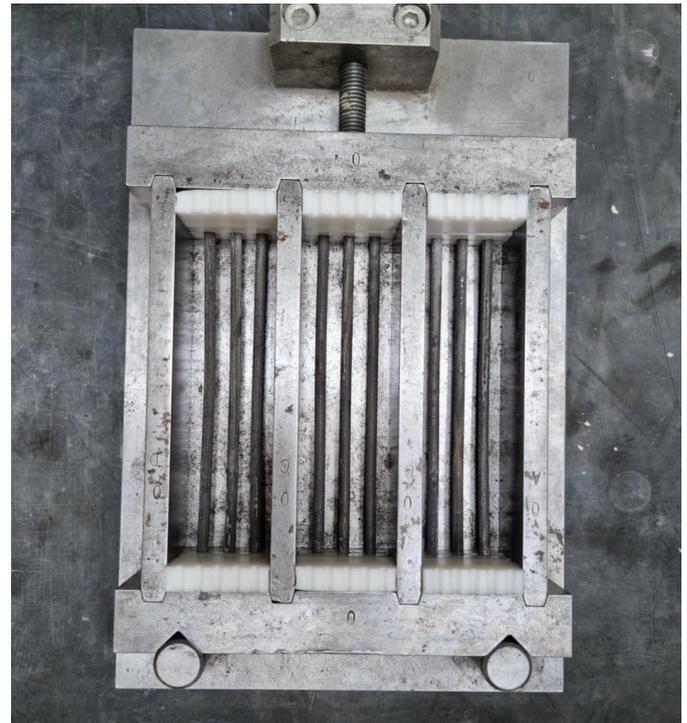


Abbildung 3 Foto einer Prismenschalung für die Herstellung der Probekörper (140 mm x 40 mm x 40 mm). Die FGL-Stäbe sind mit Plastikvorrichtungen in einem Abstand von 10 mm von dem Boden der Schalung fixiert. Aus [32].

So wurde in Voruntersuchungen an knochenförmigen Probekörpern (Messlänge: 18 mm, Querschnitt: 1,6 mm x 1,5 mm) der Fe-Mn-Al-Ni FGL Vorspannungen von bis zu etwa 485 MPa nachgewiesen [26]. Bezüglich des Einsatzes als Vorspannelement in UHPC basiert das Aufbringen der Vorspannung auf den optimalen Verbund zwischen FGL-Element und Betonmatrix. Dieser muss stark genug sein, um die auftretenden Spannungen übertragen zu können, ohne dabei zu versagen. Dies lässt sich z.B. durch einen Formschluss der Bewehrungselemente oder das Modifizieren der Bewehrungsoberfläche erreichen [25; 33; 34]. Erste Versuche mit einer Stabbewehrung (Länge: 160 mm, Durchmesser: 5 mm; Abbildung 3) aus der genannten Fe-Mn-Al-Ni-FGL als Bewehrungselement in UHPC-Prismen zeigen, dass eine Erhöhung der maximalen Biegezugfestigkeit durch die Aktivierung des Formgedächtniseffektes erreicht werden kann [32].

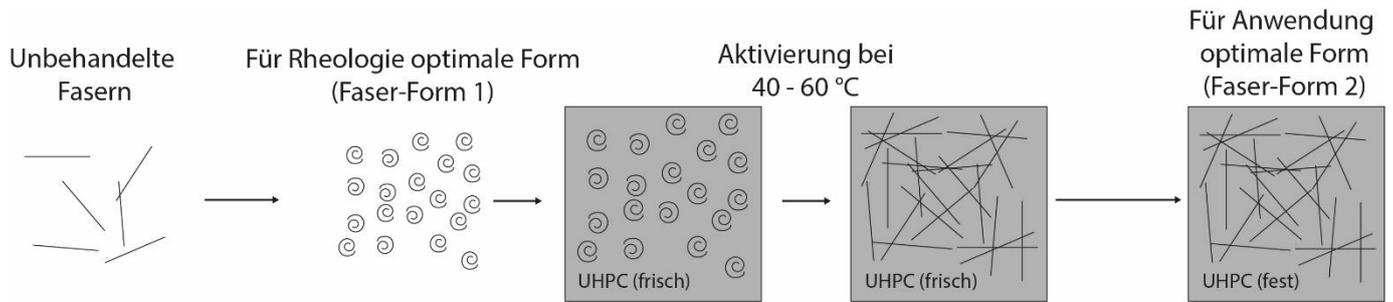


Abbildung 4 Prinzip zur Optimierung der Frischbetoneigenschaften von UHPC durch den Einsatz von ringförmigen FGL-Fasern

Dazu wurden die Stäbe vor dem Einbringen in den Beton um 2 % gedehnt und 7 Tage nach Herstellung bei 200 °C in einem Ofen thermisch aktiviert. Weiterhin wurde gezeigt, dass seine größere Verformung aufgenommen werden kann, bevor ein Lastabfall zu beobachten ist.

Die Untersuchungen haben jedoch auch gezeigt, dass vor allem in Bezug auf das Legierungsdesign noch weiterer Forschungsbedarf besteht. Noch ist das Legierungssystem nicht stabil genug, dass eine großvolumige und industrielle Fertigung der Bewehrungselemente erfolgen kann. So führte eine nicht optimale metallische Mikrostruktur zu geringen Vorspannungsniveaus. Andere eisenbasierte FGL zeigen diesbezüglich ein höheres Vorspannungsvermögen [35]. Die an den knochenförmigen Proben gemessene Vorspannung von 485 MPa konnte an den Bewehrungselementen in Bauteilgröße nicht erreicht werden. Lediglich eine Vorspannung von etwa 130 MPa konnte ermittelt werden. Zukünftige Untersuchungen werden sich auf das Aufbringen einer Vorspannung über eine Faserbewehrung fokussieren. Zurzeit ist eine verlässliche Prozessierung der Fe-Mn-Al-Ni Legierung auf Fasergröße nicht verlässlich möglich.

2.2 Formgedächtnislegierungen für die Optimierung der Frischbetoneigenschaften

Der Einsatz von FGL für die Optimierung der Frischbetoneigenschaften bedient sich ebenfalls des Einwegeffektes der FGL. Der große Unterschied besteht hier jedoch darin, dass die Aktivierung noch im frischen Zustand des Betons stattfindet. Erste Versuche mit einer Faserbewehrung aus Ni-Ti FGL zeigen, dass eine Verringerung der plastischen Viskosität sowie der Fließgrenze des Frischbetons erreicht werden kann [36]. Vor der Transformation der FGL-Fasern werden sie in eine Geometrie gebracht, die sich positiv auf die Rheologie des Frischbetons auswirkt; z.B. Faserkringel (siehe Faser-Form 1 in Abbildung 4). Dies sollte die Verwendung eines deutlich höheren Faservolumenanteils im Vergleich zu geraden Fasern ermöglichen, aber auch den Einsatz längerer Fasern erlauben. Durch die Kringelform wird einer Igelbildung der Fasern entgegengewirkt. Durch den erhöhten Faservolumenanteil sowie ein besseres Faser-Aspektverhältnis kann eine deutliche Erhöhung der Zugfestigkeit des Festbetons sowie ein stark verbessertes Nachbruchverhalten erreicht werden. Daraus resultiert, dass sehr filigrane und komplexe Betonstrukturen sowie ultradünne Betonteile für die Instandsetzung von Infrastrukturen realisiert werden können. Um dies zu erreichen werden die Fasern auf eine materialspezifische Umwand-

lungstemperatur erwärmt, um so in eine für die Festbetoneigenschaften förderliche Form zurückzukehren. So können gute Frischbetoneigenschaften mit guten mechanischen Eigenschaften des Festbetons verbunden werden (Abbildung 4).

Gerland et al. untersuchten verschiedene Messmethoden (Beton- und Mörtelrheometer) zur Quantifizierung des Einflusses der Faserbewehrung auf frischen UHPC [37]. Dabei wurde folgendes Modell für die Frischbetoneigenschaften beschrieben:

$$M = R^2 \mu \Omega D (a_0 + a_1) \left[\frac{\tau_y R}{(\mu \Omega D)^{a_2}} \right] \quad (1),$$

wobei M das Drehmoment des Rheometers, R und D geometrische Parameter des Rheometers, μ und τ_y die plastische Viskosität und die Fließgrenze des Frischbetons, Ω die Rotationsgeschwindigkeit der der Probekörper, und a_0 , a_1 und a_2 die geometriespezifischen Koeffizienten des Rheometers sind. Mithilfe dieses Modells konnte gezeigt werden, dass es bei ringförmigen Fasern im Vergleich zu den traditionell eingesetzten geraden Fasern zu einer Verringerung der plastischen Viskosität und der Fließgrenze von frischem UHPC um etwa 30 % bei gleichem Fasergehalt kommt (Abbildung 5) [38; 39]. Dies geht mit einer signifikanten Verbesserung der Verarbeitbarkeit einher.

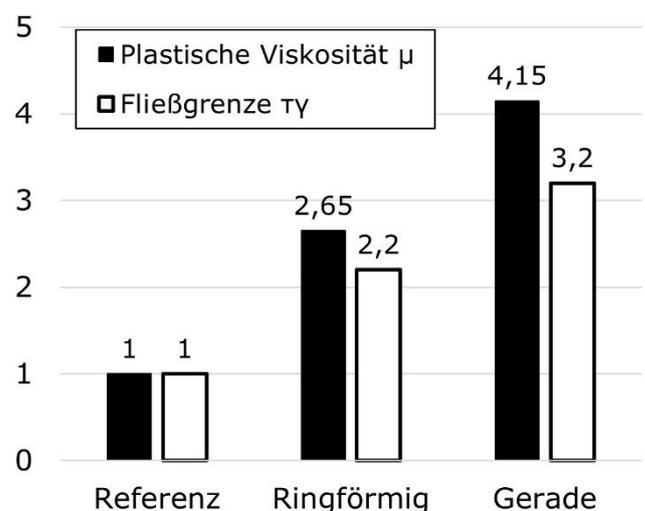


Abbildung 5 Einfluss von ringförmigen und geraden Fasern auf die plastische Viskosität sowie Fließgrenze von faserbewehrtem UHPC. Parameter wurden basierend auf dem in Formel (1) dargestellten Modell experimentell ermittelt. Werte aus [36].

Weiterhin wurde auch der umgekehrte Einfluss des Frischbetons auf die Formänderung der Fasern untersucht. So könnte eine behinderte und unvollständige Umwandlung der FGL-Fasern die Folge sein oder umgekehrt, die Bildung von Furchen in der Betonmatrix aufgrund der Faserumwandlung die Folge einer zu steifen Frischbetonkonsistenz sein.

Versuche mit geraden Fasern mit Endhaken aus einer Ni-Ti FGL zeigen, dass die Umwandlung von Fasern mit einem Durchmesser zwischen 0,2 – 0,5 mm und einer Länge von 17 mm in der aus dem SPP 1182 bekannten UHPC-Rezeptur „M3Q“ [40] möglich ist. Die Aktivierung der Fasern erfolgte dabei durch die Erwärmung des Betons in einem Ofen auf 60 °C über die materialspezifische Umwandlungstemperatur A_f der Fasern. Oberhalb dieser Temperatur wird der Formgedächtniseffekt ausgelöst und die ringförmigen Fasern gehen in die eingeprägte Form (hier die gerade Faser-Form 2, Abbildung 4) zurück. Zur besseren Sichtbarkeit wurden fünf einzelne Fasern in Frischbeton eingebracht, der dann in einem Laborofen auf 60 °C ($> A_f$; gemessen mit einem Temperaturmessfühler im Frischbeton) erhitzt wurde. Nach dem Aushärten wurde die Umwandlung der Fasern mit einem μ -Computertomographen (μ -CT) vom Typ XRadia 520 Versa der Firma Carl Zeiss Microscopy visualisiert. Auf den μ -CT-Bildern ist deutlich zu erkennen, dass die Umformung der ursprünglich gekringelten Fasern in gerade Fasern mit Endhaken weitgehend erfolgreich war (Abbildung 6). Eine Furchenbildung als Folge der Umformung der Fasern war nicht sichtbar. Luft und Kapillarporen sind homogen verteilt, was auf eine ungestörte Betonmatrix hinweist (Abbildung 6 b und c).

Eine weitere Möglichkeit zur thermischen Aktivierung der Fasern ist die Induktion. Bei der induktiven Aktivierung der Fasern in der Betonmatrix beschränkt sich der Temperatureinfluss nur auf die Fasern selbst und die direkten Bereiche um die Fasern. Dies führt zu einer nur eng begrenzten lokalen Veränderung des rheologischen Verhaltens des Frischbetons auf mikrostruktureller Ebene und ist daher eine für die Betonmatrix schonendere Methode zur Aktivierung des Formgedächtniseffekts.

3 Zusammenfassung und Ausblick

Durch die Kombination von Hoch- und Ultrahochleistungsbetonen mit Formgedächtnislegierungen wird eine neue, nachhaltige, innovative und funktionale Generation von Baustoffen ermöglicht. Die Verwendung von FGL und die Ausnutzung des Formgedächtniseffektes ermöglichen die

Realisierung von Bauteilen und Bauwerken mit deutlich erhöhter Sicherheit und Lebensdauer. Gleichzeitig kann der CO₂-intensive Materialeinsatz von Baustoffen aufgrund verbesserter mechanischer und herstellungstechnischer Eigenschaften deutlich reduziert werden. So wird es beispielsweise der Formgedächtniseffekt möglich machen dem Baustoff Beton neue Eigenschaften zuzuweisen und das Vorspannen von tragenden Elementen dauerhaft ohne Spannverlust zu realisieren. Damit eröffnen sich völlig neue Möglichkeiten für die Planung und Realisierung von leichten und effizienten Betonstrukturen. Neuartige gekoppelte Formgedächtniseffekte können außerdem parallel zu neuen Konzepten für tragende Bauteile, deren Verbindungen und schwingungsdämpfendes Design untersucht werden. Dazu können ein modellgestütztes Legierungsdesign zur Identifizierung neuer, leistungsfähiger Legierungsvarianten verbunden mit experimentell untermauerten Screening-Ansätzen im Bereich der metallischen Werkstoffe genutzt werden. Diese müssen im Einklang mit den Anforderungen und Absichten der Konstruktion durchgeführt werden, um Anwendungsprofile optimal erfüllen zu können und den Kombinationswerkstoff aus Beton und Formgedächtnislegierung effektiv nutzen zu können.

Neben den gezeigten Anwendungsmöglichkeiten von FGL in (U)HPC also Vorspannelement sowie als Rheologie-optimierende Faserbewehrung gibt es zurzeit jedoch noch viele ungeklärte Fragen:

1. Wie wirken sich FGL-Fasern unterschiedlicher Geometrie und erhöhter Volumenanteile (> 3 Vol.-%) auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften aus?
2. Wie wirken sich verschiedene Fasergeometrien auf die Faserverteilung und -orientierung aus und kann dies zur Verbesserung bestimmter Eigenschaften des Festbetons genutzt werden?
3. Wie muss der Beton zusammengesetzt sein, um eine optimale Faserverteilung zu gewährleisten und die Umformung der Fasern nicht zu behindern?
4. Wie verhält sich der Frischbeton bei lokaler Erwärmung um die Fasern und welche Auswirkungen hat dies auf die Festbetoneigenschaften?
5. Wie übertragen sich Spannungen auf den Festbeton, die durch den Formgedächtniseffekt erzeugt werden?
6. Wie muss die Grenzflächenübergangzone zwischen Faser und Beton verstärkt werden, um die auftretenden Spannungen von der Faser auf die Betonmatrix effektiv übertragen zu können?

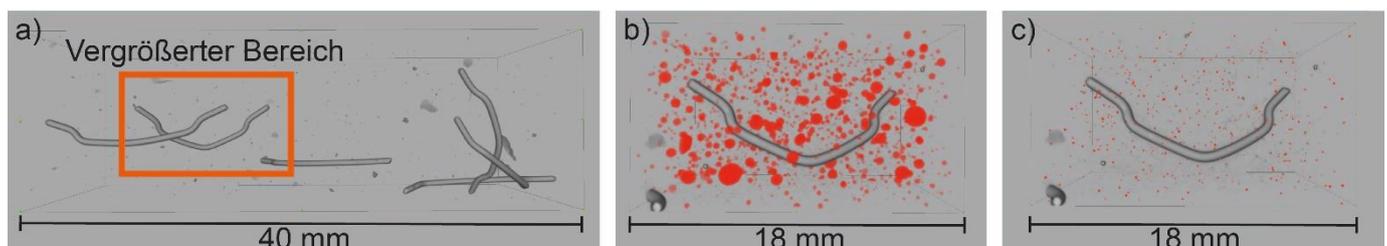


Abbildung 6 μ -computertomographische Aufnahme eines UHPC-Probekörpers mit fünf Ni-Ti FGL-Fasern nach thermischer Aktivierung. a) Übersichtsaufnahme der Probe mit Abmessungen von 40 mm x 15 mm x 15 mm (Auflösung der Aufnahme: 36 μ m/Voxel). b) Nahaufnahme des in a) markierten Bereiches. Luftporen mit einem Durchmesser < 1 mm sind rot dargestellt. c) Nahaufnahme des in a) markierten Bereiches. Poren mit einem Durchmesser < 150 μ m sind rot dargestellt.

Referenzen

- [1] Fehling, E.; Schmidt, M.; Walraven, J.C.; Leutbecher, T.; Fröhlich, S. (2014) *Ultra-High Performance Concrete UHPC – Fundamentals, Design, Examples*. s.l.: Ernst & Sohn.
- [2] Schmidt, M.; Fehling, E.; Fröhlich, S.; Thiemicke, J. [Hrsg.] (2014) *Nachhaltiges Bauen mit Ultrahochfestem Beton. Ergebnisse des Schwerpunktprogrammes 1182 gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)*. Kassel: Kassel University Press.
- [3] Bornemann, R.; Schmidt, M.; Fehling, E.; Middendorf, B. (2001) *Ultra-Hochleistungsbeton UHPC – Herstellung, Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten*. Beton- und Stahlbetonbau 96, H. 7, pp. 458–467. <https://doi.org/10.1002/best.200100550>
- [4] Bertram, G.; Hegger, J. (2014) *Spannbetonträger aus UHPC* in: Schmidt, M. et al. [Hrsg.] *Nachhaltiges Bauen mit Ultrahochfestem Beton. Ergebnisse des Schwerpunktprogrammes 1182 gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)*. Kassel: Kassel University Press, pp. 601–629.
- [5] Zilch, K.; Weiher, H. (2008) *120 Jahre Spannbetonbau – von Doebling und Jackson bis heute*. Beton- und Stahlbetonbau 103, H. 6. <https://doi.org/10.1002/best.v103:6>
- [6] Lagoudas, D. C. (2008) *Shape Memory Alloys*. Boston, MA: Springer US.
- [7] Janke, L. (2005) *Applications of shape memory alloys in civil engineering structures – Overview, limits and new ideas*. Materials and Structures 38, H. 279, pp. 578–592. <https://doi.org/10.1617/14323>
- [8] Concilio, A.; Antonucci, V.; Auricchio, F.; Lecce, L.; Sacco, E. [Hrsg.] (2021) *Shape memory alloy engineering – For aerospace, structural and biomedical applications*. Oxford, Cambridge: Elsevier Butterworth-Heinemann.
- [9] Fehling, E.; Middendorf, B.; Thiemicke, J.; Vollmer, M.; Bauer, A.; Niendorf, T.; Oertzen, V. V.; Kiefer, B. (2022) *Functional elements exploiting superelasticity and the shape memory effect of Fe-Mn-Al-Ni-X Shape-Memory-Alloys in structural engineering* in: Zingoni, A. [Hrsg.] *Current Perspectives and New Directions in Mechanics, Modelling and Design of Structural Systems*. London: CRC Press, pp. 153–158.
- [10] Cladera, A.; Weber, B.; Leinenbach, C.; Czaderski, C.; Shahverdi, M.; Motavalli, M. (2014) *Iron-based shape memory alloys for civil engineering structures: An overview*. Construction and Building Materials 63, pp. 281–293. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.032>
- [11] Zareie, S.; Issa, A.S.; Seethaler, R.J.; Zabihollah, A. (2020) *Recent advances in the applications of shape memory alloys in civil infrastructures: A review*. Structures 27, S. 1535–1550. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.05.058>
- [12] Graesser, E. J.; Cozzarelli, F. A. (1991) *Shape-Memory Alloys as New Materials for Aseismic Isolation*. Journal of Engineering Mechanics 117, H. 11, pp. 2590–2608. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1991\)117:11\(2590\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1991)117:11(2590))
- [13] Witting, P. R.; Cozzarelli, F. A. (1992) *Shape Memory Structural Dampers: Design and Seismic Testing – Technical Report NCEER-92-0013* (State University of New York at Buffalo).
- [14] Indirli, M.; Forni, M.; Martelli, A.; Spadoni, B.; Venturi, G.; Alessandri, C.; Bertocchi, A.; Cami, R.; Capelli, C.; Baratta, A.; Procaccio, A.; Clemente, P.; Canio, G.; Carpani, B.; Bonacina, G.; Franchioni, G.; Viani, S.; Cesari, F.; Mucciarella, M.; Meucci, C. (2001) *Further New Projects in Italy for the Development of Innovative Techniques for the Seismic Protection of Cultural Heritage* in: *Proceedings of the 7th International Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Vibrations of Structures*. Assisi, Italy.
- [15] Indirli, M.; Castellano, M.G.; Clemente, P.; Martelli, A. (2001) *Demo-application of shape memory alloy devices: the rehabilitation of the S. Giorgio Church bell tower* in: Liu, S.-C. [Hrsg.] *SPIE's 8th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*. Newport Beach, CA. SPIE, pp. 262–272.
- [16] Indirli, M.; Castellano, M. G. (2008) *Shape Memory Alloy Devices for the Structural Improvement of Masonry Heritage Structures*. International Journal of Architectural Heritage 2, H. 2, pp. 93–119. <https://doi.org/10.1080/15583050701636258>
- [17] Benavent-Climent, A. (2008) *Development and Application of Passive Structural Control Systems in the Moderate-Seismicity Mediterranean Area: The Case of Spain* in: *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*. Beijing, China.
- [18] Saiidi, M.; Wang, H. (2006) *Exploratory Study of Seismic Response of Concrete Columns with Shape Memory Alloys Reinforcement*. ACI Structural Journal 103, H. 3, pp. 435–442. <https://doi.org/10.14359/15322>
- [19] Alam, M. S.; Youssef, M. A.; Nehdi, M. (2008) *Analytical prediction of the seismic behaviour of superelastic shape memory alloy reinforced concrete elements*. Engineering Structures 30, H. 12, pp. 3399–3411. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.05.025>
- [20] Abdulridha, A.; Palermo, D.; Foo, S.; Vecchio, F.J. (2013) *Behavior and modeling of superelastic shape memory alloy reinforced concrete beams*. Engineering Structures 49, pp. 893–904. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.12.041>

- [21] Choi, E.; Kim, D.J.; Hwang, J.H.; Kim, W.J. (2016) *Prestressing effect of cold-drawn short NiTi SMA fibres in steel reinforced mortar beams*. *Smart Materials and Structures* 25, H. 8. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/25/8/085041>
- [22] Chang, W.-S.; Araki, Y. (2016) *Use of shape-memory alloys in construction: a critical review* in: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering* 169, H. 2, pp. 87–95. <https://doi.org/10.1680/jcien.15.00010>
- [23] Choi, E.; Cho, S.C.; Hu, J.W.; Park, T.; Chung, Y.S. (2010) *Recovery and residual stress of SMA wires and applications for concrete structures*. *Smart Materials and Structures* 19, H. 9. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/19/9/094013>
- [24] Shahverdi, M.; Michels, J.; Czaderski, C.; Motavalli, M. (2018) *Iron-based shape memory alloy strips for strengthening RC members: Material behavior and characterization*. *Construction and Building Materials* 173, pp. 586–599. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.057>
- [25] Kromoser, B.; Strieder, E.; Kirnbauer, J. (2019) *Selbstvorspannende ultrahochfeste Betonelemente*. *Beton- und Stahlbetonbau* 114, H. 5, pp. 315–326. <https://doi.org/10.1002/best.201900014>
- [26] Vollmer, M.; Bauer, A.; Frenck, J.-M.; Krooß, P.; Wetzel, A.; Middendorf, B.; Fehling, E.; Niendorf, T. (2021) *Novel prestressing applications in civil engineering structures enabled by Fe Mn Al Ni shape memory alloys*. *Engineering Structures* 241. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112430>
- [27] Arabi-Hashemi, A.; Lee, W. J.; Leinenbach, C. (2018) *Recovery stress formation in FeMnSi based shape memory alloys: Impact of precipitates, texture and grain size*. *Materials & Design* 139, pp. 258–268. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.11.006>
- [28] Omori, T.; Nagasako, M.; Okano, M.; Endo, K.; Kainuma, R. (2012) *Microstructure and martensitic transformation in the Fe-Mn-Al-Ni shape memory alloy with B2-type coherent fine particles*. *Applied Physics Letters* 101, H. 23. <https://doi.org/10.1063/1.4769375>
- [29] Omori, T.; Okano, M.; Kainuma, R. (2013) *Effect of grain size on superelasticity in Fe-Mn-Al-Ni shape memory alloy wire*. *APL Materials* 1, H. 3. <https://doi.org/10.1063/1.4820429>
- [30] Tseng, L. W.; Ma, J.; Wang, S. J.; Karaman, I.; Kaya, M.; Luo, Z. P.; Chumlyakov, Y. I. (2015) *Superelastic response of a single crystalline FeMnAlNi shape memory alloy under tension and compression*. *Acta Materialia* 89, pp. 374–383. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.01.009>
- [31] Li, S.; Yang, Y.; Pu, Q.; Yang, D.; Sun, B.; Li, X. (2019) *Three-dimensional nonlinear creep and shrinkage effects of a long-span prestressed concrete box girder bridge*. *Structural Concrete* 20, H. 2, pp. 638–649. <https://doi.org/10.1002/suco.201800148>
- [32] Schleiting, M.; Wetzel, A.; Bauer, A.; Freck, J.M.; Niendorf, T.; Middendorf, B. (2023) *Potential of Fe-Mn-Al-Ni Shape Memory Alloys for internal Prestressing of Ultra-High Performance Concrete*. *Materials*, under review.
- [33] Schleiting, M.; Klier, K.; Wiemer, N.; Wetzel, A.; Zarges, J.C.; Heim, H.P.; Middendorf, B. (2023) *Fibre pullout behaviour of fibre-reinforced UHPC with TPE-coated fibres*. *Construction and Building Materials* 376. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131043>
- [34] Wiemer, N.; Wetzel, A.; Schleiting, M.; Krooß, P.; Vollmer, M.; Niendorf, T.; Böhm, S.; Middendorf, B. (2020) *Effect of Fibre Material and Fibre Roughness on the Pullout Behaviour of Metallic Micro Fibres Embedded in UHPC*. *Materials (Basel, Switzerland)* 13, H. 14. <https://doi.org/10.3390/ma13143128>
- [35] Shahverdi, M.; Czaderski, C.; Motavalli, M. (2016) *Iron-based shape memory alloys for prestressed near-surface mounted strengthening of reinforced concrete beams*. *Construction and Building Materials* 112, pp. 28–38. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.174>
- [36] Schleiting, M.; Wetzel, A.; Krooß, P.; Thiemicke, J.; Niendorf, T.; Middendorf, B.; Fehling, E. (2020) *Functional microfibre reinforced ultra-high performance concrete (FMF-UHPC)*. *Cement and Concrete Research* 130. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.105993>
- [37] Gerland, F.; Wetzel, A.; Schomberg, T.; Wunsch, O.; Middendorf, B. (2019) *A simulation-based approach to evaluate objective material parameters from concrete rheometer measurements*. *Applied Rheology* 29, H. 1, pp. 130–140. <https://doi.org/10.1515/arh-2019-0012>
- [38] Gerland, F.; Schleiting, M.; Schomberg, T.; Wunsch, O.; Wetzel, A.; Middendorf, B. (2020) *The Effect of Fiber Geometry and Concentration on the Flow Properties of UHPC* in: Mechtcherine, V.; Khayat, K.; Secieru, E. [Hrsg.] *Rheology and Processing of Construction Materials*. Cham: Springer International Publishing, pp. 482–490.
- [39] Schleiting, M.; Wetzel, A.; Gerland, F.; Niendorf, T.; Wunsch, O.; Middendorf, B. (2020) *Improvement of UHPFRC-Rheology by Using Circular Shape Memory Alloy Fibres* in: Mechtcherine, V.; Khayat, K.; Secieru, E. [Hrsg.] *Rheology and Processing of Construction Materials*. Cham: Springer International Publishing, pp. 142–148.

- [40] Schmidt, M. (2013) *Sustainable building with ultra-high performance concrete (UHPC) – coordinated research program in Germany* Sustainable building with ultra-high performance concrete (UHPC) – coordinated research program in Germany in: Zingoni, A. [Hrsg.] *Research and Applications in Structural Engineering, Mechanics and Computation*. CRC Press, S. 587–588.