

## Nachhaltiges Konstruieren und Bauen mit nichtmetallischen Bewehrungen

<b>1. Zielerreichung und Projektstatus .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Durchgeführte Arbeiten im Berichtszeitraum .....</b>	<b>1</b>
<b>2.1. Projektleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2.2. Wissenschaftliche Leitung .....</b>	<b>2</b>
<b>2.3. Technische Spezifikationen für den österreichischen Markt .....</b>	<b>2</b>
<b>2.4. Materialcharakterisierung von neuartigen Bewehrungen .....</b>	<b>9</b>
<b>2.5. Materialgerechtes Konstruieren .....</b>	<b>14</b>
<b>3. Erläuterung von wesentlichen Änderungen bei den Kosten .....</b>	<b>19</b>
<b>4. Beitrag der Projektergebnisse zur Nachhaltigkeit .....</b>	<b>19</b>

### 1. Zielerreichung und Projektstatus

Erklärtes Hauptziel des beantragten Forschungsprojektes ist es die bestehenden Barrieren, die eine breitere Anwendung von nichtmetallischen Bewehrungen in der österreichischen Bauindustrie behindern, abzubauen und den Werkstoff der gesamten heimischen Branche zugänglich zu machen. Um dieses ehrgeizige Ziel zu erreichen, wird das vorhandene interdisziplinäre Know-How des Konsortiums genutzt und gezielte Entwicklungsschwerpunkte im Bereich der nichtmetallischen Bewehrungen gesetzt:

**Z1: Fehlendes Grundlagenwissen für eine praxismgerechte Materialnutzung erarbeiten**

**Z2: Technische Spezifikationen für den österreichischen Markt festlegen**

**Z3: Bemessungs- und Designkriterien zum nachhaltigen Bauen ableiten**

Die zentralen Forschungsinhalte konzentrieren sich auf Bereiche, in denen Wissenslücken identifiziert wurden bzw. neue Entwicklungen noch nicht in der bestehenden Fachliteratur abgebildet sind.

Die Ziele sind weiterhin aktuell. In zahlreichen Gesprächen mit Fachkolleg\*innen aus Deutschland hat sich zudem gezeigt, dass die Arbeit eine sehr hohe Relevanz für den österreichischen Markt und darüber hinaus haben.

Die Ziele für das erste Forschungsjahr wurden vollständig erreicht. Insbesondere konnte durch die erfolgreiche Durchführung eines umfangreichen Ringversuchs die Grundlagen für einen Industriestandard in Österreich etabliert werden. Eine erster Konferenzbeitrag zu diesem Thema wurde zur Veröffentlichung angenommen und wird auf der RILEM spring convention 2026 in Ghent vorgestellt.

Als weiteres wesentliches Highlight konnten die Vorbereitungen für die Dauerstand- und Ermüdungsversuche zu nichtmetallischen Bewehrungen abgeschlossen werden. Die Durchführung der Versuche ist für 2026 geplant und sind von hoher wissenschaftlicher und branchenspezifischer Relevanz.

### 2. Durchgeführte Arbeiten im Berichtszeitraum

#### 2.1. Projektleitung

**Fertigstellungsgrad: 100%**

Neben der Vertretung gegenüber der FFG umfasste die Projektleitung im Berichtszeitraum auch die **terminliche und kaufmännische Projektkoordination**, die Organisation von Projektmeetings, die Koordination der Kommunikation zwischen den Projektpartner:innen sowie das Vertrags- und Kostenmanagement. Zusätzlich wurden administrative Aufgaben der Projektorganisation übernommen, wie die Abstimmung von Arbeitsplänen, die Erstellung von Zwischen- bzw. Endberichten und die termingerechte Einholung von Partnerbeiträgen.

## **2.2. Wissenschaftliche Leitung**

### **Fertigstellungsgrad: 100%**

Alle geplanten Arbeitsschritte konnten eingehalten werden. Nachfolgend sind die durchgeführten Arbeiten im ersten Forschungsjahr beschrieben.

#### 2.2.1 Terminliche wissenschaftliche Projektkoordination

In Wien fand ein Kick-off meeting statt, das für die Festlegung der Grundwerte für die Zusammenarbeit (z. B. Transparenz, gegenseitiger Respekt) von entscheidender Bedeutung war. Darüber hinaus wurde an der Förderung eines gemeinsamen Verständnisses der Projektziele, Rollen und Prozesse unter allen Partnern gearbeitet. Dieser Rahmen bildet die Grundlage für eine einheitliche Entscheidungsfindung und operative Abstimmung im gesamten Projekt.

#### 2.2.2 Fachliche wissenschaftliche Projektkoordination

Die Kommunikationsplattform Teams wird genutzt, um die Zusammenarbeit, den Austausch von Dokumenten und Echtzeit-Updates zu zentralisieren. Es finden monatliche Besprechungen der Arbeitspaketleiter statt, um Prioritäten abzustimmen, Engpässe zu beseitigen und die teamübergreifende Koordination sicherzustellen. Die Industriepartner sind zu diesen online-meetings eingeladen teilzunehmen. Zusätzliche Ad-hoc-Besprechungen werden durchgeführt, um die erfolgreiche Umsetzung der Maßnahmen sicherzustellen.

#### 2.2.3 Analyse Projektfortschritt

Es wurde ein Projektplan entwickelt, der die gegenseitigen Abhängigkeiten der Aufgaben aufzeigt. Dieser Plan dient als primäres Instrument zur Überwachung der Umsetzung von Maßnahmen und zur Verfolgung des Fortschritts. Darüber hinaus führen die jeweiligen wissenschaftlichen Projektpartner ihre individuellen Projektpläne, die einen z.T. höheren Detaillierungsgrad aufweisen.

#### 2.2.4 Koordination mit kaufmännischer Projektleitung (ÖBV)

Es finden halbjährliche Meetings mit dem gesamten Konsortium statt, wo die kaufmännische Projektleitung in diesem Bereich relevante Themen koordiniert. Zusätzlich findet ein regelmäßiger Austausch zwischen der wissenschaftlichen und kaufmännischen Projektleitung statt.

## **2.3. Technische Spezifikationen für den österreichischen Markt**

### **Fertigstellungsgrad: 100%**

Alle geplanten Arbeitsschritte konnten eingehalten werden. Nachfolgend sind die durchgeführten Arbeiten im ersten Forschungsjahr beschrieben.

#### 2.3.1 Materialdefinitionen

Im Rahmen des Projekts wurde ein Fragebogen für Bewehrungshersteller und einer für Anwender entwickelt, um ein Anforderungskatalog für nichtmetallische Bewehrungen auszuarbeiten. Ziel war es, den Stand der Technik in der Bewehrungsherstellung zu erfassen, die aktuellen Anforderungen der Anwender zu evaluieren sowie Überschneidungen und Differenzen zwischen beiden Gruppen zu identifizieren.

Die Entwicklung der Fragebögen erfolgte in enger Zusammenarbeit mit den wirtschaftlichen Projektpartnern, um frühzeitig fundiertes Feedback zu erhalten und die tatsächlichen Bedürfnisse der Praxis präzise herauszufiltern. Für beide Fragebögen wurde ein zweistufiger Ansatz gewählt: In der ersten Stufe wurden die Fragebögen gemeinsam mit den Projektpartnern überprüft und inhaltlich geschärft. In der zweiten Stufe erfolgte der österreichweite Versand an eine breite Auswahl von Unternehmen der Baubranche, um ein möglichst umfassendes und repräsentatives Meinungsbild sowohl der Hersteller- als auch der Anwenderseite zu gewinnen.

Die Details der Fragebögen mit Information zur Rücklaufquote in Phase 1 sind zur besseren Übersicht in Abbildung 2.3.1 dargestellt.

Zielgruppe	Bewehrungshersteller	Produktanwender
Bezeichnung Fragebogen	Erfahrungen und Potenziale nichtmetallischer Bewehrungen	Status quo und Potenziale nichtmetallischer Bewehrungen
Fragegruppen	5	5
Fragen	30	28
Rückmeldungen	17	4
Teilweise	8	1
Vollständig	9	3
<b>Insgesamt</b>	<b>17</b>	<b>4</b>

Abbildung 2.3.1: Zusammensetzung und Ergebnisse der Fragebögen der ersten Phase

Es zeigte sich, dass z.B. bereits eine Vielzahl unterschiedlicher Produktkombinationen auf dem Markt verfügbar ist und die bestehenden Produkte in den unterschiedlichsten Anwendungsbereichen eingesetzt werden. Eine zusammenfassende Darstellung ist in Abbildung 2.3.2 zu finden.

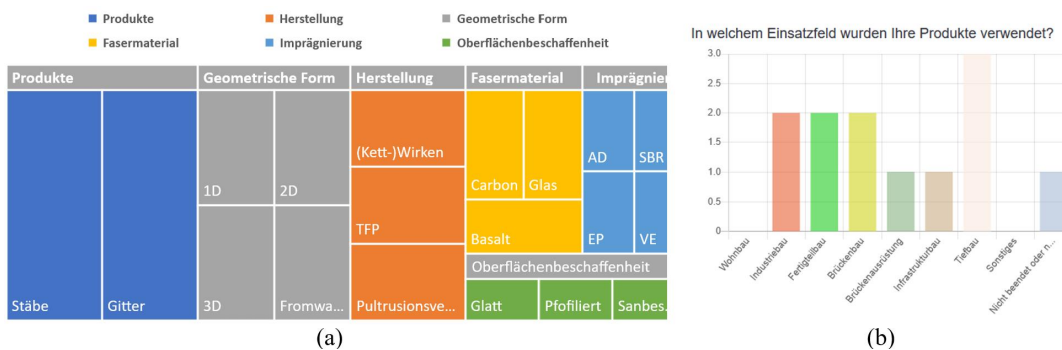


Abbildung 2.3.2: Unterscheidung der Bewehrungsprodukte (a) sowie deren Einsatzgebiete (b)

Bei der Auswertung der Daten traten weitere relevante Aspekte zutage. So haben insbesondere Nachhaltigkeit, Wirtschaftlichkeit und Langlebigkeit einen maßgeblichen Einfluss auf die Entscheidungsfindung im Rahmen von Erneuerungsstrategien.

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse und Rückmeldungen wurde die zweite Phase der Datenerhebung konzipiert. Hierfür liegen 108 Rückmeldungen vor. Die Teilergebnisse sind in Abbildung 2.3.3 dargestellt.

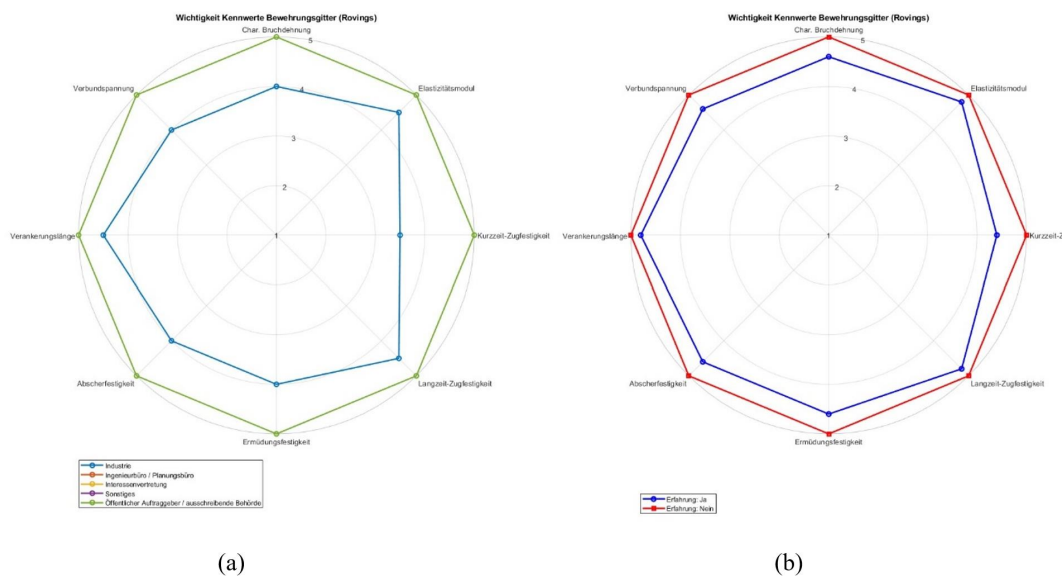


Abbildung 2.3.3: Wichtigkeit der Kennwerte auf einer Skala von 1-5 (a) und Unterscheidung hinsichtlich Bekanntheit der Bauweise (b)

In diesem Diagramm wurde die Relevanz der mechanischen Kennwerte speziell in Bezug auf eine Verwendung im Bauwesen dargestellt. Dabei zeigte sich, dass die mechanischen Kennwerte im Allgemeinen als sehr relevant eingeschätzt werden. Diese Ergebnisse verdeutlichen den Handlungsbedarf, die entsprechenden Kennwerte zuverlässig bestimmen zu können.

### 2.3.2 Round Robin Tests

Die zentrale Motivation für die Durchführung des nachfolgend beschriebenen Ringversuchs besteht darin, eine verlässliche und qualitativ hochwertige Materialcharakterisierung sicherzustellen und zugleich eine nationale Standardisierung der Prüfverfahren zu erreichen. Der wesentliche technische Grund für die Durchführung eines Ringversuchs (Round Robin Test, ein mehrlaboratorienbasiertes Prüfprogramm) besteht darin, die Validität und Zuverlässigkeit der Messdaten zu wesentlichen Materialeigenschaften nachzuweisen. Es ist entscheidend sicherzustellen, dass die Prüfergebnisse nicht von der Ausstattung, dem Personal oder den spezifischen Abläufen eines einzelnen Labors abhängen. Durchgeführt wurden (a) Rovingzugversuche, (b) Dehnkörperversuche und (c) Verbundversuche

Es wurden verschiedene Textilien der Hersteller Hitexbau und Contexmesh geprüft, die sich hinsichtlich Herstellungsart und Fasermaterial unterscheiden (Abbildung 2.3.4).

Material	Hersteller	Herstellungsverfahren	Garnfeinheit (g/1000 m)	Maschenweite
Carbon	Contex Mesh	Tailored fiber placement	3200	21 mm
Basalt	Hitexbau	Warp knitting	2400	21 mm

Abbildung 2.3.4: Verwendete Textilien für die Ringversuche

Für die Betonprüfkörper wurden Betone der Firmen Pagel und Röfix verwendet (Abbildung 2.3.5). Da das Verbund- und Tragverhalten zwischen unterschiedlichen Betonen und der Textilbewehrung variieren kann, erfolgte die Verwendung unterschiedlicher Betonsorten bewusst.

Typ	Hersteller	Korngröße	Druckfestigkeit	E Modul
Creteo® Special CC 222 Pump	RÖFIX	0–4 mm	28 d: $\geq 25$ MPa	$\sim 20$ GPa
UM50 Universal Mortar/Concrete	PAGEL	0–5 mm	28 d: $\geq 45$ MPa	$\geq 20$ GPa

Abbildung 2.3.5: Verwendete Betone für die Ringversuche

Die Dehnkörper und Verbundkörper wurden bei der Firma Oberndorfer GmbH im Gießverfahren hergestellt (Abbildung 2.3.6). Nach dem Gießen wurden die Prüfkörper für 24 Stunden mit einer Kunststoffolie abgedeckt, um den Feuchtigkeitsverlust in der Frühphase zu minimieren. Anschließend wurden sie ausgeschalt und für mindesten 28 Tage unter Laborbedingungen gelagert. Zusätzlich wurden Referenzprobekörper aus den jeweiligen Chargen hergestellt, um die Betoneigenschaften zu bestimmen.

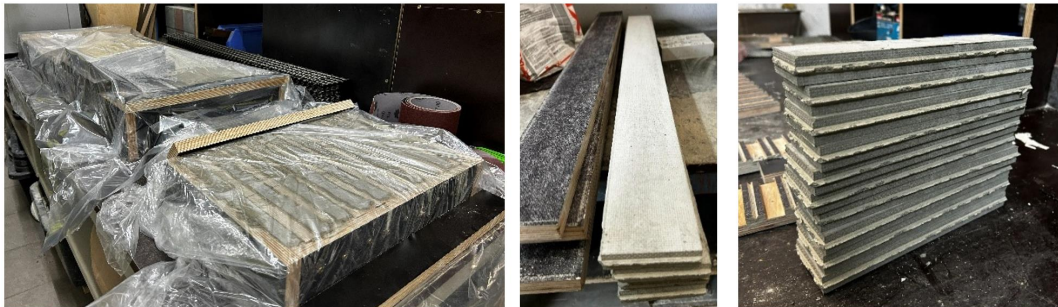


Abbildung 2.3.6: Betonierte Prüfkörper für den Ringversuch

**Methodik:** Die Auswertung der Messdaten erfolgt nach ISO 5725 [1]. Nachfolgend beschreibt die Wiederholpräzision ( $s_r$ ) die Streuung unter konstanten Bedingungen innerhalb eines Labors, während die Zwischenlaborpräzision die Unterschiede zwischen verschiedenen Laboren abbildet. Die Vergleichspräzision ( $s_R$ ) umfasst beide Streukomponenten und entspricht der Streuung unter vollständigen Vergleichsbedingungen. Die Reproduzierbarkeit hingegen berücksichtigt die Variation der Ergebnisse unter veränderten Bedingungen, in diesem Fall zwischen unterschiedlichen Laboratorien.

Die Wiederholpräzision wird aus der Standardabweichung der Messwerte innerhalb eines Labors berechnet. Die Reproduzierbarkeit umfasst sowohl die Wiederholstreuung als auch die Streuung zwischen den Laboratorien und wird gemäß den Vorgaben der ISO 5725 nach Gleichung (1) berechnet.

$$s_R = \sqrt{s_r^2 + s_L^2} \quad (1)$$

Abbildung 2.3.7: Gleichung 1

**Roving-Zugversuche:** Es wurden einzelne Rovings mit einer Prüflänge von 250 mm aus Textilien herausgelöst, wobei die freie Prüflänge zumindest 100 mm zu betragen hatte. Die Rovinge wurden weggesteuert mit einer Prüfgeschwindigkeit von 2,5 mm/min bis zum Bruch belastet. Die Bruchspannung ergibt sich nach Gleichung (2) zu:

$$f_{f,nm,u} = \frac{F_u}{A_{tex}} \quad (2)$$

Abbildung 2.3.8: Gleichung 2

In Abbildung 2.3.7 sind die Ergebnisse der Garnzugversuche in Boxplots dargestellt. Diese zeigen sowohl den Mittelwert jedes Labors als auch den Gesamtmittelwert. Der schattierte Bereich umfasst den Median sowie das erste und dritte Quartil.

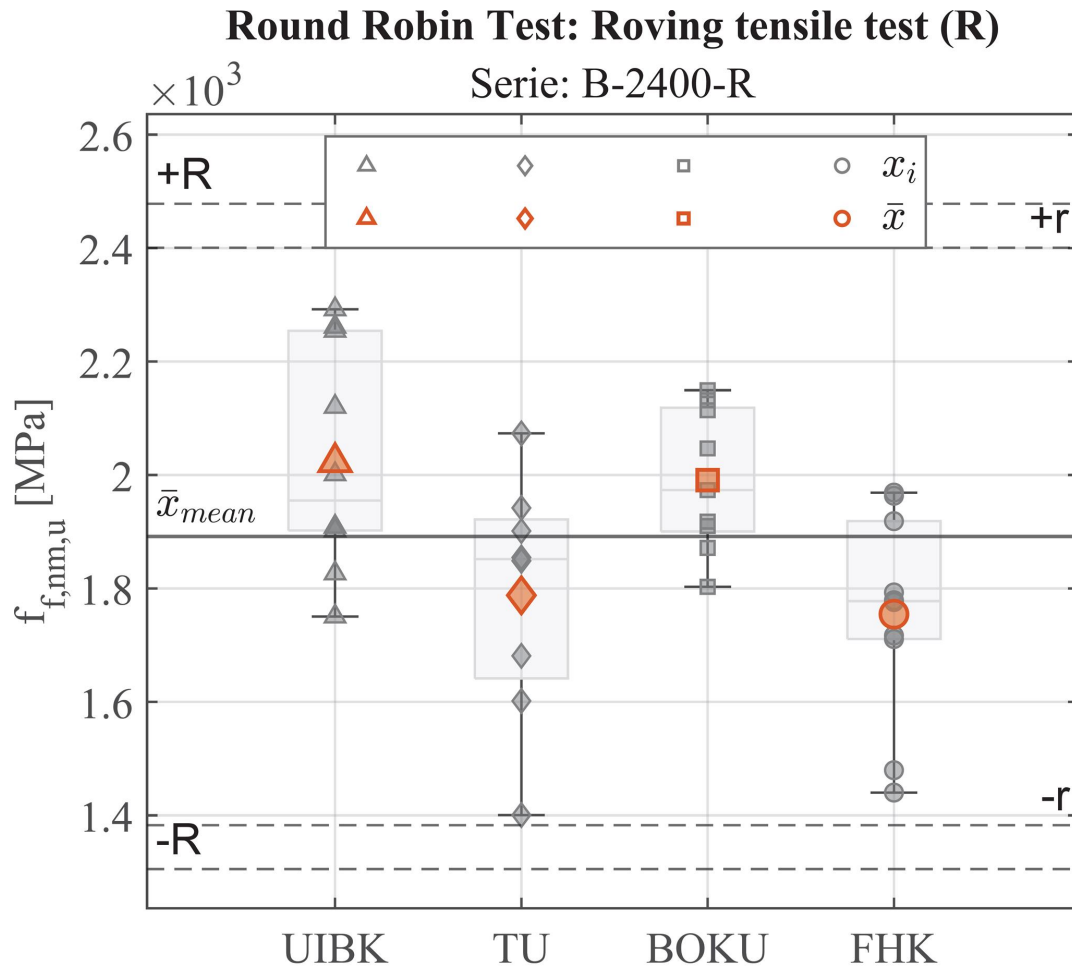


Abbildung 2.3.9: Boxplot der Ergebnisse des Ringversuchs in Bezug auf die Bruchspannung

Die Gesamten Ergebnisse der Roving-Zugversuche sind in Abbildung 2.3.8 abgebildet.

Serie	Labore	Mess- ungen	Gesamt- mittelwert [MPa]	$s_r$ [MPa]	$s_L$ [MPa]	$s_R$ [MPa]	R [MPa]	R [MPa]
B-2400-R	4	37	1892	182	104	209	509	586
C-3200-R	4	37	3732	204	218	298	8	835

Abbildung 2.3.10: Ergebnisse der Roving-Zugversuche

**Dehnkörperversuche:** Die Prüfkörper wurden mit einer Länge von 1000 mm, einer Breite von 83 mm und einer Dicke von 20 mm hergestellt, wobei die freie Messlänge zumindest 500 mm betragen musste. Für die basaltbewehrte Variante wurden zwei Textillagen verwendet. Die Dehnkörperversuche wurden weggesteuert mit einer Geschwindigkeit von 1,0 mm/min bis zum Versagen der Proben durchgeführt. Neben der Bruchspannung wurde zusätzlich die Bruchdehnung ermittelt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 2.3.9 dargestellt.

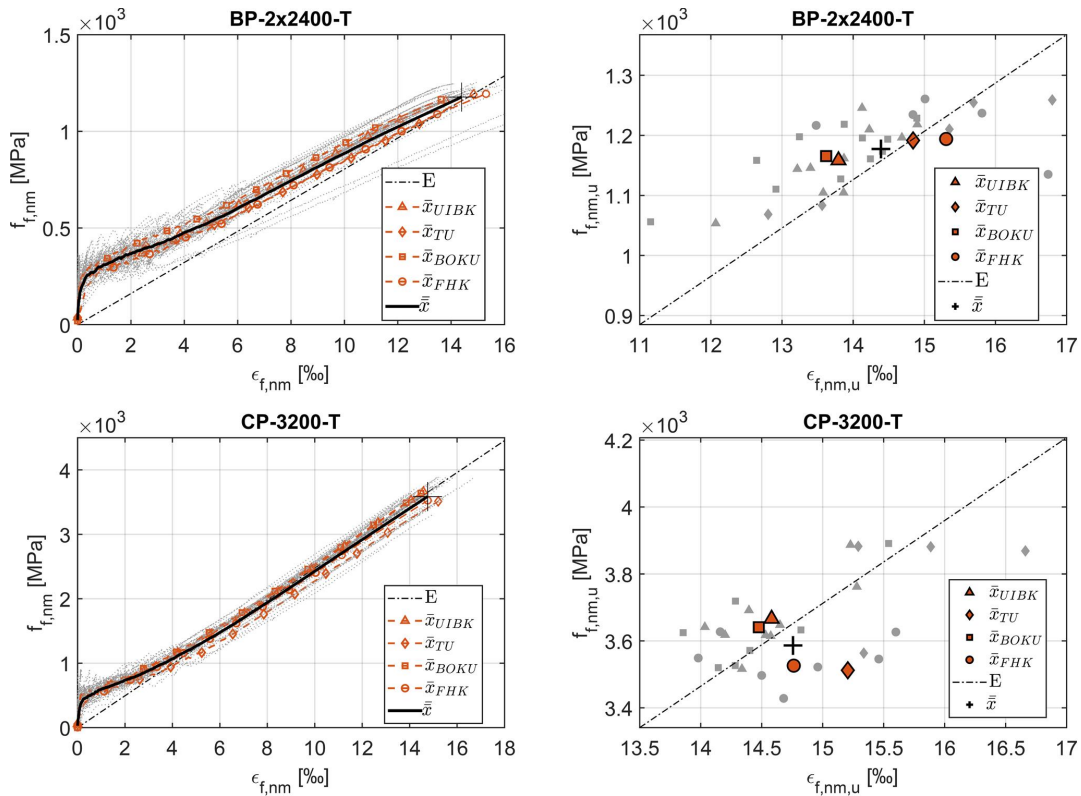


Abbildung 2.3.11: Ergebnisse der Dehnkörperversuche je Labor

Neben den qualitativen Spannungs-Dehnungs-Beziehungen der durchgeführten Dehnkörperversuche wurden die Daten, analog zu den Roving-Zugversuchen, ebenfalls nach ISO 5725 ausgewertet. Die vollständigen Ergebnisse sind in Abbildung 2.3.10 dargestellt.

Serie	Labore	Messungen	Gesamtmittelwert	$s_r$	$s_L$	$s_R$	R	R
			[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
BP-2x2400-T	4	36	1175	65	0	65	182	182
CP-3200-T	4	34	3583	210	0	210	589	589

Abbildung 2.3.12: Ergebnisse der Dehnkörperversuche

**Verbundversuch:** Die Prüfkörper für die Verbundversuche hatten Abmessungen von 250 mm Länge, 62 mm Breite und 20 mm Dicke. Die Verbundstrecke war mit einer Maschenweite definiert. Der Verbundversuch wurde wegesteuert mit einer Geschwindigkeit von 0,5 mm/min durchgeführt, bis eine Maschinenverformung von 3 mm erreicht war. Anschließend wurde die Geschwindigkeit auf 1 mm/min erhöht und bis zu einer Maschinenverformung von 10 mm beibehalten. Beim Verbundversuch wurde der maximale Schubfluss nach Gleichung (3) bestimmt:

$$T_{f,nm,max} = \frac{F_{max}}{l_e} \tag{3}$$

Abbildung 2.3.13: Gleichung 3

Die statistische Auswertung erfolgte auf derselben Grundlage wie bei den Roving-Zugversuchen und Dehnkörperversuchen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 2.3.11 zusammengefasst.

Serie	Labore	Messungen	Gesamtmittelwert [N/mm]	$s_r$ [N/mm]	$s_L$ [N/mm]	$s_R$ [N/mm]	R [N/mm]	R [N/mm]
BP-2400-B	4	41	45	28	7	14	34	39
CP-3200-B	3	27	67	10	3	16	16	30
CR-3200-B	4	37	77	16	8	19	34	41

Abbildung 2.3.14: Ergebnisse der Verbundversuche

### 2.3.3 Maßabweichungen und Toleranzen

Zur Analyse der Lagegenauigkeit der Textilbewehrung wurden die Dehnkörperversuche aus dem Round-Robin-Test in mehrere Stücke geschnitten und die tatsächliche Lage der Bewehrung mittels Schiebelehre ermittelt. Abbildung 2.3.12 zeigt eine beispielhafte Probe nach dem Schneiden; Abbildung 2.3.13 stellt das Schnittmuster dar.

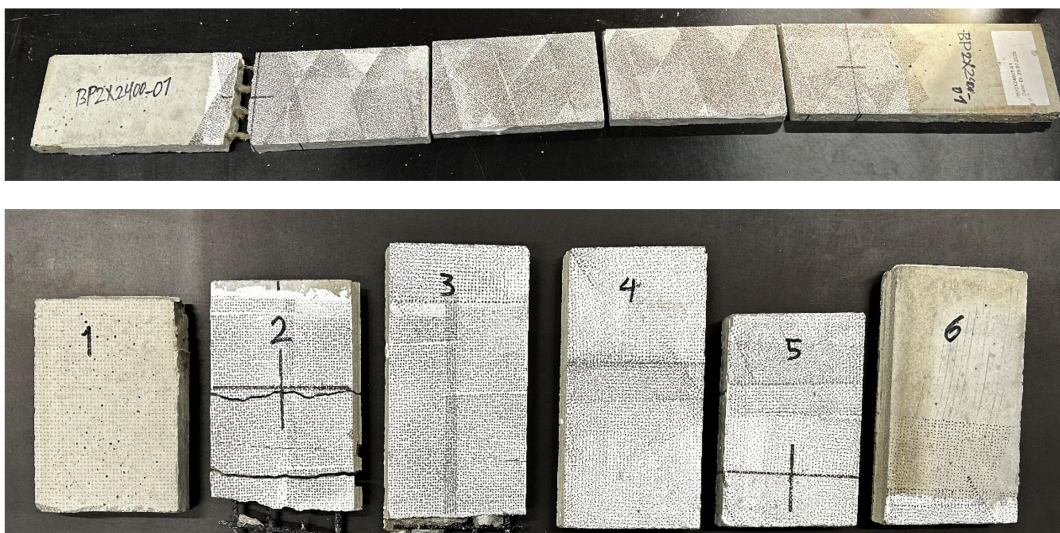


Abbildung 2.3.15: geschnittene Probekörper zur Bestimmung der Lagegenauigkeit

Es wurde eine deutliche Lageabweichung der Bewehrung festgestellt, die vom Textiltyp abhängig war.



Abbildung 2.3.16: Schnittbilder: (oben) Carbon- und (unten) Basaltbewehrte Probenstücke

Eine detaillierte Auswertung der Ergebnisse ist in Abbildung 2.3.14 zu sehen. Dabei ist ersichtlich, dass für die Carbonbewehrte Probe eine sehr gute Lagesicherheit gewährleistet wurde (geringe Spreizung) während für die Basaltbewehrte Probe eine größere Abweichung von der Sollage festzustellen ist (hohe Spreizung). Dies lässt sich auf die geringere Steifigkeit der Basaltbewehrung zurückführen.

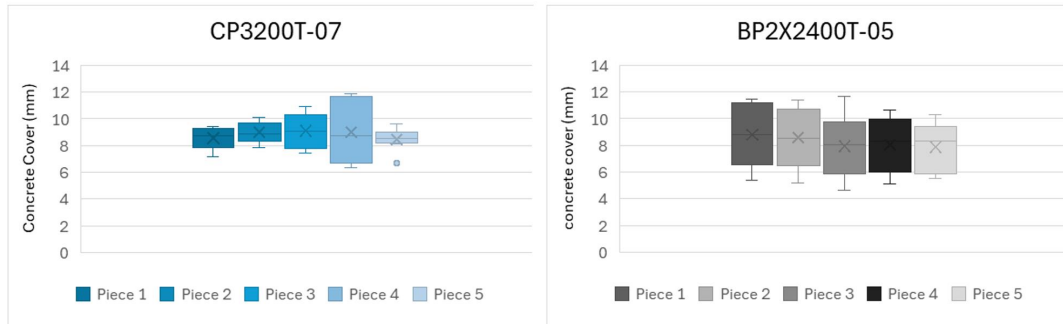


Abbildung 2.3.17: Lageabweichung der (links) carbonbewehrten und (rechts) basaltbewehrten Probekörper. Lageabweichung der (links) carbonbewehrten und (rechts) basaltbewehrten Probekörper.

## 2.4. Materialcharakterisierung von neuartigen Bewehrungen

**Fertigstellungsgrad:** 100%

Alle geplanten Arbeitsschritte konnten eingehalten werden. Nachfolgend sind die durchgeführten Arbeiten im ersten Forschungsjahr beschrieben

### 2.4.1 Langzeitfestigkeit

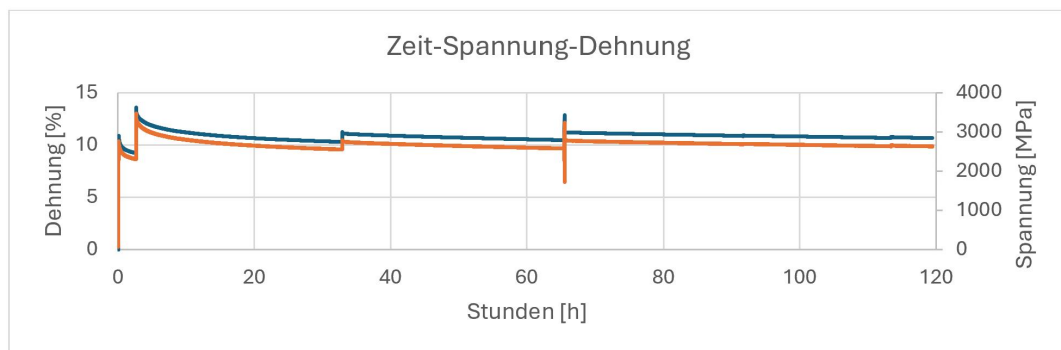
Zur Untersuchung des zeitabhängigen Materialverhaltens nichtmetallischer Bewehrungen unter Zugbeanspruchung wurde an der Universität Innsbruck ein neuartiger Versuchsstand entwickelt. Es handelt sich dabei um einen Lastrahmen, der Untersuchungen unter konstanter Spannung und Last ermöglicht. Auf Basis der Versuchsergebnisse soll das Dauerstandverhalten der nichtmetallischen Bewehrungen unter äußeren Einflüssen wie Feuchtigkeit und Temperatur bewertet werden. Nachfolgend wird der entwickelte Versuchsstand vorgestellt.

Die Steuerung des Versuchsstandes erfolgt grundsätzlich lastgesteuert. Die erforderliche Kraft wird über ein frei hängendes Gewicht erzeugt, das mechanisch über eine Umlenkung untersetzt und anschließend über eine Kette axial in den Probekörper eingeleitet wird. Zwischen dem Probekörper und der Lasteinleitungsstruktur ist eine Kraftmessdose eingebaut, die eine exakte Bestimmung der aufgetragenen Last ermöglicht. Die zugehörigen Dehnungen werden mittels zweier gegenüberliegender Wegaufnehmer am Probekörper erfasst, wobei die Messrate 0,1 Hz beträgt. Der Versuchsaufbau ist zur besseren Übersicht in Abbildung 2.4.1 dargestellt.

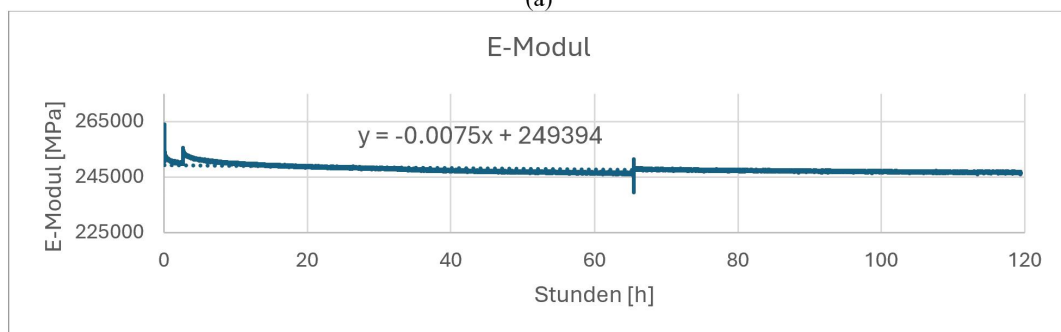


Abbildung 2.4.1: Versuchsaufbau Dauerstand mit der zugehörigen Messeinrichtung

Es wurden bereits erste Tastversuch erfolgreich durchgeführt. Die zugehörigen Daten sind in Abbildung 2.4.2 dargestellt.



(a)



(b)

Abbildung 2.4.2: Spannungs- und Dehnungsverlauf über die Standzeit (a) sowie der zugehörige rechnerische E-Modul (b) bei konstanter Zugbeanspruchung für eine Standzeit von 120 Stunden

Der Probekörper wurde über den Untersuchungszeitraum hinweg im Mittel mit 2684 MPa belastet (siehe Abbildung 6a). Das Lastniveau, das 95 % der Zeit vorlag, betrug 2580 MPa. Die prozentuale Differenz zwischen dem 95 %-Niveau und der mittleren Langzeitbelastung beträgt somit 3,87 %.

Anhand dieser Daten lässt sich zeigen, dass mit dem entwickelten Versuchsstand ein konstantes Lastniveau über einen bestimmten Zeitraum ohne nennenswerte Kraftabnahme aufrechterhalten werden kann. Darüber hinaus ermöglicht der Versuch die Berechnung des rechnerischen E-Moduls über die Standzeit nach Gleichung 4:

$$E_{f,calc,nm}(t) = \frac{f_{f,nm}(t)}{\varepsilon_{f,nm}(t)} \quad (4)$$

Abbildung 2.4.3: Gleichung 4

Dieser beträgt im Mittel 251 GPa. Die auftretenden Spitzen bei 0 Stunden bzw. bei etwa 65 Stunden ergeben sich aus Spann- bzw. Nachspannprozessen. Eine signifikante Änderung des E-Moduls über die Standzeit konnte nicht festgestellt werden. Auf Grundlage der Daten der ersten Testversuche kann somit davon ausgegangen werden, dass bei konstanter Beanspruchung über die Zeit unter Raumtemperatur kein Festigkeitsverlust auftritt. Im weiteren Verlauf des Projekts soll der Versuchsstand überarbeitet werden, um Dauerlastbeanspruchungen bei unterschiedlichen Temperaturniveaus zu untersuchen.

**Einzelrovings in aggressiven Medien:** Zur Untersuchung der Beständigkeit nichtmetallischer Bewehrungen gegenüber chemisch aggressiven Medien wurden Einzelrovings in unterschiedlichen sauren und basischen Lösungen ausgelagert (Abbildung 2.4.3). Die Proben werden auf die entsprechende Länge zugeschnitten und in Weithalsflaschen aus HDPE mit Schraubverschluss eingelegt. Pro Flasche werden 15 Einzelrovings eingesetzt.

Die Prüflösungen werden frisch angesetzt, und der pH-Wert wird vor der Befüllung gemessen und dokumentiert. Das Fassungsvermögen jeder Flasche beträgt 4000 ml. Anschließend werden die Flaschen gewogen und in einen beheizbaren Wassertank bei konstant 60 °C eingelegt. Während des Versuchs werden Wassertemperatur und Gewicht der Flaschen wöchentlich kontrolliert.

Die Proben werden nach 2, 4 und 6 Wochen entnommen. Pro Behälter werden zu den genannten Zeitpunkten jeweils 6 Einzelrovings entnommen. Nach der Entnahme werden die Rovings mit Wasser gespült, gewogen und einer einaxialen Zugprüfung unterzogen. Ziel ist es, die Zugfestigkeit der einzelnen Proben zu bestimmen und mit Referenzwerten unveränderter Proben zu vergleichen. Folgende Medien wurden dabei eingesetzt:

Prüfmedium	pH-Wert-SOLL	pH-Wert IST
Kaliumhydroxid (KOH)	13	12,29
Ammoniumsulfat-Lösung ((NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	5,5	6,00
Verdünnte Schwefelsäure (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	3	3,30
Natriumhydroxid (NaOH)	13,42	12,82

Abbildung 2.4.4: Verwendete Chemikalien zur Prüfung des chemischen Widerstandes

Die Beständigkeit der Probekörper gegenüber aggressiven Medien lässt sich über die Restfestigkeitsrate bestimmen. Dabei wird die Zugfestigkeit der Probekörper nach der Auslagerung mit einer Referenzserie verglichen. Die Bestimmung der Restfestigkeit erfolgt gemäß Gleichung (5):

$$R_{f,nm} = \frac{f_{f,nm,1}}{f_{f,nm,2}} \cdot 100 \quad (5)$$

Abbildung 2.4.5: Gleichung 5

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt im 2. Forschungsjahr.

**Dauerstandverhalten des Kompositwerkstoffes:** Es wurde eine umfangreiche Literaturstudie zum Dauerstand von textilbewehrten Betonkörpern vorgenommen und das Verbundkriechen als signifikante Wissenslücke bestätigt. Auf Basis dieser Studie wurde ein Versuchsaufbau konzipiert, der es ermöglicht das Verbundkriechen zu untersuchen und daraus Rückschlüsse insbesondere auf den Gebrauchszustand zu erhalten. Dazu wird ein bestehender Kriechstand and der TU Wien adaptiert, um textilbewehrte Proben einer konstanten Beanspruchung zu unterziehen.

Abbildung 2.4.4 zeigt den bestehenden Versuchsaufbau, der die Aufbringung einer Dauerlast über einen luftdruckbasierten Mechanismus ermöglicht. Die Modifikation umfasst einen zusätzlichen Aufsatz, der die Integration von Rollenlagern erlaubt und somit einen kontrollierte Dreipunktbiege-Versuch unter Dauerlast herstellt. Durch diese Anpassung wird es möglich, vier Prüfkörper gleichzeitig zu testen.

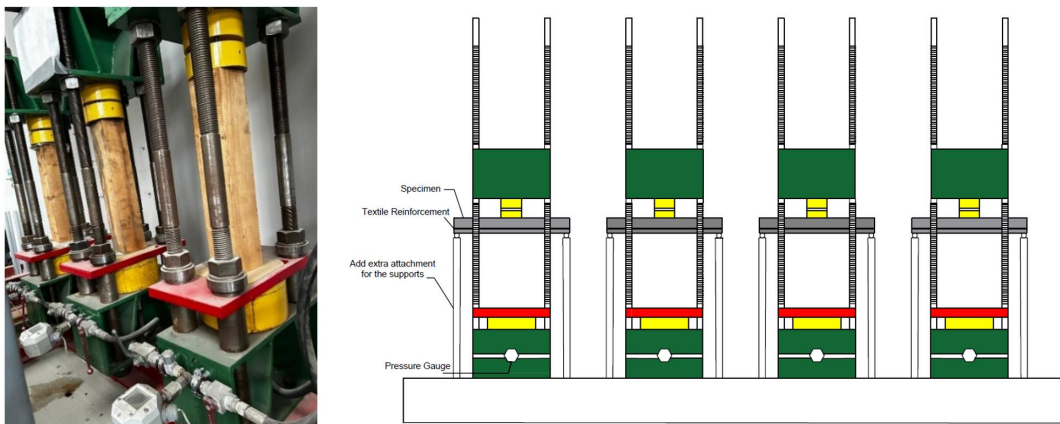


Abbildung 2.4.6: Kriechstand der TU Wien, der für die Untersuchungen zum Verbundkriechen adaptiert

Die Langzeitverformung wird dabei über mehrere Wochen unter einer konstanten Mittellast erfasst. Daten werden im zweiten Forschungsjahr generiert und ausgewertet.

#### 2.4.2 Ermüdungsversuche

Zur Untersuchung des Materialverhaltens nichtmetallischer Bewehrungen unter zyklischer Beanspruchung wurde an der Universität Innsbruck ein entsprechendes Versuchsstandkonzept entwickelt (Abbildung 2.4.5). Ziel der ersten Untersuchungen ist es, einzelne Probekörper axial auf Zug zyklisch zu belasten. Hierfür soll ein Hochfrequenzpulsator (Vibrofore) eingesetzt werden, da dieser durch seinen elektromagnetischen Antrieb eine hohe Zahl an Lastzyklen in kurzer Zeit ermöglicht und gleichzeitig große Kraftamplituden bei vergleichsweise geringem Energieaufwand liefert.

Für einen funktionierenden Resonanzbetrieb muss die Steifigkeit der Proben exakt auf das Systemgewicht des Pulsators abgestimmt sein. Ohne diese Anpassung kann keine ausreichende Schwingungsanregung im Bereich der Eigenkreisfrequenz erfolgen. Um den Steifigkeitsanforderungen zu entsprechen, wurde ein Konzept mit acht Einzelroving entwickelt. Die zugehörige Lasteinleitung wurde als halbiertes I-Profil konzipiert und mittels Finite-Elemente-Analyse für eine Dauerlast von 30 % nachgerechnet und ausgelegt.

Die Planung des Versuchsstandes erwies sich als interdisziplinär und erforderte mehrere iterative Entwicklungsschritte. Aufgrund der baulichen und maschinentechnischen Randbedingungen des Pulsators wurden zudem verschiedene Versuchsstände konzipiert. Während der ersten Tastversuche traten unerwartete Komplikationen in der Lasteinleitung auf: Die Probekörper spalteten im Bereich der Lastübertragungsblöcke, was auf ungünstige Spannungszustände und unzureichende Kraftverteilung zurückzuführen war. Zudem war die Lagegenauigkeit der Proben unzureichend, sodass die Belastung während des Spannvorgangs nicht gleichmäßig über alle acht Proben verteilt wurde. Dies führte dazu, dass die erforderliche konstante Beanspruchung je Probe nicht erreicht werden konnte und die Resonanzanregung des Hochfrequenzpulsators beim ersten Tastversuch ausblieb.

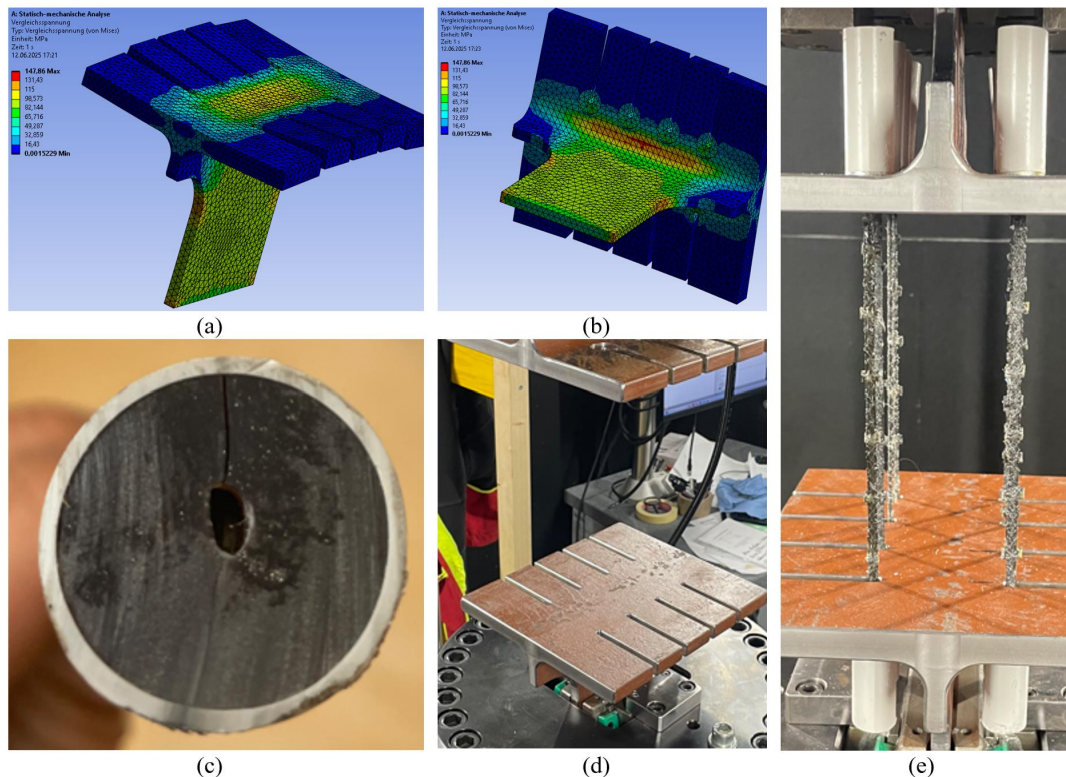


Abbildung 2.4.7: FE-Model (a), (b) sowie der Versuchsaufbau des ersten Tastversuchs (d), (e) und das Versagensbild der Probenverankerung (c)

Die gewonnenen Erkenntnisse wurden genutzt, um die Lasteinleitungsstruktur erneut zu überarbeiten. Dabei wurden mehrere Varianten untersucht, wobei sich herausstellte, dass eine konzentrische Klemmung im Auflagerbereich die wirksamste Lösung darstellt. Die neu konzipierte Lasteinleitung wurde zunächst nicht am Hochfrequenzpulsator getestet. Stattdessen wurde das Konzept einseitig auf der Hydropuls-Prüfmaschine in der TVFA der Universität Innsbruck zyklisch beansprucht.

Untersucht wurden dabei unterschiedliche Rovingstärken und Lastniveaus. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Abbildung 2.4.6 zusammengefasst. Die zyklische Beanspruchung wurde bis zu maximal  $1 \times 10^6$  Lastspiele durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass mittels der Hydropuls-Prüfmaschine nichtmetallische Bewehrungsstäbe einaxial auf Ermüdung geprüft werden können. Eine Adaption dieses Setups für den Hochfrequenzpulsator befindet sich derzeit in Entwicklung, und Ende dieses Jahres sollen erste Tastversuche durchgeführt werden.

Probe	Tex	Lastniveau	Zyklen	Versagen
V-I-01	3200	1,25/2,5/3,75	71305	-
V-I-02	6400	2,5/5/7,5	8706	Versagen
V-I-03	6400	2,5/5/7,5	24132	Einspannung Versagen
V-I-04	6400	2,5/5/7,5	434172	Einspannung Versagen
V-I-05	6400	2,5/5/7,5	1000000	-
V-I-06	6400	5/7,5/10	1000000	-

Abbildung 2.4.8: Ergebnisse der Vorversuche

## 2.5. Materialgerechtes Konstruieren

**Fertigstellungsgrad:** 100%

### 2.5.1 Verbundverhalten

Alle geplanten Arbeitsschritte konnten eingehalten werden. Nachfolgend sind die durchgeführten Arbeiten im ersten Forschungsjahr beschrieben

Im Zuge des AP 5 „materialgerechtes Konstruieren“ wurde im Berichtszeitrahmen der Fokus auf eine umfassende Recherche der Verbundeigenschaften von nichtmetallischen Bewehrungen in Beton durchgeführt. Der Schwerpunkt lag auf der Literaturrecherche zum aktuellen Stand der Forschung (State-of-the-Art) sowie der Identifikation bestehender Lücken im Wissen über das Verbundverhaltens zwischen nichtmetallischer Bewehrung und Beton. Auf Basis einer gezielten Analyse bereits bekannter und etablierter Methoden, wird eine zielgerichtete Versuchsserie geplant. Diese soll es ermöglichen versuchstechnisch ermittelte Daten, in eine spätere materialgerechte Konstruktionsweise überzuführen.

Zu Beginn wurden relevante Keywords für die Recherche in Scopus gesammelt und systematisch in Untergruppen unterteilt. Die darauf basierende erste Suchanfrage in Scopus ergab 573 Artikel, deren Keywords mithilfe von VOSviewer analysiert wurden.

VOSviewer ist ein Programm zur Visualisierung und Analyse wissenschaftlicher Literatur, die es ermöglicht, Netzwerke von Publikationen, Autoren oder Keywords basierend auf bibliometrischen Daten darzustellen und zu interpretieren. Aus den identifizierten 359 Keywords (mit mindestens fünf Vorkommen) wurde die ursprüngliche Suchanfrage überarbeitet, was zu einer erweiterten Datenbasis von 2069 Artikeln führte. Hier dargestellt ist das Netzwerk in Abbildung 2.5.1 sowie die zehn Keywords, die am häufigsten in der Datenbasis vorkommen in Abbildung 2.5.2 [2].



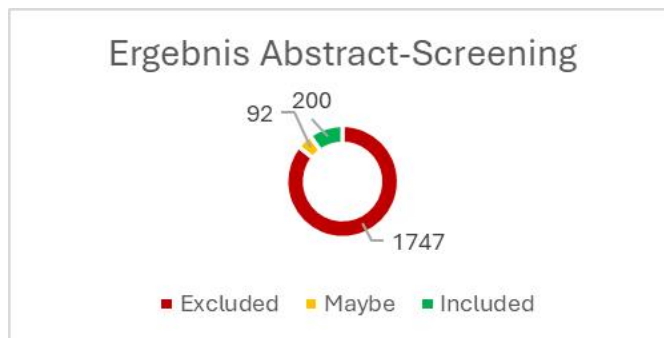


Abbildung 2.5.3: Übersicht des Abstract Screenings mit Rayyan [3].

Außerdem wurde eine unterstützende Recherche zum Überblick über den aktuellen Stand der Technik durchgeführt – dabei wurden bestehende experimentelle Untersuchungen sowie deren Versuchsaufbauten und Probekörper erfasst. Ziel war es, die Potenziale und Herausforderungen der verschiedenen Ansätze zu bewerten.

Zu den häufig verwendeten Verbundkörpern, für die versuchstechnische Untersuchung des Verbundverhaltens von Stahlbetonbauteilen, gehören unter anderem Ausziehkörper, Balkenbiegeversuche, Balkenendkörper, Spleißkörper, Dehnkörper sowie konsolartige Ausziehkörper [4].

Im Folgenden werden die Verbundkörper, sowie deren Vor- und Nachteile erläutert, um zunächst einen allgemeinen Überblick über den Stand des Wissens zu schaffen. Beim Ausziehversuch wird ein Bewehrungsstab mit einer festgelegten Verbundlänge aus einem prismatischen oder zylindrischen Prüfkörper gezogen. Die Lage des Stabes kann entweder zentrisch oder exzentrisch festgelegt sein. Nach dem Ausziehen des Stabes kann die vorliegende Verbundspannung (Gleichung 6) ermittelt werden, solange angenommen werden kann, dass es sich um eine konstante Spannungsverteilung über die gesamte Verbundlänge handelt, wie es bei Stäben mit einer Länge von gegeben ist. Der Vergleich des Verbundverhaltens erfolgt über die Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung, welche am unbelasteten Stabende, durch die Erfassung der Relativverschiebung, ermittelt wird [3].

$$\tau = \frac{F}{\pi \cdot d_s \cdot l_b} \tag{6}$$

Abbildung 2.5.4: Gleichung 6

Als sehr viel besser geeignet kann der Ausziehkörper nach RILEM beurteilt werden, siehe Abbildung 2.5.4. Dieser Prüfkörper besitzt eine Kantenlänge von  $a$  und eine Verbundlänge von  $l_b$ . Durch eine ausreichende Betondeckung von  $c$  kann ein Spaltzugversagen ausgeschlossen werden. Zudem ermöglicht die festgelegte Verbundlänge von  $l_b$  die Annahme einer konstanten Verbundspannung und die Streuungen des Versuches fallen gering aus [4].

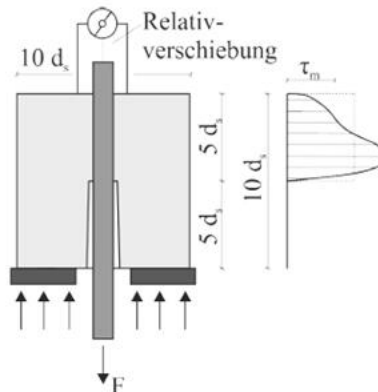


Abbildung 2.5.5: Ausziehkörper nach Rilem

Der Balkenbiegeversuch (engl. beam test) ist ein ebenfalls von RILEM standardisierter Versuchskörper, bei dem ein Bewehrungsstab in einen zweiteiligen Stahlbetonbalken einbetoniert ist, um das Verbundverhalten eines Stabes in der Zugzone nachzubilden. Die Kraftübertragung erfolgt dabei sowohl durch den Bewehrungsstab als auch durch ein Stahlgelenk im Druckbereich [4]. Die Verbundlänge beträgt und ist ausschließlich in den Mittelbereichen der Balken vorhanden, während davor und danach Plastikrohre eingesetzt werden, um den Verbund zu verhindern. Die geometrischen Abmessungen der beiden Balken hängen vom Durchmesser des Bewehrungsstabs ab. Die Belastung des Balkens erfolgt durch zwei Einzellasten mit definiertem Abstand. Der Schlupf wird an beiden Enden des Bewehrungsstabs gemessen. Die RILEM Technical Recommendations [4] empfehlen, bei Erreichen eines Schlupfwertes von 3 mm die Messung an einem Ende festzuklemmen und die weitere Messung nur einseitig fortzusetzen [4].

Die Berechnung der Verbundspannung erfolgt aus der Stahlspannung nach Gleichungen (7) - (9):

$$\sigma_s = \frac{1,25 \cdot P}{A_s} \text{ für } d_s \leq 14 \text{ mm} \quad (7)$$

$$\sigma_s = \frac{1,5 \cdot P}{A_s} \text{ für } d_s > 16 \text{ mm} \quad (8)$$

$$\tau = \frac{\sigma_s}{40} \quad (9)$$

Abbildung 2.5.6: Gleichung 7, 8, 9

Zur Klassifizierung werden die maximalen und mittleren Verbundspannungen herangezogen. Die mittlere Verbundspannung wird nach Gleichung 10 aus den Verbundspannungen bei den Schlupfwerten von 0,01 mm, 0,1 mm und 1,0 mm berechnet [4]:

$$\tau_m = \frac{\tau_{0,01} + \tau_{0,1} + \tau_{1,0}}{3} \quad (10)$$

Abbildung 2.5.7: Gleichung 10

In den RILEM Technical Recommendations ist jedoch nicht eindeutig festgelegt, ob für die errechneten Verbundspannungen bei den angegebenen Schlupfwerten die Mittelwerte der beiden Stabenden herangezogen werden sollen [4]. Dies könnte zu Problemen in der Vergleichbarkeit führen und sollte daher im Vorhinein abgeklärt werden.

Die Betondeckung ist . Zusätzlich wird eine Bügelbewehrung eingebracht, um ein Spaltbruchversagen zu vermeiden. Ein Nachteil des Balkenbiegeversuchs ist die aufwendige Herstellung der Prüfkörper, weshalb dieser Versuch seltener angewendet wird [4].

Der Dehnkörperversuch ermöglicht eine genauere Darstellung des Verbundverhaltens der Bewehrungsstäbe in der Zugzone im Vergleich zum Auszieh- und Balkenbiegeversuch. Der Dehnkörper stellt dabei vereinfacht die Situation eines 4-Punkt-Biegeversuchs dar, bei dem die Belastung zwischen den Lasteinleitungspunkten einen reinen Biegezustand erzeugt. Dadurch wird die Bewehrung ausschließlich auf Zug beansprucht. Der Schlupf wird indirekt über die Erfassung der Dehnung der Bewehrung bestimmt. Ein Nachteil des Dehnkörperversuchs besteht darin, dass das Verbundverhalten nicht direkt abgeleitet werden kann. Die Spaltneigung des Probekörpers hängt stark von der Betondeckung, dem Bewehrungsgrad und dem Rissbild ab, wobei niedrige Bewehrungsgrade und die damit einhergehenden größeren Rissabstände die Spaltneigung erhöhen [4].

Durch Beam-End-Tests kann untersucht werden, wie sich das Verbundverhalten und die Spaltneigung im Endverankerungsbereich verhalten. Die Versagensform hängt hierbei von der Betondeckung ab und eine ausreichende Betondeckung kann bereits mit Längsrissen verhindern. Um festzulegen, welche Verbundkörper für die weiteren Versuche gewählt werden, wurde eine Nutzwertanalyse zur Bewertung der folgenden vier Versuchsaufbauten durchgeführt: Pull-out-Test, Biegebalkenversuch, Dehnkörperversuch und Beam-end-Test.

Die Versuchsaufbauten wurden anhand definierter Bewertungskriterien untersucht und bewertet, siehe Abbildung 2.5.5. Bei der Gewichtung lag der Fokus darauf, möglichst aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen; Aspekte wie Dauer und Kosten hatten eine geringere Priorität. Die Einschätzung erfolgte auf Basis des aktuellen Stands der Literaturrecherche und wird im Zuge der weiteren Recherche verfeinert, um darauf aufbauend einen Versuchsplan ableiten zu können. Die Kriterien wurden auf einer Skala von 1 bis 5 bewertet, wobei 1 die schlechteste und 5 die beste Ausprägung des jeweiligen Kriteriums darstellt (z. B. Aufwand: 1 = sehr hoch, 5 = sehr gering).

Bewertungs- kriterien	Gewicht	Ausziehversuch n. RILEM		Balkenbiege- versuch		Dehnkörper- versuch		Balkenendversuch	
		Bewert.	Punkte	Bewert.	Punkte	Bewert.	Punkte	Bewert.	Punkte
Aufwand (Probekörper- vorbereitung)	10,00%	4	0,4	2	0,2	4	0,4	2	0,2
Extrahierbarkeit Ergebnisse	25,00%	4	1	3	0,75	3	0,75	4	1
Reproduzier- barkeit der Ergebnisse	30,00%	4	1,2	3	0,9	4	1,2	3	0,9
Realitätsnähe der Belastung	20,00%	3	0,6	4	0,8	3	0,6	5	1
Kosten	5,00%	4	0,2	2	0,1	3	0,15	2	0,1
Dauer (Versuchs- vorbereitung und - durchführung)	10,00%	4	0,4	2	0,2	3	0,3	2	0,2
Summe	100,00%	23	3,8	16	2,95	20	3,4	18	3,4
Reihung			1		3		2		2

Abbildung 2.5.8: Nutzwertanalyse - Versuchsaufbauten

Die gelb hinterlegten Felder kennzeichnen die jeweils beste Bewertung pro Kriterium. Sie zeigen, dass der Ausziehversuch in den meisten Kriterien am besten abgeschnitten hat und mit einer gewichteten Gesamtbewertung von 3,8 die höchste Punktzahl erzielt.

### 3. Erläuterung von wesentlichen Änderungen bei den Kosten

keine Änderungen in der Kostenstruktur zu berichten

### 4. Beitrag der Projektergebnisse zur Nachhaltigkeit

Der Einsatz nichtmetallischer Bewehrungen ermöglicht eine minimale Betonüberdeckung, da kein Korrosionsschutz erforderlich ist und lediglich der Verbund sichergestellt werden muss. Dadurch erhöhen sich die Dauerhaftigkeit und die Lebensdauer der Bauteile, während zugleich erhebliche Materialeinsparungen im Neubau sowie bei der Verstärkung bestehender Strukturen erzielt werden können. Die Anwendung dieser Technologie trägt zudem zur Erhaltung bestehender Tragwerke bei und verringert den Bedarf an ressourcenintensivem Neubau. Durch den geringeren Betonbedarf sinkt auch der Zementverbrauch – ein wesentlicher Vorteil, da die Zementproduktion weltweit bis zu 8 % der Treibhausgasemissionen verursacht. Eine Reduktion des Zementverbrauchs leistet somit einen direkten Beitrag zum Klimaschutz.

Erst durch die Erarbeitung von nachhaltigen Bemessungs- und Konstruktionsansätzen, unter Berücksichtigung vorteilhaften chemisch-mechanischen Eigenschaften der nichtmetallischen Bewehrungen, wird eine Bauweise etabliert, die in vielen Bereichen eine nachhaltige Alternative zu konventionellem STB bietet (siehe Abbildung 4.1.1).

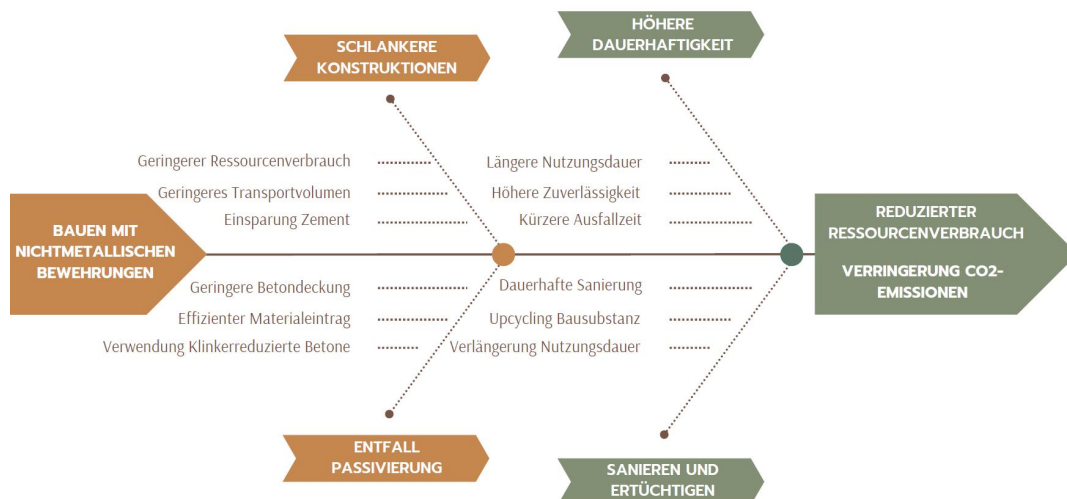


Abbildung 4.1: Beitrag von nichtmetallischen Bewehrungen zur Nachhaltigkeit im Bauwesen

Als direkte Konsequenz der geringer ausfallenden Betonkubaturen bei der Bauweise mit nichtmetallischen Bewehrungen (vgl. konventionelle Stahlbetonbauweise) kommt es zu einer Reduktion des Zementverbrauchs, dessen Herstellung global betrachtet auf bis zu 8% aller Treibhausgasemissionen zurückzuführen ist [5]. Eine Reduktion des Zementverbrauchs trägt demnach direkt zum Klimaschutz bei (**SDG 11**). Zusätzlich ist die Untersuchung von klinkerreduzierten Zementen bzw. Betonen [6] im Zuge des Forschungsvorhabens geplant, die aufgrund der geringeren Alkalität eine besonders hohe Kompatibilität mit der nichtmetallischen Bewehrung aufweisen [7].

Neben Zuschlägen und Zement wird unter anderem rund 10% des weltweiten Industrierwassers für die Herstellung von Beton verwendet [8]. Die Betonindustrie beeinflusst demnach direkt die Verfügbarkeit von Trinkwasser und Bewässerungswasser. In einigen Regionen kommt es durch die hohen Wasserentnahmen zu einem Rückgang der Grundwasserstände, zur Verschmutzung von Oberflächen- und Grundwasser sowie

zur Beeinträchtigung von Ökosystemen. Die Reduzierung des Wasserbedarfs durch eine generelle Reduktion des verbauten Betons, unter anderem bewirkt durch den Einsatz von nichtmetallischen Bewehrungen, kann entscheiden zu einer nachhaltigeren Wasserwirtschaft beitragen (**SDG6, SDG15**).

#### Quellen

- 9 P. Preinstorfer, T. Huber, S. Reichenbach, J. M. Lees, and B. Kromoser: Parametric Design Studies of Mass-Related Global Warming Potential and Construction Costs of FRP-Reinforced Concrete Infrastructure, *Polymers*, vol. 14, no. 12, p. 2383, Jun. 2022, doi: 10.3390/polym14122383.: 6
- 39 E. Rossi, N. Randl, T. Mészöly, and P. Harsányi: Flexural Strengthening with Fiber-/Textile-Reinforced Concrete, *SJ*, vol. 118, no. 4, Jul. 2021, doi: 10.14359/51732647.: 7
- 68 W. Seifert and M. Lieboldt: Ressourcenverbrauch im globalen Stahlbetonbau und Potenziale der Carbonbetonbauweise: Globale Herausforderungen des Bauwesens, *Beton und Stahlbetonbau*, vol. 115, no. 6, pp. 469–478, Jun. 2020, doi: 10.1002/best.201900094.: 8
- 69 T. Helbig, K. Unterer, C. Kulas, S. Rempel, and J. Hegger: Fuß- und Radwegbrücke aus Carbonbeton in Albstadt-Ebingen: Die weltweit erste ausschließlich carbonfaserbewehrte Betonbrücke, *Beton- und Stahlbetonbau*, vol. 111, no. 10, pp. 676–685, Oct. 2016, doi: 10.1002/best.201600058.: 9
- 70 J. Hegger, C. Goralski, and C. Kulas: Schlanke Fußgängerbrücke aus Textilbeton: Sechsfeldrige Fußgängerbrücke mit einer Gesamtlänge von 97 m, *Beton und Stahlbetonbau*, vol. 106, no. 2, pp. 64–71, Feb. 2011, doi: 10.1002/best.201000081.: 10
- 71 J. Wachter: Textilbetonverstärkung im Brückenbau, Masterarbeit, Universität Innsbruck, 2023.: 11
- 72 B. Wietek, *Beton – Stahlbeton – Faserbeton: Eigenschaften und Unterschiede*. Wiesbaden [Heidelberg]: Springer Vieweg, 2019.: 2
- 73 M. Haist et al.: Nachhaltig konstruieren und bauen mit Beton, in *BetonKalender 2022*, 1st ed., K. Bergmeister, F. Fingerloos, and J. Wörner, Eds., Wiley, 2022, pp. 421–531. doi: 10.1002/9783433610879.ch7.: 3
- 74 K. Schneider, M. Butler, and V. Mechtcherine: Carbon Concrete Composites C 3 - Nachhaltige Bindemittel und Betone für die Zukunft, *Beton- und Stahlbetonbau*, vol. 112, no. 12, pp. 784–794, Dec. 2017, doi: 10.1002/best.201700058.: 4
- 75 S. A. Miller, A. Horvath, and P. J. M. Monteiro: Impacts of booming concrete production on water resources worldwide, *Nat Sustain*, vol. 1, no. 1, pp. 69–76, Jan. 2018, doi: 10.1038/s41893-017-0009-5.: 5
- 82 'DIN ISO 5725-2:2022-05, Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen\_- Teil 2: Grundlegende Methode für die Ermittlung der Wiederhol- und Vergleichpräzision eines vereinheitlichten Messverfahrens': International Organization for Standardization, Genf, Schweiz.: 1