



Institut für
Bauforschung
und Lehrstuhl für
Baustoffkunde

RWTHAACHEN
UNIVERSITY

**FORSCHUNG
ENTWICKLUNG
ÜBERWACHUNG
PRÜFUNG
BERATUNG**

www.ibac.rwth-aachen.de

Forschungsbericht

F7121

Bewertung der Beständigkeit von Polymer-
bzw. Kompositfasern im alkalischen Milieu von
Beton





THEMA	Bewertung der Beständigkeit von Polymer- bzw. Kompositfasern im alkalischen Milieu von Beton
Forschungsbericht-Nr.	F7121 vom 07.11.2023
Projektbearbeitung	D. Maday, M.Sc. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Matschei
Auftraggeber/Förderer	Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt) Kolonnenstraße 30 B 10829 Berlin Deutschland
Vertragsdatum / Auftragsbestätigung	16.04.2021
Ihr Aktenzeichen	P 52-5-7-324-2072.21

Dieser Bericht umfasst 149 Seiten.

Soweit Versuchsmaterial nicht verbraucht ist, wird es nach 4 Wochen vernichtet. Eine längere Aufbewahrung bedarf einer schriftlichen Vereinbarung. Die auszugsweise Veröffentlichung dieses Berichtes, seine Verwendung für Werbezwecke sowie die inhaltliche Übernahme in Literaturdatenbanken bedürfen der Genehmigung des Lehrstuhls.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	5
2	Materialien und Methoden	6
2.1	Allgemeines	6
2.2	Untersuchte Fasermaterialien	6
2.2.1	Allgemeines	6
2.2.2	Polypropylen-Fasern (PP-Fasern).....	6
2.2.3	Polyethylenterephthalat-Fasern (PET-Fasern)	7
2.2.4	Polyamid-Fasern (PA-Fasern).....	8
2.2.5	Basaltfasern	9
2.3	DSC-Analyse.....	10
2.4	Prüfmethoden zur Bestimmung der Alkalibeständigkeit.....	10
2.4.1	Ermittlung der Restzugfestigkeit nach Lagerung in künstlicher Porenlösung ...	10
2.4.2	Ermittlung der Restzugfestigkeit durch SIC-Tests	13
2.4.3	4-Punkt-Biegezugprüfung.....	15
3	Darstellung und Diskussion der Versuchsergebnisse	22
3.1	Allgemeines	22
3.2	Einzelfaser-Zugversuche.....	22
3.2.1	Einzelfaser-Zugversuche der PP-Fasern.....	22
3.2.2	Einzelfaser-Zugversuche der PET-Fasern.....	28
3.2.3	Einzelfaser-Zugversuche der PA-Fasern.....	35
3.2.4	Einzelfaser-Zugversuche der Basalt-Fasern.....	41
3.3	4-Punkt-Biegezugversuche	49
3.3.1	4-Punkt-Biegezugversuche der PP-Fasern	50
3.3.2	4-Punkt-Biegezugversuche der PET-Fasern	52
3.3.3	4-Punkt-Biegezugversuche der PA-Fasern	56
3.3.4	4-Punkt-Biegezugversuche der Basalt-Fasern	60
4	Diskussion und Bewertung der Eignung der Versuche	64
4.1	Allgemeines	64
4.2	Bewertung der Verfahren	64
5	Literatur	68
	Anhang A – Tabellen	71
	Anhang B – Bilder	121

Kurzfassung

Aufgrund der unklaren Definition der Dauerhaftigkeit verschiedener Fasermaterialien wie PVA, PA und Basalt kommt es bei der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (abZ) von Polymer- bzw. Kompositfasern für den Einsatz in Beton nach DIN EN 206-1 in Verbindung mit DIN 1045, basierend auf Prüfungen aus DIN EN 14889-2, häufig zu kontroversen Diskussionen darüber, ob ein Produkt für den statischen Einsatz im Beton geeignet ist.

Um die Dauerhaftigkeit von Polymer- bzw. Kompositfasern im alkalischen Milieu von Beton zu bewerten, wurden im Rahmen des Forschungsprojektes verschiedene Prüfverfahren eingesetzt. Dazu gehörten der SIC-Test, der Balkentest sowie die Prüfung der Restzugfestigkeit nach Lagerung der Fasern in künstlicher Porenlösung. Insgesamt wurden vier unterschiedliche Fasermaterialien (PP, PET, PA und Basalt) im alkalischen Milieu von Beton untersucht. Um eine beschleunigte Alterung zu simulieren, wurden die Lagerungsdauer und die Umgebungstemperatur der Probekörper variiert. Das Ziel war es, einen Ansatz zur Bestimmung der Dauerhaftigkeit von Fasermaterialien im Hinblick auf ihren statischen Einsatz im Beton zu entwickeln.

Die Versuchsergebnisse verdeutlichen, dass alle drei Prüfmethoden grundsätzlich geeignet sind, um die Beständigkeit von Fasermaterialien in alkalischer Umgebung zu bestimmen. Besonders der 4-Punkt-Biegeversuch erwies sich dabei als vielversprechend, um die Degradation der strukturell wirksamen Fasermaterialien unter realitätsnahen Bedingungen zu untersuchen. Dabei wurden sowohl der Verbund der Fasern als auch die Interphase zwischen Beton und Fasern berücksichtigt und geprüft, was wertvolle Erkenntnisse über ihre Leistungsfähigkeit lieferte.

Abstract

There are frequent debates surrounding the suitability of polymer or composite fibers for use in concrete, specifically regarding their general building approval according to DIN EN 206-1 in combination with DIN 1045. These discussions arise due to the lack of clear definitions regarding the durability of different fiber materials (such as PVA, PA, basalt) and whether they can effectively support static loads in concrete, as outlined in the tests conducted in DIN EN 14889-2.

This research project focused on evaluating the durability of polymer or composite fibers in the alkaline environment of concrete. Three distinct test methods (SIC-test, beam-test, and testing of residual tensile strength after storing fibers in an artificial pore solution) were employed to examine the durability of fiber materials in alkaline conditions. Four different fiber materials (PP, PET, PA, and basalt) were subjected to these tests. The test specimens were exposed to varying storage times and ambient temperatures to simulate accelerated aging. Through this approach, the aim was to establish a correlation between durability and mechanical performance of fiber reinforced concrete.

The test results indicate that all three test methods are effective in assessing the durability of fiber materials in alkaline environments. The use of the 4-point-bending test demonstrated its potential in evaluating the degradation of structurally significant fiber materials under realistic conditions. The focus of this investigation was on examining the bond behavior between fibers and the interphase with concrete, considering their crucial role in determining durability, and conducting relevant tests accordingly.

1 Einleitung

Die Verwendung von Kurzfasern im Beton ist gemäß DIN EN 206-1 /DIN01/ in Verbindung mit DIN 1045-2 /DIN08/ möglich. Hierbei können beispielsweise Stahlfasern nach DIN EN 14889-1 /DIN06/ oder Polymerfasern nach DIN EN 14889-2 /DIN18/ zum Einsatz kommen. Eine statische Bemessung mit diesen Fasern ist nach der DAfStb-Richtlinie „Stahlfaserbeton“ /DAf12/ möglich. Der Einsatz von Polymerfasern oder Fasern, die nicht der /DIN06/ oder der /DIN06b/ entsprechen, bedarf einer bauaufsichtlichen Zulassung der Fasern bzw. eines Verwendungsnachweises im Beton. Hierdurch soll vor allem bei einem statischen Einsatz der Fasern sichergestellt werden, dass diese eine ausreichende Wirksamkeit und Dauerhaftigkeit aufweisen.

In der Regel wird für die Zulassung bzw. den Verwendungsnachweis differierender Faserprodukte in Beton auf die „Zulassungs- und Überwachungsgrundsätze – Faserprodukte als Betonzusatzstoff“ des Deutschen Instituts für Bautechnik /DIB05/ zurückgegriffen und ein Prüfplan für die Faserprodukte individuell erstellt. Die einzige im Rahmen von /DIB05/ vorhandene Prüfung zur Untersuchung der Dauerhaftigkeit von Faserprodukten ist der SIC-Test gemäß DIN EN 14649 /DIN05/, bei dem der Widerstand gegen Alkalien durch die Bestimmung der Restzugfestigkeit eines Spinnfadens geprüft wird.

Dieser Test basiert darauf, dass ein Spinnfaden in einen Mörtelblock eingespannt wird und sich durch eine Exposition in einem Wasserbad bei einer Temperatur von 80 °C ein alkalischer Angriff der Faser durch die im Mörtel enthaltenen Alkalien einstellt. Nach diesem Angriff wird die Restzugfestigkeit des im Mörtel eingespannten Spinnfadens geprüft. Durch unterschiedlich lange Expositionsdauern kann eine mögliche Degradation des Materials festgestellt werden. Ein Problem des Tests liegt jedoch in der Geometrie des Probekörpers. Durch das Einbetten der Fasern in einen Mörtel, können bereits bei der Präparation der Proben Schäden an der Faser auftreten, die zu einer Verringerung der Zugfestigkeit und damit zu einer erhöhten Versuchsstreuung führen. Dies zeigt sich unter anderem auch dadurch, dass Variationskoeffizienten von bis zu 14 % bei einer Probenanzahl von 10 Proben akzeptiert werden. Weitere Probleme bei diesem Test treten auf, falls die Zugfestigkeit der Faser im Allgemeinen sehr gering ist. In diesem Fall ist ein Versagen der Faser außerhalb des Mörtelblocks sehr wahrscheinlich, weil die maximale Zuglast des Mörtels die der Faser übersteigt. Dasselbe gilt für sehr geringe Faserdicken. Als Kriterium der Dauerhaftigkeit gilt lediglich das Erreichen eines Gleichgewichtszustands nach verlängerter Exposition.

Für Fasern auf Polymerbasis oder für Kompositfasern mit einer Polymertränkung ist zudem die hohe Temperatur von 80 °C unter Umständen problematisch, da sich erste Einflüsse auf die Zugfestigkeit der Fasern bereits deutlich unterhalb des Schmelzpunktes zeigen können. Zusätzlich ist zu beachten, dass die Tragfähigkeit eines Faserbetonbauteils nicht rein von der Zugfestigkeit der Fasern abhängt, sondern die Verbundfestigkeit zwischen Faser und Beton eine große Rolle spielt. Diese wird jedoch im SIC-Test nicht berücksichtigt.

Insgesamt ist der SIC-Test aus den genannten Gründen für die Beurteilung verschiedenster Fasermaterialien kritisch zu betrachten. Für ungetränkte Glasfasern, für die der Test entwickelt wurde, zeigen sich gute Resultate, jedoch kommt es bei der Beurteilung anderer

Fasermaterialien zu den o. g. Problemen. Darüber hinaus ist fraglich, wie gut der Abfall der Zugfestigkeit einer Einzelfaser auf den Abfall der Festigkeit des Verbundwerkstoffs Faserbeton extrapoliert werden kann. Ziel des Forschungsvorhabens war es daher, einen Test zu entwickeln, der gerade in Hinblick auf die statische Leistungsfähigkeit von Faserbeton eine Bewertung der Dauerhaftigkeit ermöglicht.

2 Materialien und Methoden

2.1 Allgemeines

Zur Bewertung der Beständigkeit von Fasern im alkalischen Milieu von Beton wurden im Zuge des Forschungsvorhabens Polypropylen-, Polyethylenterephthalat-, Polyamid- sowie Basaltfasern anhand drei verschiedener Prüfmethoden untersucht. Neben dem für Glasfasern gültigen SIC-Test, wurde das Fasermaterial einer Exposition in einer künstlich hergestellten, alkalischen Lösung mit vergleichbarem pH-Wert eines Mörtels bzw. Betons ausgesetzt und daraufhin auf die Restzugfestigkeit untersucht. Zudem wurde untersucht, ob der 4-Punkt-Biegezugversuch an Faserbeton-Biegebalken mit zusätzlich beschleunigter Alterung zur Bestimmung der Dauerhaftigkeit der Fasern in Beton geeignet ist, da bei diesem Versuch auch die Verbundfestigkeit zwischen Faser und Beton betrachtet werden kann. Dabei wurden die Expositionsdauern und Umgebungstemperaturen für die beschleunigte Alterung variiert.

2.2 Untersuchte Fasermaterialien

2.2.1 Allgemeines

In diesem Kapitel werden die für die Untersuchungen verwendeten Fasern vorgestellt. Hierfür wird u. a. auf die Angaben der Hersteller verwiesen. Bei der Auswahl der verwendeten Fasern wurde darauf geachtet, dass es sich um Makrofasern mit vergleichbaren Fasergeometrien handelt. Diese wurden für die Herstellung der Biegebalken verwendet. Für die Proben der Prüfungen nach Lagerung in künstlicher Porenlösung und des SIC-Tests, wurden jeweils Langfasern der entsprechenden Makrofasern herangezogen.

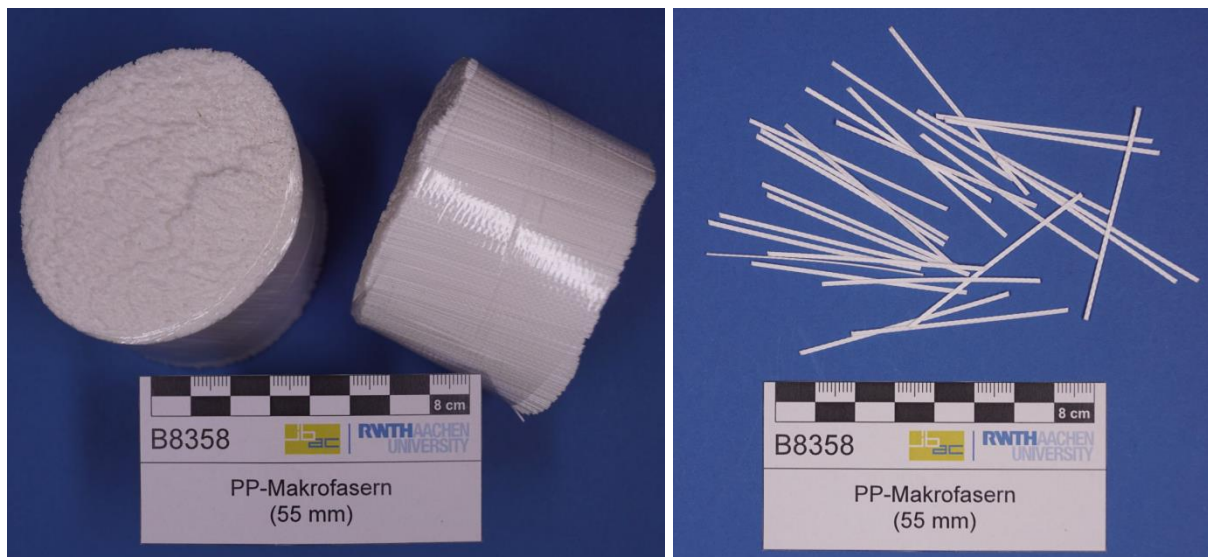
2.2.2 Polypropylen-Fasern (PP-Fasern)

Bei den verwendeten PP-Fasern handelt es sich um die „MasterFiber 255 SPA“ der Firma Master Builders Solutions. Sie bestehen, laut Herstellerangaben, aus modifiziertem Polypropylen und werden für tragende Zwecke in Beton, Mörtel und Einpressmörtel eingesetzt. Sie sollen die Duktilität von Betonbauteilen verbessern, Zugkräfte zwischen den Rissufern übertragen und die Schwindrissbildung minimieren. Ein weiterer Vorteil soll ihre gute Chemikalienbeständigkeit gegenüber Säuren und Alkalien sein. Die PP-Fasern sind 55 mm lange Monofilamentfasern und haben ein weißes Erscheinungsbild. Des Weiteren sind sie in Längsrichtung geprägt und im Querschnitt unregelmäßig. Ihr Schlankheitsverhältnis (l/d) beträgt 79. Weitere Angaben zu den physikalischen und mechanischen Eigenschaften der PP-Fasern sind in Tabelle 1 gegeben.

Tabelle 1: Herstellerangaben der „MasterFiber 255 SPA“ /Mas20/

Parameter	Einheit	Wert
Dichte	kg/m ³	910
Länge	mm	55
Äquivalenter Durchmesser		0,7
Zugfestigkeit	MPa	500
E-Modul		7.000
Schmelztemperatur	°C	ca. 150-170
Entzündungstemperatur		ca. 350

Die PP-Fasern „MasterFiber 255 SPA“ werden in Form von Pucks mit wasserlöslicher Folie geliefert (siehe Bild 1), die in den Frischbeton eingemischt werden.

**Bild 1:** PP-Fasern (MasterFiber 255 SPA) als Pucks (links) und einzelne Fasern (rechts)

2.2.3 Polyethylenterephthalat-Fasern (PET-Fasern)

Die verwendeten PET-Fasern wurde ebenfalls von der Firma Master Builders Solutions zur Verfügung gestellt. Diese befinden sich derzeit jedoch noch in der Entwicklung. Aus diesem Grund liegt kein Datenblatt zu dieser Faser vor. Die im Folgenden aufgeführten physikalischen und mechanischen Eigenschaften der PET-Faser beruhen auf durch den Hersteller mitgeteilten Angaben. Die Faser wird laut Hersteller aus reinem PET-Granulat zu einer hohlraumfreien Monofilamentfaser extrudiert. Sie soll keine nennenswerte Porosität aufweisen. Weitere Herstellerangaben zu den mechanischen Eigenschaften, ergänzt durch Untersuchungen am ibac, sind Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 2: Mechanische Eigenschaften der PET-Fasern

Parameter	Einheit	Wert
Dichte	g/cm ³	1,35
Länge	mm	55
Äquivalenter Durchmesser		0,7
Zugfestigkeit	MPa	530
Glasübergangstemperatur	°C	80-90
Schmelztemperatur		ca. 250

Im Erscheinungsbild sind die Fasern klar und embosst, haben somit eine geprägte Oberfläche (siehe Bild 2). Durch die Vermessung von Gewicht und Länge der entsprechenden Langfasern und der bekannten Dichte des Fasermaterials, konnte die äquivalente Querschnittsfläche zu etwa 0,39 mm² bestimmt werden.



Bild 2: PET-Makrofasern

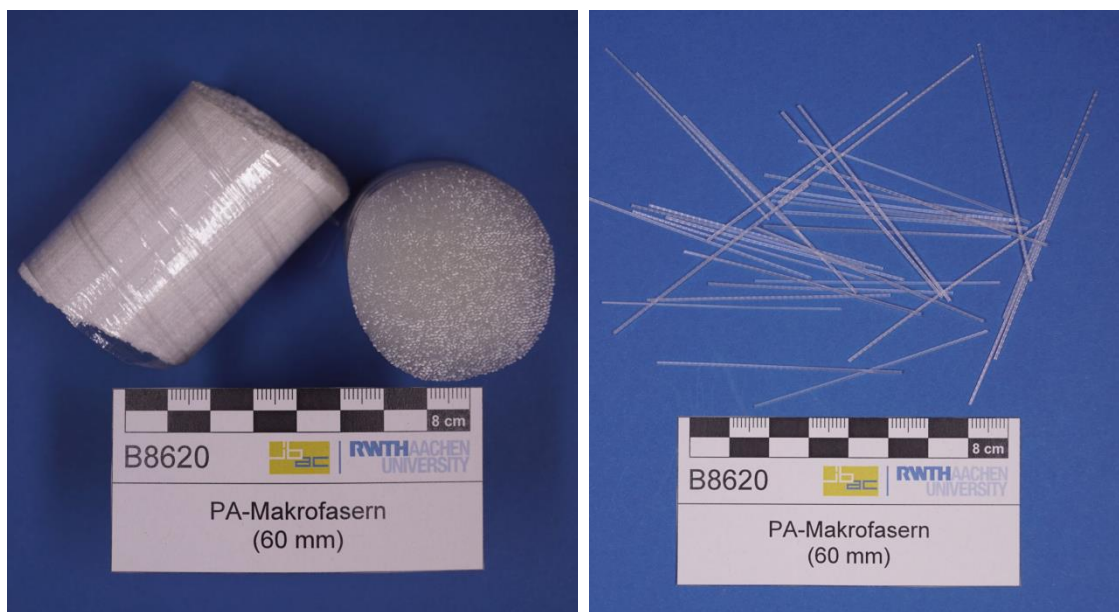
2.2.4 Polyamid-Fasern (PA-Fasern)

Die verwendeten PA-Fasern wurden von der Firma Enneatech zur Verfügung gestellt und befinden sich derzeit noch in der Entwicklung. Für diese Fasern liegt jedoch schon ein vorläufiges Datenblatt vor /Enn22/. Die untersuchte Charge besteht aus geprägten, 60 mm langen, Monofilamentfasern aus Nylon 6 und wird mit „Enneafil Macro-B60“ bezeichnet. Die PA-Faser wurde für den statisch tragenden Einsatz in Beton entwickelt und soll neben der statisch tragenden Wirkung laut Herstellerangaben zusätzlich Risse hemmen und das Schwinden reduzieren. Weitere Herstellerangaben zu den mechanischen Eigenschaften der PA-Fasern sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Mechanische Eigenschaften der PA-Fasern /Enn22/

Parameter	Einheit	Wert
Dichte	g/cm ³	1,14
Länge	mm	60
Äquivalenter Durchmesser		0,70
Zugfestigkeit	MPa	900
Bruchdehnung	%	16
Wasseraufnahme		2,7
Glasübergangstemperatur	°C	55-65
Schmelztemperatur		220

Die PA-Fasern werden in Pucks geliefert (siehe Bild 3, links) und sollen auch in dieser Form in den Frischbeton eingemischt werden. Im Erscheinungsbild sind sie farblos und haben eine geprägte Oberfläche (siehe Bild 3, rechts).

**Bild 3:** PA-Makrofasern (Enneafil Macro-B60) als Pucks (links) und einzelne Fasern (rechts)

2.2.5 Basaltfasern

Bei den verwendeten Basaltfasern handelt es sich um die Fasern „Rockstix“ der Firma C-Con. einen Faser-Kunststoff-Verbund bzw. Composit, bei dem die einzelnen Basaltfilamente, laut Hersteller, durch eine Kunststoff-Beschichtung miteinander verbunden werden. Sie wurden für den Einsatz in Beton als Verstärkungsmaterial konzipiert und sollen dort das Ermüdungs- und Kriechverhalten sowie die Schlagzähigkeit verbessern. Die Basaltfasern sind korrosionsbeständig und haben das gleiche spezifische Gewicht wie Beton. Die mechanischen Eigenschaften der Basaltfasern, die durch Untersuchungen am ibac ermittelt wurden, sind Tabelle 4 zu entnehmen.

Tabelle 4: Mechanische Eigenschaften der Basaltfasern

Parameter	Einheit	Wert
Dichte	g/cm ³	1,979
Länge	mm	45
Äquivalenter Durchmesser		0,6
Äquivalente Querschnittsfläche	mm ²	0,3
Zugfestigkeit	MPa	1.260

Die „Rockstix“ werden aus endlosen, beschichteten Multifilamentgarnen in 45 mm lange Makrofasern geschnitten. Ihre Oberfläche ist glatt und sie haben eine schwarze bis bronzene Farbe (siehe Bild 4).


Bild 4: Basaltfasern (Rockstix)

2.3 DSC-Analyse

Zur Bestimmung der Glasübergangs- bzw. Schmelztemperatur der Fasermaterialien, wurde eine Differenzkalorimetrie (DSC) gemäß DIN 51007 /DIN19b/ durchgeführt. Die Ergebnisse der DSC sind in Bild B1 bis Bild B4, Anhang B, dargestellt.

2.4 Prüfmethoden zur Bestimmung der Alkalibeständigkeit

2.4.1 Ermittlung der Restzugfestigkeit nach Lagerung in künstlicher Porenlösung

Für die Bestimmung der Restzugfestigkeit wurden die Faserproben in einer künstlich hergestellten Porenlösung gelagert. Diese Porenlösung sollte in der Zusammensetzung und damit einhergehend im pH-Wert dem Porenwasser eines gängigen Betons möglichst ähnlich sein. Aus diesem Grund wurde eine Lösung bestehend aus Natrium-, Kalium- und

Calciumhydroxid zusammengestellt. Die künstliche Porenlösung wurde aus 17 mmol Natriumhydroxid (NaOH), 170 mmol Kaliumhydroxid (KOH) und gesättigter Calciumhydroxidlösung ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) zusammengesetzt. Der pH-Wert der Porenlösung betrug ungefähr 13,6.

Für die Ermittlung der Restzugfestigkeit des Fasermaterials nach vorheriger Lagerung in künstlicher Porenlösung, wurden Einzelfaser-Zugproben untersucht. Diese Probekörper werden im Folgenden als Restzugproben (RZ) bezeichnet. Diese wurden aus etwa 1 – 1,2 m langen Langfasern der zu untersuchenden Fasermaterialien gewonnen. Die Langfasern wurden dafür zunächst gewogen und vermessen, um die Ermittlung des äquivalenten Faserquerschnitts für die spätere Auswertung zu ermöglichen. Die Prüflänge der Restzugproben wurde auf 150 mm festgelegt.

Um die Restzugfestigkeit von Faserproben prüfen zu können, müssen die Fasern möglichst frei von Schlupf und Kantenpressungen zentriert geklemmt werden können. Dafür wurden beide Enden der Fasern in Harz vergossen, sodass die entstehenden Harzblöcke für die Einspannung der Probe während der Zugprüfung genutzt werden konnten. Damit die Fasern über das Harz eingespannt und auf Zug beansprucht werden können, muss die Verbundlast zwischen Harz und Faser höher sein als die Bruchlast der Faser.

Voruntersuchungen zeigten, dass die PP-, PET- und Basaltfasern über ein Metall-Polymer mit einer Einbindelänge von 50 mm verankert und eingespannt werden können. Für die Untersuchungen wurde das Metall-Polymer „DIAMANT MM1018“ /DIA19/ gewählt und verwendet. Der fertige Probekörper entsprach der Skizze nach Bild 5.

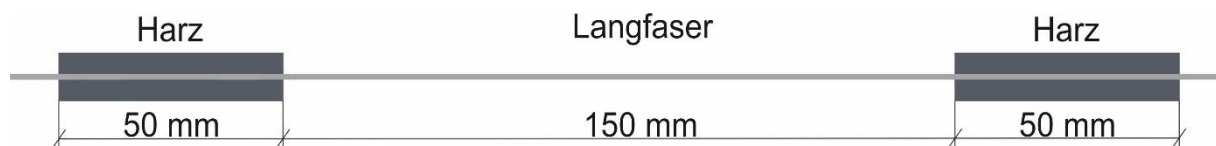


Bild 5: Skizze eines Probekörpers für die Bestimmung der Restzugfestigkeit

Bei den Voruntersuchungen zu den Einspannmöglichkeiten konnte für die PA-Fasern kein geeignetes Harz gefunden werden. Die Verbundspannungen zwischen Faser und verwendetem Harz waren stets geringer als die Bruchlast der Faser. Aus diesem Grund wurde für die Prüfung der PA-Faser eine alternative Einspannung über Pappen gewählt. Dabei wurden die Fasern mittels Sekundenkleber-Gel zwischen zwei Pappen geklebt, die als Polsterung der Klemmwirkung während der mechanischen Einspannung wirkten und die freie Prüflänge von 150 mm sicherstellten. Ein entsprechender Probekörper ist beispielhaft in Bild 6 abgebildet.



Bild 6: Restzugprobe der PA-Fasern

Da eine Präparation der Probekörper mit Pappe vor der Lagerung in künstlicher Porenlösung nicht möglich ist, wurden die Pappen erst nach Ende der Expositionsdauer an die Proben geklebt.

Für die Ermittlung der reinen Zugfestigkeit des Fasermaterials ohne Exposition, erfolgte die Prüfung unmittelbar nach der Herstellung der Harzblöcke (RZ-20-0d). Alle weiteren Prüfserien setzten eine Lagerung in künstlicher Porenlösung voraus. Dafür wurden spezielle Behälter vorbereitet, die mit der künstlichen Porenlösung befüllt und bei entsprechender Temperatur (20 °C, 40 °C, 60 °C oder 80 °C) vortemperiert wurden. Jede einzelne Probe wurde mit 100 ml Porenlösung beaufschlagt. Bei einer Serie mit 12 Probekörpern entsprach dies 1,2 Liter künstlicher Porenlösung je Behälter. Durch die Vortemperierung konnte gewährleistet werden, dass die Proben während der gesamten Lagerungsdauer der entsprechenden Temperatur ausgesetzt waren. Nach Ende der Expositionsdauer (nach 4, 7, 14, 28 bzw. 90 Tagen) wurden die Restzugproben aus den Boxen entnommen und für weitere 24 Stunden bei Normklima gelagert. Dies ermöglichte eine konstante und einheitliche Prüftemperatur der Restzugproben aller Serien.

Die Zugfestigkeit der Fasermaterialien wurde in Anlehnung an DIN EN ISO 5079 /DIN21/ geprüft. Die Prüfung wurde weggeregelt mit einer Universalprüfmaschine durchgeführt. Die Einspannung der Restzugproben erfolgte schlupffrei über die Harzblöcke bzw. im Falle der PA-Fasern über die Pappen, in die die Faserenden eingebunden waren. Es wurde eine Vorlast von 5 N aufgebracht. Die Prüfungsgeschwindigkeit wurde individuell an das Fasermaterial angepasst, sodass ein Versagen der Proben innerhalb von 60 – 90 Sekunden eintrat. Dabei wurden die PA-Fasern mit 50 mm/min, die PP-Fasern mit 15 mm/min und die PET- sowie auch die Basaltfasern mit 6 mm/min geprüft. Während der Prüfung wurden Zeit, Kraft und Traversenweg aufgezeichnet. Um auf die Zugfestigkeit (RZ-20-0d) bzw. die Restzugfestigkeit der Fasermaterialien zu schließen, wurde die ermittelte Höchstlast beim Faserbruch durch den berechneten äquivalenten Faserquerschnitt geteilt.

Die Dehnung der Fasern während der Prüfung wurde anhand des aufgezeichneten Traversenwegs bezogen auf die Ausgangslänge bzw. freie Länge berechnet. Der Versuchsaufbau ist beispielhaft für die Basalt- und die PA-Faser in Bild 7 abgebildet.



Bild 7: Prüfaufbau zur Prüfung der Restzugfestigkeit der Basaltfasern (links) sowie PA-Fasern (rechts)

2.4.2 Ermittlung der Restzugfestigkeit durch SIC-Tests

Die Dauerhaftigkeitsuntersuchungen der Fasermaterialien anhand des SIC-Tests wurden in Anlehnung an /DIN05/ durchgeführt. Analog zu den Restzugproben wurden die Probekörper für den SIC-Test aus zuvor vermessenen Langfasern herauspräpariert. Die freie Prüflänge der SIC-Proben betrug 30 mm. Die Einspannung der Faserproben für die spätere Zugprüfung wurde wie bei den Restzugproben durch die Einbettung in Harzblöcke bzw. bei den PA-Fasern durch eine Einbindung in Pappe ermöglicht. Um jegliche Haftung zwischen Harz und später vergossenem SIC-Mörtel zu vermeiden, wurde im nächsten Schritt ein keilförmiger Enthftungsbereich mittels Knetmasse um die Faserprobe modelliert. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Länge des unbeeinflussten Prüfabschnitts von mindestens 20 mm nicht unterschritten wurde.

Der SIC-Mörtel wurde mit einem CEM I 42,5 R gemäß DIN EN 197-1 /DIN11/ und Normsand gemäß DIN EN 196-1 /DIN16/ hergestellt. Der w/z-Wert des Mörtels betrug 0,43. Die verwendete Mischungszusammen-setzung ist tabellarisch in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Mischungszusammensetzung des SIC-Mörtels gemäß /DIN05/

Ausgangsstoffe	Gehalt
	kg/m ³
CEM I 42,5 R	1.118,0
Wasser	447,4
Gesteinskörnung (Normsand)	372,7
Summe:	1.968,1

Für die Herstellung des SIC-Mörtels wurden zunächst die trockenen Bestandteile, Zement und Gesteinskörnung (Normsand), für 30 Sekunden homogenisiert. Dies erfolgte in einem Hobart-Mischer mit der Geschwindigkeitseinstellung 140 ± 5 U/min. In den nächsten 30 Sekunden des laufenden Mischprozesses erfolgte die Wasserzugabe. Die Mischzeit auf dieser Geschwindigkeitsstufe betrug insgesamt 90 Sekunden. Nach einer kurzen Pause, um den Bodensatz zu lösen, wurde eine Minute auf höherer Geschwindigkeitseinstellung (285 ± 10 U/min) weiter gemischt. Insgesamt betrug die Mischzeit 2,5 Minuten. Daraufhin wurden die Probekörper in der Schalung mit dem fertigen SIC-Mörtel verfüllt und durch vorsichtiges Schocken verdichtet. Um den Mörtel während seiner Aushärtung vor Austrocknung zu schützen, wurde dieser mit Folie abgedeckt. Nach 24 Stunden wurden die Probekörper ausgeschalt und entsprachen der Skizze gemäß Bild 8.

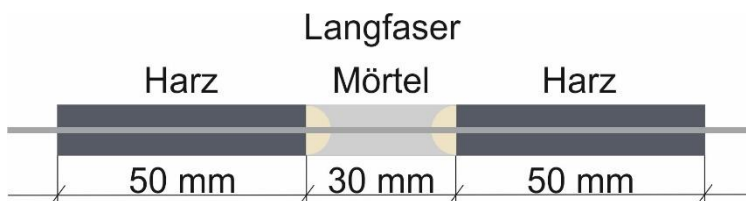


Bild 8: Skizze des fertigen SIC-Probekörpers

Für die beschleunigte Alterung wurde jede Probe in 100 ml deionisiertem Wasser bei entsprechend vorgesehener Temperatur gelagert. Analog zu der Lagerung der Restzugproben wurde für eine Serie von 12 Proben jeweils ein Behälter mit 1,2 Litern deionisiertem Wasser befüllt und bei der entsprechenden Lagerungstemperatur (20 °C, 40 °C, 60 °C oder 80 °C) vortemperiert. Unmittelbar nach dem Ausschalen der fertigen SIC-Probekörper, wurden diese entweder geprüft (SIC-20-0d) oder in den vorbereiteten Behältern eingelagert. Nach der entsprechenden Expositionsdauer von 4, 7, 14, 28 oder 90 Tagen wurden die Proben aus den Behältern entnommen und 24 Stunden, bis zu der Prüfung ihrer Restzugfestigkeit, bei Normklima gelagert. So konnten alle Proben, unabhängig von der Lagerungstemperatur, bei einer einheitlichen Temperatur von 20 °C geprüft werden.

Da die PA-Fasern im Rahmen der Zugprüfung nicht über die Harzblöcke eingespannt werden konnten wurde bei diesem Fasermaterial zunächst das Mörtelprisma mit den Abmessungen von $10 \times 10 \times 30$ mm³ hergestellt, ohne die vorherige Herstellung der Harzblöcke sowie des Enthäftungsbereichs. Nach entsprechend temperierter Lagerung wurden die Pappen mit

einem Abstand von jeweils 30 mm zum Mörtelprisma angeklebt, um eine mechanische Klemmung während der Prüfung zu ermöglichen. Eine fertige SIC-Probe der PA-Fasern ist beispielhaft in Bild 9 abgebildet.



Bild 9: SIC-Probe der PA-Fasern

Für die Sicherstellung der gleichbleibenden Qualität des SIC-Mörtels und der Vergleichbarkeit der Serien, über alle SIC-Serien hinweg, wurden zusätzlich Normprismen in Anlehnung an /DIN16/ als Begleitprobekörper jeder Serie hergestellt und auf ihre Biegezug- und Druckfestigkeit gemäß /DIN16/ geprüft.

Die Ermittlung der Restzugfestigkeit der Fasermaterialien anhand des SIC-Tests wurde in Anlehnung an /DIN05/ durchgeführt. Die Prüfung erfolgte analog zu der Prüfung der Restzugproben mit einer Universalprüfmaschine. Die Durchführung der Prüfung erfolgte ebenfalls weggeregelt jedoch gemäß /DIN05/ mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min und einer Vorlast von 5 N, einheitlich für alle Fasermaterialien. Während der Prüfung wurden die Zeit, die Kraft sowie der Traversenweg aufgezeichnet. Die Prüfung wurde beendet, sobald die Bruchlast der SIC-Probe erreicht wurde. Die Bruchspannung wurde über das Verhältnis aus maximaler Bruchlast zur äquivalenten Querschnittsfläche der Faser ermittelt.

Die Dehnung wurde über die Längenänderung zur ursprünglichen Prüflänge bestimmt. Die Prüflänge der PP-, PET- und Basaltfaserproben betrug 30 mm, wohingegen die der PA-Fasern, auf Grund der beidseitig mit einem Abstand von 30 mm zum Mörtelprisma angeklebten Pappen, 90 mm betrug.

2.4.3 4-Punkt-Biegezugprüfung

Für die Beurteilung der Dauerhaftigkeitseigenschaften von Fasermaterialien in Beton anhand des 4-Punkt-Biegezugversuchs, wurde der Beton durch die Betreuergruppe des Sachverständigenausschusses des DIBts vorgegeben. Es handelt sich dabei um eine praxisnahe Betonrezeptur, die einen alkalischen Angriff provoziert. Die Grundlage der Betonrezeptur ist in Tabelle 6 gegeben. Die genauen Mischungszusammensetzungen der jeweiligen Faserbetone mit den entsprechenden PP-, PET-, PA- und Basaltfasern sind Tabelle A1 bis Tabelle A4, Anhang A, zu entnehmen. Der Faserbeton wird mit einem

CEM I 32,5 R Zement gemäß /DIN11/ mit einem Zementgehalt von 360 kg/m^3 hergestellt. Die verwendete Sieblinie entspricht einer A/B16 Sieblinie gemäß /DIN08/ und der w/z-Wert beträgt 0,5.

Für den Fasergehalt wurde die maximale Zugabemenge angesetzt, die weiterhin eine ausreichende Verarbeitbarkeit sowie Verdichtbarkeit des Faserbetons zulässt. Dies entsprach mindestens der Konsistenzklasse F2. Der PP-Fasergehalt wurde auf 1 Vol.-% begrenzt. Der Fasergehalt der weiteren Faserbetone wurde anhand von Voruntersuchungen ermittelt und festgelegt. Dabei wurde für eine Vergleichbarkeit der Faserbetone untereinander ein Fasergehalt von 1 Vol.-% angestrebt, der lediglich beim PET-Faserbeton nicht erreicht werden konnte. Der verwendete Fasergehalt des PET-Faserbetons entsprach 0,7 Vol.-% mit einem Massegehalt von 9 kg/m^3 (vgl. Tabelle A3, Anhang A). Auf Grund der unterschiedlichen Rohdichten der Fasern, entspricht der Massegehalt des PET-Faserbetons mit 9 kg/m^3 auch dem Massegehalt des PP-Faserbetons (vgl. Tabelle A4, Anhang A), sodass an dieser Stelle ein Bezug hergestellt werden kann.

Tabelle 6: Betonrezeptur für den Beton zur Bewertung der Beständigkeit im 4-Punkt-Biegezugversuch

Ausgangsstoffe	Details
Zement	CEM I 32,5 R
	360 kg/m^3
w/z-Wert	0,50
Fasergehalt	Höchstzugabemenge
Gesteinskörnung	A/B16

Für die Ermittlung der Nachrissbiegezugfestigkeit anhand des 4-Punkt-Biegezugversuchs wurden Biegebalken mit den Abmessungen von $150 \times 150 \times 700 \text{ mm}^3$ in Anlehnung an DIN EN 12390-5 /DIN19a/ und /DAf12/ hergestellt. Die Mischungszusammensetzungen der Faserbetone sind Tabelle A1 bis Tabelle A4, Anhang A, zu entnehmen. Eine Serie besteht dabei aus 6 Biegebalken sowie 3 Würfeln mit einer Kantenlänge von 150 mm, zur Überprüfung der Druckfestigkeit, sodass eine Frischbetonmenge von 120 Litern je Serie benötigt und hergestellt wurde. Die Faserbetonherstellung erfolgte für die PP-, PET- und PA-Fasern in einem Zwangsmischer mit einem Fassungsvermögen von 120 Litern. Der Basaltfaserbeton konnte nur in einem Freifallmischer mit einem Fassungsvermögen von ebenfalls 120 Litern hergestellt werden, da die Fasern im Zwangsmischer beim Mischprozess beschädigt werden.

Bei der Faserbetonherstellung wurden zunächst die Gesteinskörnung und der Zement miteinander homogenisiert. Während des fortlaufenden Mischprozesses erfolgte die Wasserzugabe. Daraufhin wurde zunächst das Ausbreitmaß des Frischbetons ohne Fasern bestimmt. Anschließend wurde der Mischvorgang fortgesetzt bei dem die Faserzugabe erfolgte. Die Fasern wurden im Falle des PP-Faserbetons in Form von Pucks zugegeben. Bei allen weiteren Fasermaterialien erfolgte die Faserzugabe indem die Fasern in den Frischbeton eingestreut wurden, um so die Bildung von Agglomerationen zu verhindern. Im Anschluss wurde das Ausbreitmaß mit Fasern, die Frischbetonrohichte sowie der Luftgehalt des

Faserfrischbetons bestimmt (siehe Tabelle A5, Anhang A). Darauffolgend wurden die Probekörper hergestellt. Die Schalungen der Biegebalken wurden in zwei Lagen befüllt und für jeweils 7 Sekunden auf einem Rütteltisch verdichtet. Überstehender Faserbeton wurde bündig abgezogen.

Die Balken wurden nach der Herstellung für 24 Stunden bei Laborklima zum Aushärten in der Schalung belassen und mit Folie abgedeckt, um ein Austrocknen während der Aushärtung zu verhindern. Für die beschleunigte Alterung der Probekörper wurde ein beheiztes Wasserbecken mit 50 °C sowie ein unbeheiztes Wasserbecken für die Lagerung bei 20 °C vorbereitet. Unmittelbar nach dem Ausschalen wurden die Biegebalken in das vorbereitete Wasserbecken bei 20 °C bzw. 50 °C eingelagert.

Im Alter von 28, 90 bzw. 180 Tagen wurden die Biegebalken aus dem entsprechenden Wasserbecken entnommen und unmittelbar geprüft. So hatte jedoch auch die Lagerungstemperatur einen Einfluss auf das Prüfergebnis und die Probekörper waren nicht die vollen 28, 90 bzw. 180 Tage der vorgesehenen Lagerungstemperatur ausgesetzt. Ziel der Untersuchungen war jedoch ausschließlich die Dauerhaftigkeit der Fasermaterialien nach entsprechender Alterung zu beurteilen und lediglich diesen Effekt bei der Prüfung zu berücksichtigen. Aus diesem Grund wurde die Lagerung, nach den ersten untersuchten Serien, angepasst. Auf diese zuvor geprüften Serien wird in der späteren Auswertung gesondert hingewiesen. Diese werden in den Tabellen, Diagrammen und der Auswertung entsprechend mit einem Sternchen (*) gekennzeichnet. Alle anschließenden Serien wurden ebenfalls unmittelbar nach dem Ausschalen in die vortemperierten Wasserbecken eingelagert, dort für die entsprechende Alterungszeit von 28, 90 bzw. 180 Tagen belassen, ausgelagert und für weitere 7 Tage in feuchten Tüchern und Folie bei Normklima im Laborbereich gelagert. So konnten die Probekörper auf eine konstante Temperatur von etwa 20 °C abkühlen bzw. diese beibehalten. Die Probekörper wurden dementsprechend im Betonalter von 36, 98 bzw. 188 Tagen geprüft. Dies ermöglichte einheitliche Prüfbedingungen für alle untersuchten Serien, unabhängig von der Lagerungstemperatur. Ausgewählte Prüfserien, die nach verkürzter Lagerungszeit und zum Teil im warmen Zustand geprüft wurden, konnten mit der angepassten Lagerung wiederholt werden.

Bei der Herstellung der wiederholten Prüfserie des PP-Faserbetons, deren Probekörper für 28 Tage bei 50 °C gelagert wurden (PP-50-28d-neu), wurde zusätzlich ein Würfel mit einer Kantenlänge von 150 mm hergestellt, der mit einem mittig einbetonierten Temperaturfühler ausgestattet wurde. Der Würfel wurde identisch zu den Biegebalken in 50 °C warmen, vortemperiertem Wasser für 28 Tage und daraufhin weitere 7 Tage in feuchten Tüchern und Folie bei Labortemperatur gelagert. Die aufgezeichneten Daten des Temperaturfühlers sind in Bild 10 dargestellt. Während der Lagerung bei 50 °C gab es jedoch einen kurzzeitigen Stromausfall, weshalb die Temperaturdaten dieser Zeitspanne fehlen. Die Lagerung bei 50 °C begann im Probekörperalter von 1 Tag nach dem Ausschalen, dauerte 28 Tage an und der Abkühlzeitraum betrug 7 Tage, so dass die Probekörper im Alter von 36 Tagen geprüft wurden. Den Daten ist zu entnehmen, dass bereits 5 Stunden nach dem Beginn der temperierten Lagerung eine Kerntemperatur von 50 °C erreicht wurde. Bereits nach einem

Tag, nach Lagerungsende bei 50 °C, wurde bei Laborklima eine Kerntemperatur von 22,1 °C erreicht.

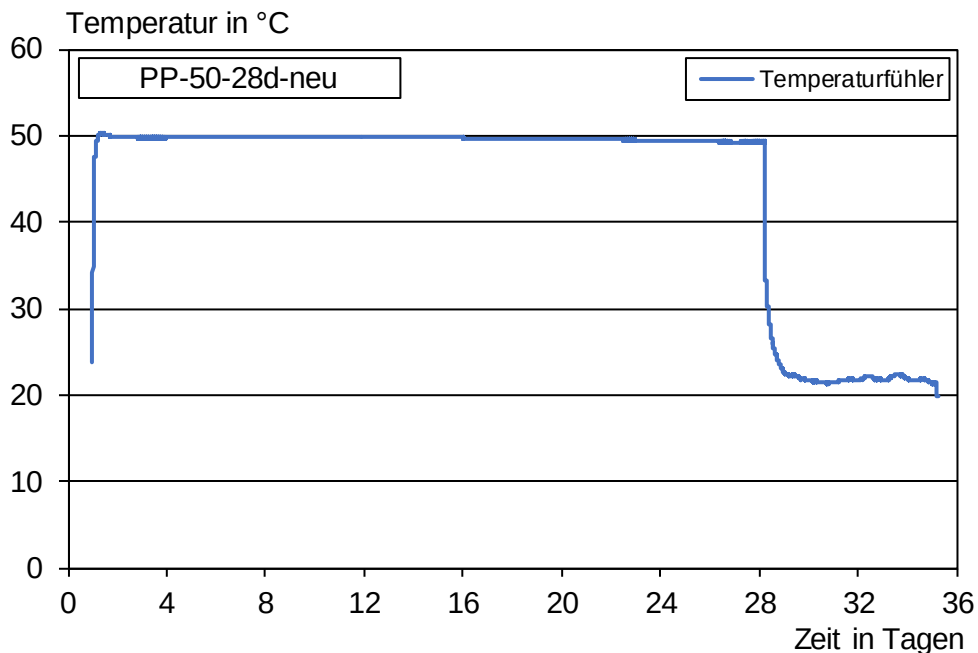


Bild 10: Messdaten des Temperaturfühlers einbetoniert in einem Würfel mit 150 mm Kantenlänge, entsprechend der Lagerung bei 50 °C in einem Wasserbecken für 28 Tage

Zur Sicherstellung der gleichbleibenden Qualität der jeweiligen Faserbeton-Herstellungen, wurden jeweils drei Würfel mit 150 mm Kantenlänge gemäß DIN EN 12390-2 /DIN19c/ hergestellt. Die Prüfung der Druckfestigkeiten erfolgte gemäß /DIN19d/ im Prüfalter von 28 Tagen nach 7-tägiger Wasserlagerung und anschließender Lagerung bei einer Temperatur von 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit (L7).

Das Biegetragverhalten der Polymerfaserbetone wurde anhand der 4-Punkt-Biegezugprüfung in Anlehnung an /DAf12/ bestimmt. Dabei umfasste eine Prüfserie jeweils 6 Biegebalken mit den Abmessungen 150 x 150 x 700 mm³. Als Auflager dienten in ihrer Längsachse frei drehbare Rollen mit einem Abstand von 600 mm. Die Lasteinleitung in den Drittelpunkten erfolgte ebenfalls über frei drehbare Rollen. Jeweils eine Rolle der Auflager- und Belastungsrollen war dabei fixiert und eine in ihrer Querachse kippbar, so dass eine gleichmäßige, zwangsfreie Auflagerung sichergestellt werden konnte. Die Wegaufnehmer, welche die mittlere Durchbiegung des Probekörpers aufzeichnen, werden über ein Gestell mittig, punktuell über den Auflagern angebracht. Dieses wird im Folgenden als Messgestell bezeichnet. Für die Messung der mittleren Durchbiegung wird mittig, an der Unterseite des Biegebalkens eine Leiste angeschraubt. Sie diente den Wegaufnehmern als Auflager, welche die Durchbiegung während der Prüfung messen können und wird im Folgenden als Prüfgestell bezeichnet. Der schematische Prüfaufbau ist in Bild 11 dargestellt. Dabei wurde der Probekörper so eingebaut, dass die Betonieroberseite des Balkens einer Seitenfläche des Prüfkörpers entsprach.

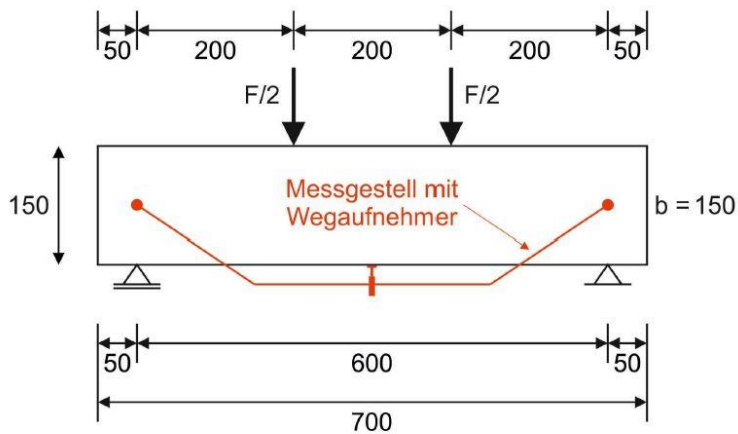


Bild 11: Skizze des Prüfaufbaus des 4-Punkt-Biegezugversuchs [Bestand ibac]

Die Prüfung erfolgte weggeregelt mit einer Universalprüfmaschine. Dabei wurde zunächst eine Vorlast von 500 N aufgebracht. Bis zu einer mittleren Durchbiegung von 0,75 mm, wurde die Prüfung mit einer Geschwindigkeit von 0,1 mm/min durchgeführt. Anschließend wurde die Prüfgeschwindigkeit auf 0,24 mm/min erhöht und bis zum Ende der Prüfung, bei einer mittleren Durchbiegung von 4,1 mm, konstant beibehalten. Der genaue Prüfaufbau ist in Bild 12 abgebildet.



Bild 12: 4-Punkt-Biegezugprüfung

Das Resultat der 4-Punkt-Biegezugprüfung ist eine Kraft-Durchbiegungskurve, anhand der das Tragverhalten nach der Rissbildung beurteilt werden kann. Standardisiert wird anhand dieser Prüfung nach /DAf12/ die statische Wirksamkeit von Fasermaterialien beurteilt und der Faserbeton in Leistungsklassen eingeteilt. Da die Leistungsklassen auf die Untersuchung und Bewertung von Stahlfaserbeton ausgelegt sind, wird die Auswertung in Anlehnung an das DBV-Merkblatt /DBV01/ angewandt. Dieses Merkblatt ist ebenfalls für die Bemessung von Stahlfaserbeton vorgesehen, doch die Fasern werden anhand ihrer Energieabsorptionsfähigkeit beurteilt, welche auch für abweichende Fasermaterialien bestimmt werden kann. Für die Ermittlung des maßgeblichen Arbeitsvermögens des Faserbetons werden nach /DBV01/ Vereinfachungen für die Berechnung der Flächenanteile des unbewehrten Betons D_{fl}^c und des Fasereinflusses D_{fl}^f getroffen. Diese Vereinfachung wurde nicht verwendet, da der Traganteil des unbewehrten Betons unter dieser Annahme weit überschätzt worden wäre. Der Traganteil des unbewehrten Betons kann auch rechnerisch über die Bruchenergie multipliziert mit der Querschnittsfläche des Bauteils bestimmt werden. Die tatsächliche Bruchenergie des unbewehrten Betons kann nur experimentell ermittelt werden. Die Bruchenergie wurde für den verwendeten Beton jedoch nicht untersucht. Aus diesem Grund und unter der Annahme, dass die Faserbewehrung keinen wesentlichen Einfluss auf die Druckfestigkeit von Beton hat, wird die Bruchenergie G_F näherungsweise nach Model Code /fib12/, anhand der geprüften mittleren Druckfestigkeit f_{cm} berechnet. Dafür wurde die Druckfestigkeit der Würfelproben in die mittlere Zylinderdruckfestigkeit (Faktor 0,81) bei nasser Lagerung (Faktor 0,92) umgerechnet. Wird die Bruchenergie mit der Querschnittsfläche der Biegebalken von $150 \times 150 \text{ mm}^2$ multipliziert, kann so näherungsweise der Betontraganteil bestimmt werden. Der Anteil des Betons wurde bei der Auswertung, statt der Vereinfachung nach /DBV01/, von dem gesamten Arbeitsvermögen abgezogen. Da die Flächenanteile unter der Last-Durchbiegungskurve des unbewehrten Betons und des Fasereinflusses entsprechend nicht am Abszissenpunkt $\delta_0 + 0,3 \text{ mm}$ separiert wurden, konnten daraufhin die äquivalenten Biegezugfestigkeiten $f_{eq,i}$ nicht berechnet werden. Aus diesem Grund wurde die Auswertung der 4-Punkt-Biegezugversuche der vier verschiedenen Faserbetone anhand der ermittelten Arbeitsvermögen $D_{fl,i}^f$ der Fasermaterialien vorgenommen.

In Bild 13 sind dazu die genutzten Bemessungspunkte mit den entsprechenden Flächen bzw. Arbeitsvermögen, beispielhaft an einer Last-Durchbiegungskurve des untersuchten PP-Faserbetons, dargestellt. An Bemessungspunkt a), bei der Durchbiegung δ_0 , wird in der Regel der Maximalwert der Last erreicht, bei der die Zugfestigkeit des Betons überschritten wird und der erste Makroriss des Probekörpers ausgebildet wird. Anhand der ermittelten Höchstlast F_U kann die Biegezugfestigkeit des Betons $f_{ct,fl}^f$ berechnet werden. Der grau hinterlegte Flächenanteil stellt vereinfacht den Traganteil des Betons (D_{fl}^c) dar. Da für alle untersuchten Faserbetone, dieselbe Betonzusammensetzung als Basis verwendet wurde, wird vereinfacht angenommen, dass der Traganteil des unbewehrten Betons für alle untersuchten Probekörper konstant ist. An Bemessungspunkt b), bei einer Durchbiegung von $\delta_0 + 0,65 \text{ mm}$, wird die Kraft $F_{\delta_0+0,65}$ sowie das maßgebende Arbeitsvermögen $D_{fl,i}^f$ für den Verformungsbereich I ermittelt. Dabei handelt es sich um die, in der schematischen Darstellung, grau karierte Fläche und die relevante Bemessungsgröße für den Grenzzustand

der Gebrauchstauglichkeit. Am letzten Bemessungspunkt c) wird die Kraft $F_{\delta_0+3,15}$ und das damit verbundene Arbeitsvermögen der Faserbewehrung $D_{fl,II}^f$, bei einer Durchbiegung $\delta_0 + 3,15$ mm, bestimmt. Der Flächenanteil $D_{fl,II}^f$ umfasst sowohl die grau schraffierte als auch die grau karierte Teilfläche. Dabei handelte es sich um die relevante Bemessungsgröße für den Grenzzustand der Tragfähigkeit.

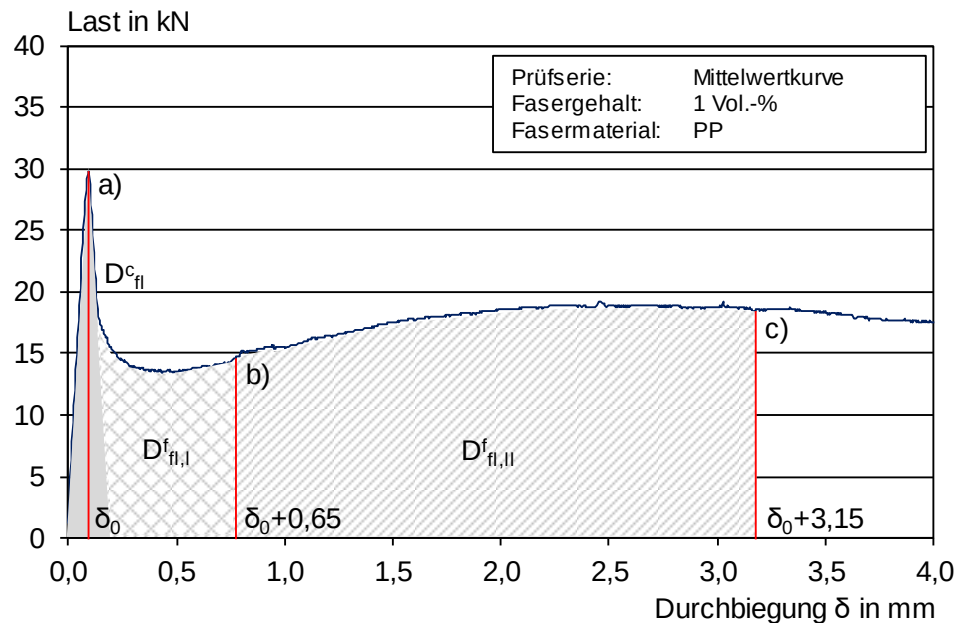


Bild 13: Schematische Darstellung einer typischen Last-Durchbiegungskurve eines PP-Faserbetons mit Bemessungswerten gemäß /DBV01/

Nach der abgeschlossenen Prüfung wurden die Balken vollständig durchgebrochen und die Bruchfläche fotografisch dokumentiert. Dies ermöglicht die Einbeziehung der Faserverteilung und des entstandenen Bruchbildes in die Auswertung der Versuche.

Der 4-Punkt-Biegezugversuch wurde an Biegebalken mit den Abmessungen $150 \times 150 \times 700 \text{ mm}^2$ durchgeführt. Die Prüfsreihen bestehen dabei aus jeweils 6 Probekörpern. Bei einer Gesamtprüfungsanzahl von 16 Serien, ergibt sich eine Probekörperanzahl von 96 Biegebalken. Der für die Untersuchungen gewählte Probenschlüssel ist Tabelle 7 zu entnehmen. Die Serienbezeichnung PP-20-28d steht dabei für eine Serie, deren Biegebalken aus PP-Faserbeton für 28 Tage im Wasserbecken bei 20°C gelagert wurden.

Tabelle 7: Probenschlüssel der 4-Punkt-Biegezug-Balkenserien

Fasermaterial		-	Temperatur in °C	-	Alter
PP	Polypropylen	-	20	-	28 d
PET	Polyethylenterephthalat				90 d
PA	Polyamid		50		180 d
B	Basalt				-

Die Prüfserien der Restzugfestigkeits- und SIC-Prüfung bestehen je Fasermaterial aus jeweils 12 Faserproben. Die Auswertung der Versuchsergebnisse wird im Folgenden behandelt. Bei einer Gesamtprüfserienanzahl von 32, ergibt sich eine jeweilige Probekörperanzahl von 384. Der für die Untersuchungen gewählte Probenschlüssel ist Tabelle 8 zu entnehmen.

Tabelle 8: Probenschlüssel der Restzugfestigkeits- und SIC-Probenserien

Fasermaterial		-	Prüfung		-	Temperatur in °C	-	Alter
PP	Polypropylen	-	RZ	Restzug- festigkeit	-	20	-	4 d
PET	Polyethylen- terephthalat					40		7 d
						60		14 d
PA	Polyamid		SIC	SIC-Test		80		28 d
B	Basalt					-		90 d

Insgesamt besteht das Prüfprogramm, das ursprünglich mittels Minitab ausgedrückt werden sollte, aus 864 Probekörpern. Eine Übersicht der ausgewählten, untersuchten Serien ist in Tabelle A6 und Tabelle A7, Anhang A, gegeben. Ergänzend wurden einzelne Serien zusätzlich hergestellt und geprüft. So ergab sich ein Prüfumfang für die SIC- und Restzugfestigkeitsprüfung von jeweils 42 Serien und für die 4-Punkt-Biegezugprüfung von 21 Serien, sodass insgesamt 1.134 Probekörpern ausgewertet werden können.

3 Darstellung und Diskussion der Versuchsergebnisse

3.1 Allgemeines

Im Folgenden werden die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen dargestellt und Unterschiede in der Degradation der vier Fasermaterialien, hervorgerufen durch die verschiedenen Prüfverfahren, herausgearbeitet. Darüber hinaus werden Zusammenhänge zwischen den Ergebnissen verschiedener Versuche oder Prüfreiheiten erläutert und gedeutet, nicht aber die Eignung der Versuche diskutiert.

3.2 Einzelfaser-Zugversuche

3.2.1 Einzelfaser-Zugversuche der PP-Fasern

Das Spannungs-Dehnungsdiagramm der RZ-Versuch-Referenzserie (PP-RZ-20-0d) ist in Bild 14 abgebildet. Im Mittel wurde eine Höchstlast von 193,4 N erreicht, so dass sich bei einer mittleren äquivalenten Querschnittsfläche von 0,39 mm² eine mittlere Zugfestigkeit von 497,1 N/mm² ergibt. Die Ergebnisse weisen eine Standardabweichung von 16,83 mit einem Variationskoeffizienten von 3,39 % auf. Die Einzelergebnisse der Prüfserie sind der Tabelle A8, Anhang A, zu entnehmen.

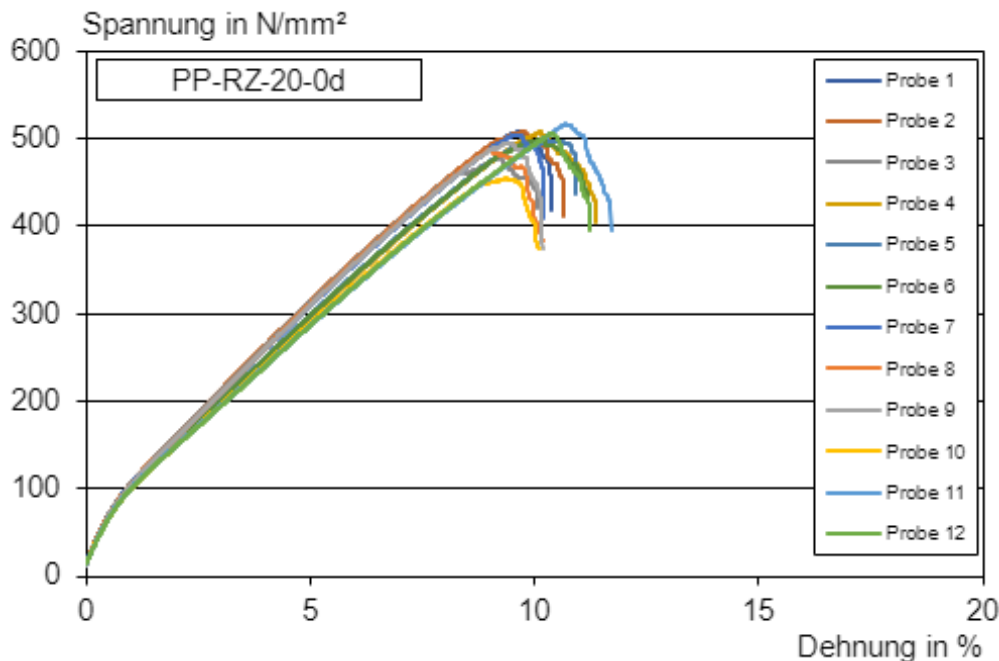


Bild 14: Spannungs-Dehnungsdiagramm der Referenz-Serie PP-RZ-20-0d

Auffällig am Kurvenverlauf der Spannungs-Dehnungsbeziehung der PP-Faser ist der zunächst steile Anstieg des Verlaufs (linear-elastischer Bereich), der bei ca. 80 N/mm² leicht abknickt (plastischer Bereich), sowie der nicht schlagartige Bruch der Fasern. Dies weist auf ein nicht-sprödes Materialverhalten hin. Die Fasern dehnen sich bis zu ihrem Bruch bei ca. 500 N/mm² um bis zu 10 % bei einer Ausgangslänge von 150 mm.

Die Ergebnisse der DSC-Analyse (vgl. Bild B3, Anhang B) zeigen, dass der Schmelzpunkt der PP-Faser bei ca. 165 °C, liegt. Die maximal untersuchten Umgebungstemperaturen während der Versuche betrugen bis zu 80 °C. Die Differenz zwischen Umgebungstemperatur und Schmelztemperatur ist ausreichend hoch, um verändernde Effekte auf die Eigenschaften des Fasermaterials, die ausschließlich durch die Temperatur hervorgerufen werden, ausschließen zu können. Eventuell auftretende Abfälle der Zugfestigkeit, nach künstlicher Alterung, können somit ausschließlich auf die erhöhte Alkalität zurückgeführt werden.

Die Spannungs-Dehnungsdiagramme der Prüfserien, die in künstlicher Porenlösung und unter Temperatureinfluss gelagert wurden, sind in Bild B5 und Bild B6, Anhang B, dargestellt und die Einzelergebnisse sind in Tabelle A10 bis Tabelle A14, Anhang A aufgeführt. Bei den folgenden Ausführungen werden lediglich die jeweiligen mittleren Bruchlasten betrachtet.

In Bild 15 sind die mittleren Bruchspannungen der untersuchten Prüfserien mit den dazugehörigen Standardabweichungen als Balkendiagramm zusammenfassend dargestellt. Die Mittelwerte der untersuchten Probekörper, welche in künstlicher Porenlösung und bei erhöhten Temperaturen gelagert wurden, weisen keine signifikanten Abweichungen im Vergleich zur Referenz (0 d, 20 °C) auf. Die leichten Variationen der Bruchlasten, können beispielsweise auf die Einflüsse der Probenpräparation zurückgeführt werden und liegen in einem vertretbaren Rahmen. Es kann demnach kein signifikanter Trend der Festigkeitsänderung nach langzeitiger und temperierter Lagerung festgestellt werden.

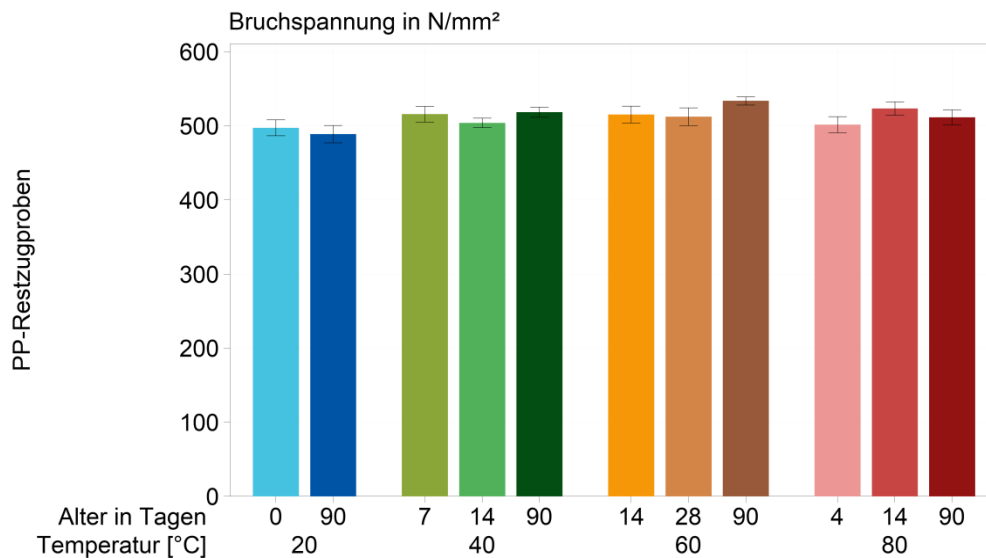


Bild 15: Balkendiagramm der erreichten mittleren Bruchspannungen der einzelnen Prüfserien der PP-Restzugproben mit zugehöriger Standardabweichung

Die Festigkeitsänderungen wurden zudem rechnerisch bestimmt und sind in Tabelle 9 aufgeführt. Die mittlere Bruchspannung aller Prüfserien weist eine Standardabweichung von 12,54 N/mm² und einen Variationskoeffizienten von 2,46 % auf. Auch der jeweilige Variationskoeffizient der einzelnen Prüfserien liegt stets unter 4 %, was auf eine geringe Streuung der Versuchsergebnisse hinweist. Es kann keine Abnahme der Zugfestigkeit festgestellt werden, sondern gegenteilig eine geringe Zunahme, welche jedoch im Bereich des Variationskoeffizienten der Referenzserie liegt. Da die Prüfserien jeweils aus lediglich 12 Probekörpern bestehen und die einzelnen Probekörper aus verschiedenen Langfasern herauspräpariert wurden, liegt nahe, dass dieses Ergebnis auf produktionsspezifische bzw. transportspezifische Einflüsse und/oder versuchstechnische bzw. durch die Probenpräparation hervorgerufene Einflüsse zurückzuführen sind und nicht auf einen positiven Einfluss der Alkalität und/oder hohen Temperatur auf die Festigkeitseigenschaften von PP-Fasern hindeuten.

Tabelle 9: Mittlere Bruchspannung aller untersuchten Prüfserien an den PP-Fasern und entsprechende Festigkeitsänderung

Serie	Bruchspannung Mittelwert	Festigkeitsänderung
	N/mm ²	%
PP-RZ-20-0d	497,1	-
PP-RZ-20-90d	488,7	-1,69
PP-RZ-40-7d	515,7	+3,73
PP-RZ-40-14d	503,8	+1,34
PP-RZ-40-90d	518,2	+4,24
PP-RZ-60-14d	515,1	+3,61
PP-RZ-60-28d	512,1	+3,02
PP-RZ-60-90d	533,4	+7,30
PP-RZ-80-4d	501,3	+0,83
PP-RZ-80-14d	523,0	+5,20
PP-RZ-80-90d	511,2	+2,82

Auf Grundlage der ermittelten Versuchsergebnisse, können die untersuchten PP-Fasern als im alkalischen Milieu beständig bewertet werden.

Das Spannungs-Dehnungsdiagramm der Referenzserie des SIC-Tests (PP-SIC-20-0d) ist in Bild 16 abgebildet. Im Mittel wurde eine Höchstlast von 203,8 N erreicht, so dass sich bei einer mittleren äquivalenten Querschnittsfläche von 0,39 mm² eine mittlere Zugfestigkeit von 532,2 N/mm² ergibt. Die Ergebnisse weisen eine Standardabweichung von 20,83 mit einem Variationskoeffizienten von 3,91 % auf. Die Einzelergebnisse der Prüfserie sind der Tabelle A15, Anhang A, zu entnehmen.

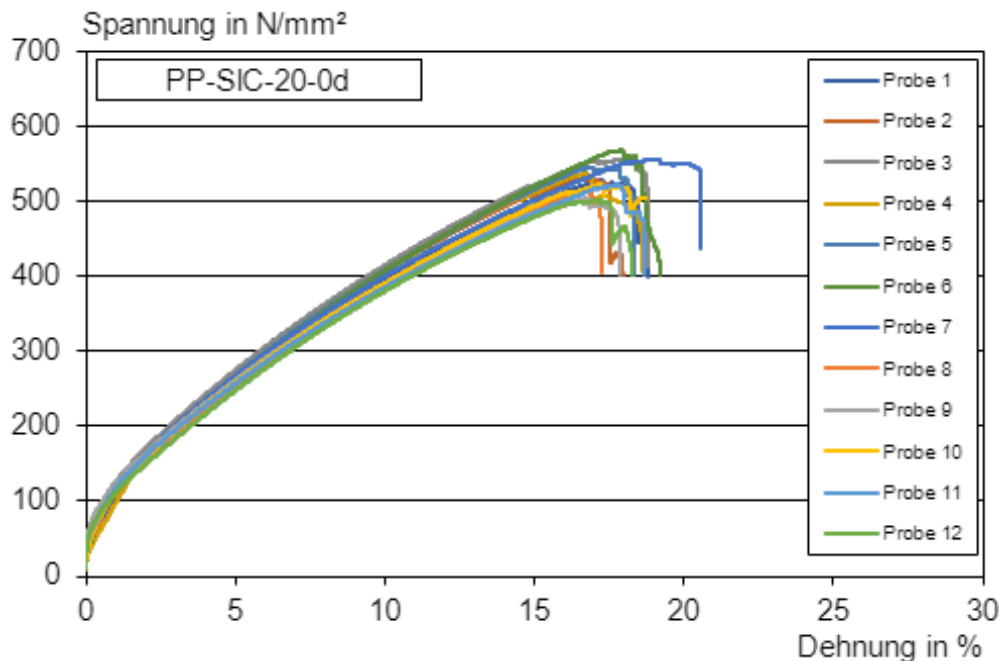


Bild 16: Spannungs-Dehnungsdiagramm der Referenz-Serie PP-SIC-20-0d

Die Spannungs-Dehnungsdiagramme der Prüfserien der SIC-Proben bei variiertem Lagerungstemperatur und -dauer sind in Bild B7 und Bild B8, Anhang B, zu finden. Die Einzelergebnisse sind in Tabelle A16 bis Tabelle A21, Anhang A, aufgeführt. Die Kurvenverläufe dieser Spannungs-Dehnungslinien weisen ebenfalls das zuvor beschriebene Materialverhalten auf. Die im Mittel erreichte Bruchspannung liegt bei allen Serien bei etwas über 500 N/mm² (vgl. Bild 17). Bis auf die Prüfserien, bei denen die Lagerungstemperatur 80 °C betrug, weisen alle weiteren Serien ebenfalls eine Bruchdehnung von ca. 20 % auf. Die Serien, bei denen die Probekörper vor der Prüfung bei 80 °C gelagert wurden, weisen ein höheres Dehnungsmaß auf. Nach 4- und 14-tägiger Lagerung erreichen die Probekörper eine Bruchdehnung von etwa 25 % und nach einer Lagerung von 90 Tagen sogar von knapp 30 %. Diese Beobachtungen lassen vermuten, dass die höhere Temperatur von 80 °C das Fasermaterial in einem geringen Maß erweichen lässt. Dies führt bei der vergleichsweise langsamen Zugbeanspruchung von 1 mm/min zu einem erhöhten Dehnungsmaß. Die Zugfestigkeit des Fasermaterials wird jedoch nicht beeinflusst, so dass die Änderung des Dehnungsverhaltens nicht für die Auswertung der Prüfergebnisse hinsichtlich der Festigkeitsänderung des Fasermaterials nach Exposition im alkalischen Milieu relevant ist.

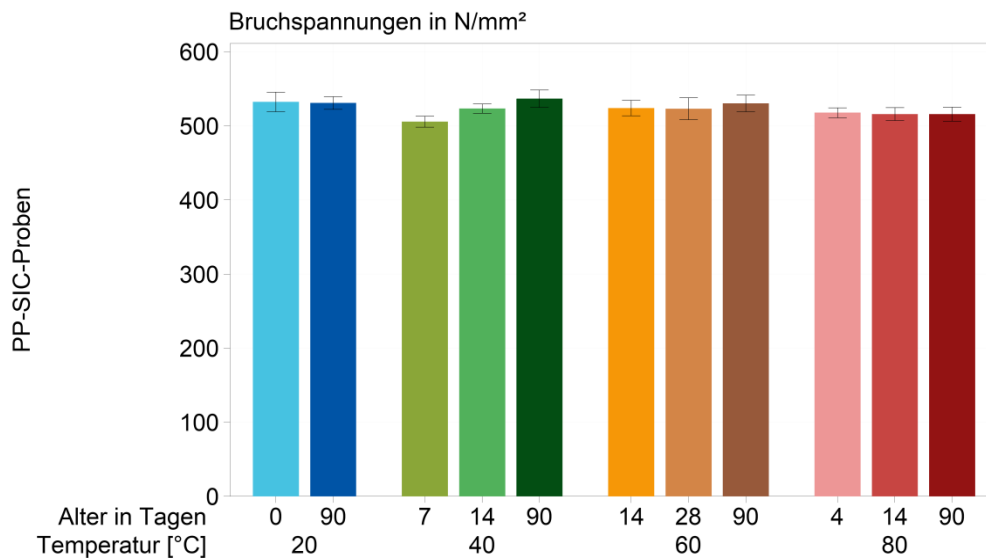


Bild 17: Balkendiagramm der erreichten mittleren Bruchspannungen der einzelnen Prüfserien der PP-SIC-Proben mit zugehöriger Standardabweichung

In Bild 17 sind die im Mittel erreichten Bruchspannungen der einzelnen Prüfserien mit der jeweiligen Standardabweichung abgebildet. Die rechnerisch bestimmten mittleren Festigkeitsänderungen der einzelnen Versuchsserien, in Bezug auf die Referenz-Restzugfestigkeit, sind in Tabelle 10 aufgeführt. Die Festigkeitsänderung von bis zu 5 % kann, wie auch schon bei den Untersuchungen der Restzugfestigkeit nach Lagerung in künstlicher Porenlösung, mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die Streuung der Versuchsergebnisse sowie der produktspezifischen Eigenschaften des Fasermaterials zurückgeführt werden.

Tabelle 10: Mittlere Bruchspannung aller untersuchten Prüfserien an den PP-Fasern und entsprechende Festigkeitsänderung

Serie	Bruchspannung Mittelwert	Festigkeitsänderung
	N/mm²	%
PP-SIC-20-0d	532,2	-
PP-SIC-20-90d	530,7	-0,28
PP-SIC-40-7d	505,6	-5,01
PP-SIC-40-14d	523,2	-1,70
PP-SIC-40-90d	536,5	+0,81
PP-SIC-60-14d	524,0	-1,55
PP-SIC-60-28d	523,1	-1,72
PP-SIC-60-90d	530,2	-0,38
PP-SIC-80-4d	517,7	-2,73
PP-SIC-80-14d	515,8	-3,08
PP-SIC-80-90d	515,8	-3,09

Anhand der erlangten Ergebnisse kann die PP-Faser als alkalibeständig eingeordnet werden.

3.2.2 Einzelfaser-Zugversuche der PET-Fasern

Das Spannungs-Dehnungsdiagramm der Referenzserie (PET-RZ-20-0d) ist in Bild 18 dargestellt. Im Mittel wurde eine Höchstlast von 208,9 N erreicht, so dass sich bei einer mittleren äquivalenten Querschnittsfläche von 0,39 mm² eine mittlere Zugfestigkeit von 533,6 N/mm² ergibt. Die Ergebnisse weisen eine Standardabweichung von 19,58 mit einem Variationskoeffizienten von 3,67 % auf. Die Einzelergebnisse der Prüfsreihe sind der Tabelle A22, Anhang A, zu entnehmen.

Die Probe 12 wurde bei der Auswertung nicht berücksichtigt, da sie, wie im Kurvenverlauf deutlich sichtbar, zum Teil aus dem Harzblock und damit verbunden aus der Einspannung ausgezogen wurde und dementsprechend die Zugfestigkeit der Probe nicht bestimmt werden konnte.

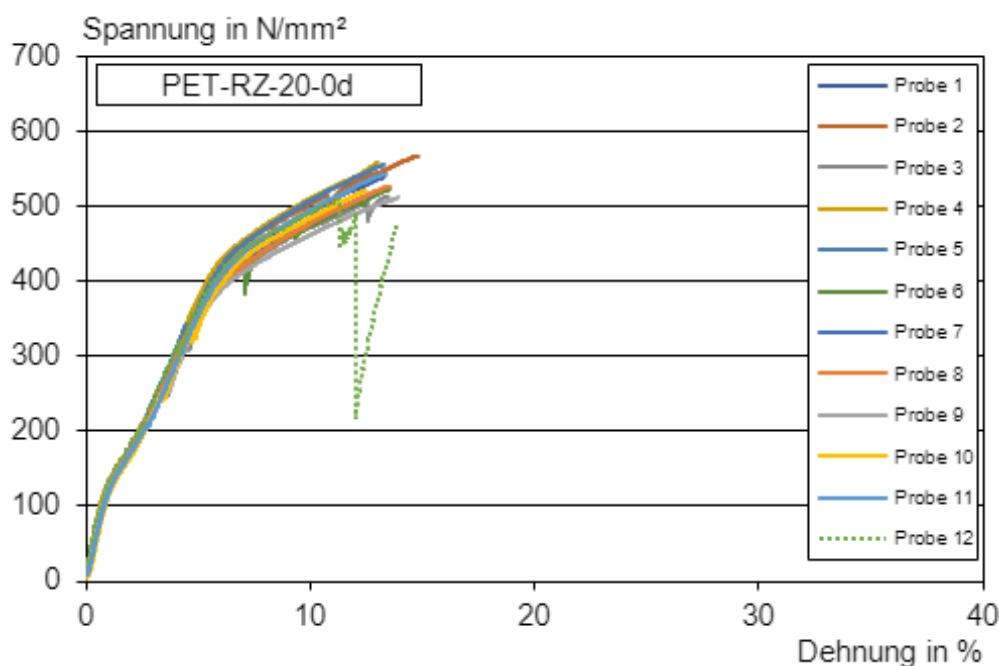


Bild 18: Spannungs-Dehnungsdiagramm der Referenz-Serie PET-RZ-20-0d

Anhand des Kurvenverlaufs der Spannungs-Dehnungslinien ist ein zunächst steiler, linearer Anstieg der Zugspannung während der Prüfung zu erkennen. Bei einer Spannung von ca. 150 N/mm² fängt das Fasermaterial kurzzeitig an zu fließen. Anschließend steigt die Spannungszunahme jedoch mit lediglich etwas abgeminderter Steigung weiter, bis zu einer Zugspannung von etwa 420 N/mm², linear an. Bei einer erreichten Spannung von ca. 420 N/mm² und 6,5 % Dehnung weist der Kurvenverlauf einen erneuten Knick auf und die Spannung nimmt, bis zum Bruch bei etwa 530 N/mm² unter erhöhtem Dehnungszuwachs, langsamer aber weiterhin stetig zu. Der Faserbruch erfolgt schlagartig beim Erreichen der Bruchspannung und einer mittleren Dehnung von etwa 13 %, bei einer Ausgangslänge von 150 mm. Der vertikale Abfall der Spannungs-Dehnungskurve nach Faserbruch (Spröbruch) wird im Diagramm nicht mehr dargestellt.

Die Spannungs-Dehnungsdiagramme der weiteren Prüfserien der PET-Fasern, bei denen die Probekörper vor der Zugprüfung in künstlicher Porenlösung bei variierender Umgebungstemperatur und Dauer lagerten, sind in Bild B9 und Bild B10, Anhang B, aufgeführt und die Einzelergebnisse sind Tabelle A23 bis Tabelle A28, Anhang A, zu entnehmen. Bereits bei der Probekörperpräparation für die Prüfung der Restzugfestigkeit konnte festgestellt werden, dass sich die Proben, die für den Zeitraum von mindestens 28 Tagen bei $\geq 60\text{ °C}$ gelagert wurden, in ihrer Prüflänge verkürzt hatten. Alle Probekörper wurden, mit einer freien Prüflänge von 150 mm hergestellt und eingelagert. Nach 28 Tagen bei einer Umgebungstemperatur von 60 °C betrug die freie Länge im Mittel lediglich noch 146 mm. Bei der Lagerung für 28 Tagen bei 80 °C konnte im Mittel noch eine Prüflänge von 137 mm und für 90 Tage bei 80 °C lediglich noch eine verbleibende Prüflänge von gemittelt 133,5 mm gemessen werden. Diese Verkürzung der Probekörper wurde bei der Berechnung der Dehnung, um die sich die Faserproben während der Zugprüfung verformt, berücksichtigt.

Die Abnahme der Probekörperlänge von bis zu durchschnittlich 16,5 mm (11 %) deutet auf eine temperaturabhängige Materialveränderung der PET-Faser bei erhöhten Umgebungstemperaturen hin. Die Glasübergangstemperatur des Fasermaterials konnte mittels der DSC-Analyse zuvor ermittelt werden. Der Glasübergangstemperaturbereich der untersuchten PET-Fasern liegt bei $79,1\text{ °C}$ bis $89,1\text{ °C}$ (vgl. Bild B2, Anhang B). Die Verkürzung der Probekörper kann dementsprechend auf die Lagerung bei einer Umgebungstemperatur im Glasübergangstemperaturbereich des Fasermaterials zurückgeführt werden.

Die Spannungs-Dehnungslinien der Prüfserien der Restzugproben (vgl. Bild B9, Anhang B) weisen bei einer Lagerungstemperatur von 20 °C und 40 °C , unabhängig von der Lagerungsdauer, einen, im Vergleich zur Referenzserie (vgl. Bild 18), unveränderten Kurvenverlauf auf. Bei einer Lagerungstemperatur von 60 °C (vgl. Bild B10, Anhang B) nimmt die Gesamtdehnung der Restzugproben zu. Die Dehnung der Proben nimmt vorwiegend im Zugspannungsbereich von 150 N/mm^2 zu. Der Sattelpunkt des Kurvenverlaufs in diesem Bereich ist deutlicher ausgeprägt. Das Fasermaterial beginnt zu fließen und besitzt somit eine geringere Steifigkeit bzw. einen geringeren Elastizitätsmodul als die zuvor betrachteten Serien, bei denen die Lagerungstemperatur 20 °C und 40 °C betrug. Die Faserproben, welche bei 60 °C gelagert wurden, erreichen beim Versagen eine Gesamtdehnung von bis zu 20 %. Diese Änderung der Materialeigenschaften wird bei einer Lagerung von 80 °C zudem verstärkt. Der Sattelpunkt des Kurvenverlaufs liegt bei einer Zugspannung von ca. 150 N/mm^2 und ist noch deutlich ausgeprägter im Vergleich zu den Verläufen der bei 60 °C gelagerten Probekörper. Das Fasermaterial dehnt sich in diesem Bereich um bis zu 5 % und die Probekörper erreichen eine Gesamtdehnung von knapp 30 %. Die im Mittel erreichten Bruchspannungen der untersuchten Serien bleiben jedoch weitestgehend unverändert. Diese sind im nachfolgenden Bild 19 mit den zugehörigen Standardabweichungen als Balkendiagramm zusammengefasst dargestellt.

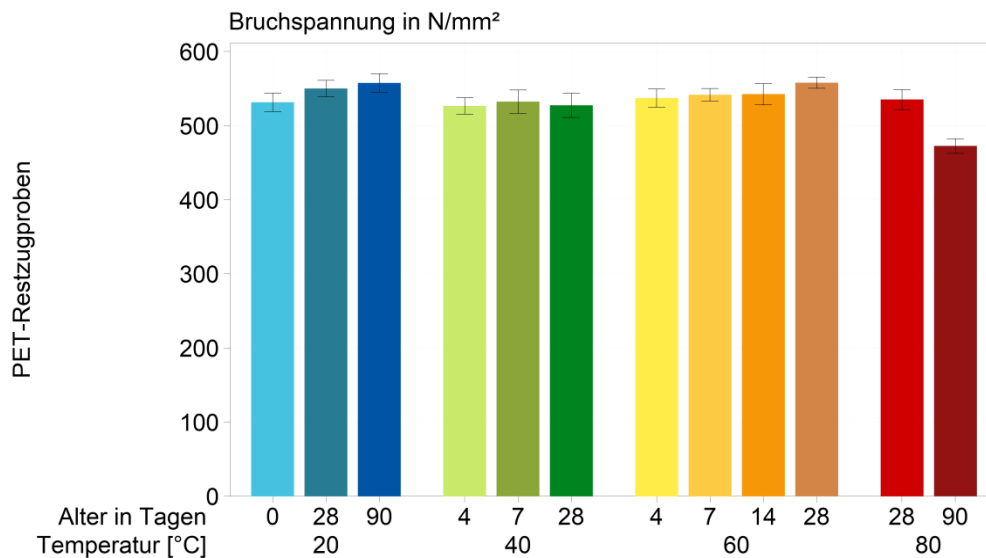


Bild 19: Balkendiagramm der erreichten mittleren Bruchspannungen der einzelnen Prüfserien der PET-Restzugproben mit zugehöriger Standardabweichung

Die Festigkeitsänderung der mittleren Bruchspannung in Bezug auf die Ausgangszugfestigkeit des Fasermaterials wurde zudem rechnerisch bestimmt und ist Tabelle 11 zu entnehmen. Die Schwankung der mittleren Bruchspannung der Prüfserien von unter 5 % kann bei einer maximalen Probekörperanzahl von 12 je Serie mit hoher Wahrscheinlichkeit auf den Streubereich der Versuchsergebnisse und der mechanischen Eigenschaften des Fasermaterials zurückgeführt werden. Bei einigen Prüfserien konnten einzelne Proben bei der Auswertung nicht berücksichtigt werden, da sie aus der Einspannung gezogen wurden oder einen statistischen Ausreißer nach Grubbs darstellten, sodass nicht bei jeder Prüfserie die Ergebnisse von 12 Probekörpern für die Auswertung zur Verfügung standen.

Lediglich bei der Prüfserie, bei der die Probekörper für 90 Tage bei 80 °C in künstlicher Porenlösung gelagert wurden (PET-RZ-80-90d) ist eine deutliche Abnahme der Zugfestigkeit von knapp 11,5 % zu verzeichnen, welche nicht ausschließlich auf die Streuung der Versuchsergebnisse zurückzuführen sein kann. Bei einer Umgebungstemperatur von 80 °C hat sich das Fasermaterial, wie schon zuvor beschrieben, sichtlich verändert (verkürzt). Da keine weitere Prüfserie eine signifikante Abnahme der Zugfestigkeit nach entsprechender Exposition zeigte, kann die Festigkeitsabnahme der Serie PET-RZ-80-90d wahrscheinlich auf die temperaturbedingte Veränderung, bei langzeitiger Lagerung im Glasübergangs-Temperaturbereich des Fasermaterials, der Materialeigenschaften bezogen werden. Eine Degradation hätte sonst schon bei der Serie PET-RZ-80-28d in verringertem Ausmaß messbar sein müssen. Eine Degradation der PET-Faser, durch einen alkalischen Angriff der umgebenden künstlichen Porenlösung, kann anhand dieser Versuchsergebnisse daher nicht festgestellt werden.

Tabelle 11: Mittlere Bruchspannung aller untersuchten Prüfserien an den PET-Fasern und entsprechende Festigkeitsänderung

Serie	Bruchspannung Mittelwert	Festigkeitsänderung
	N/mm ²	%
PET-RZ-20-0d	533,6	-
PET-RZ-20-28d	550,0	+3,07
PET-RZ-20-90d	557,7	+4,52
PET-RZ-40-4d	526,6	-1,32
PET-RZ-40-7d	532,4	-0,23
PET-RZ-40-28d	527,6	-1,13
PET-RZ-60-4d	537,2	+0,67
PET-RZ-60-7d	541,7	+1,51
PET-RZ-60-14d	542,6	+1,69
PET-RZ-60-28d	557,9	+4,56
PET-RZ-80-28d	535,3	+0,31
PET-RZ-80-90d	472,6	-11,44

Die erzielten Ergebnisse führen zu der Schlussfolgerung, dass die untersuchten PET-Fasern als alkalibeständig eingestuft werden können, jedoch bei Temperaturen über 60 °C nicht zwangsläufig ihre Beständigkeit beibehalten.

An 12 Probekörpern wurde auch hier die Faserzugfestigkeit durch SIC-Tests unmittelbar nach dem Aushärten des SIC-Mörtels bestimmt. Das Spannungs-Dehnungsdiagramm der Referenzserie (PET-SIC-20-0d) ist in Bild 20 dargestellt. Im Mittel wurde eine Höchstlast von 218,8 N erreicht, so dass sich bei einer mittleren äquivalenten Querschnittsfläche von 0,39 mm² eine mittlere Zugfestigkeit von 559,8 N/mm² ergibt. Die Ergebnisse weisen eine Standardabweichung von 30,05 mit einem Variationskoeffizienten von 5,37 % auf. Die Einzelergebnisse der Prüfserie sind der Tabelle A29, Anhang A, zu entnehmen.

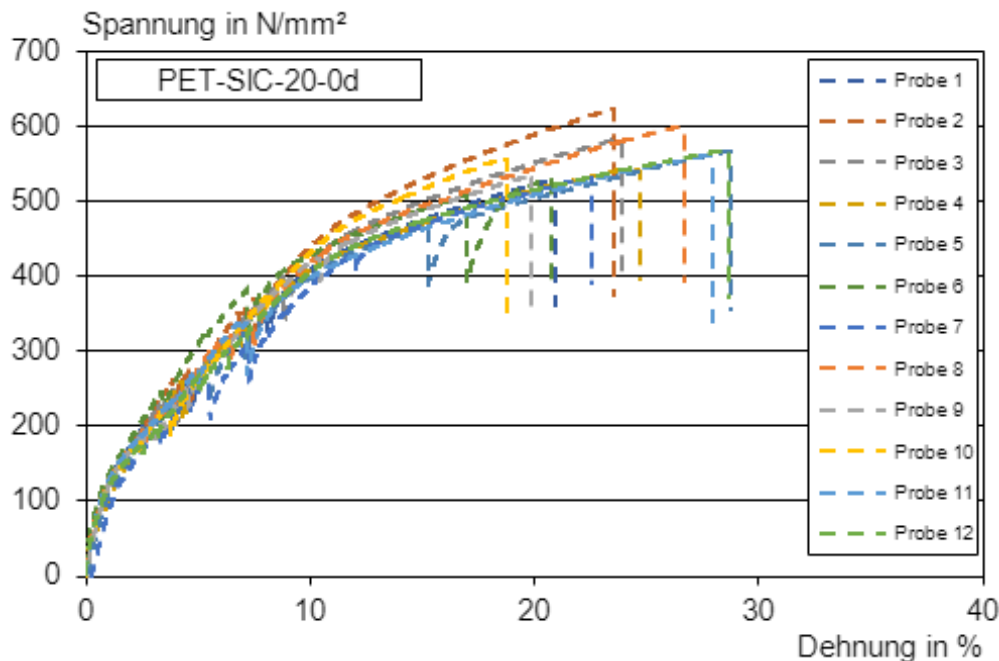


Bild 20: Spannungs-Dehnungsdiagramm der Referenz-Serie PET-SIC-20-0d

Die Proben der Referenzserie PET-SIC-20-0d weisen bei Faserbruch im Mittel eine Dehnung von 24 % auf. Im Vergleich zu der Referenzserie der Restzugproben entspricht dies in etwa dem doppelten Dehnungsmaß. Die Steigerung von etwa 13 % auf im Mittel 24 % ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die geringere Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min anstatt 6 mm/min zurückzuführen. Dieses Verhalten konnte bereits bei den Untersuchungen der PP-Faser beobachtet und festgestellt werden.

Die bei Betrachtung der Spannungs-Dehnungslinien der SIC-Proben der Referenz-Serie auffälligen, kurzzeitigen Festigkeitsabfälle bei einer Zugspannung von etwa 300 N/mm², können diverse Ursachen haben. Zum einen wäre es denkbar, dass die Faserproben minimal aus dem Harzblock der Einspannung gezogen werden, zum anderen könnte auch ein Verbundversagen zwischen Faser und umhüllendem Mörtel die Ursache sein. Mit SIC-Prüfungen sollten, in der Regel, ausschließlich die verbleibende Zugfestigkeit des Fasermaterials, unabhängig von Verbundeinflüssen, untersucht werden können. Da die PET-Fasern jedoch zur Verbesserung der Verbundeigenschaften zur umgebenden zementgebundenen Matrix eine geprägte Oberfläche aufweisen, ist nicht auszuschließen, dass auch der Verbund zwischen Faser und Mörtel einen Einfluss auf das Ergebnis der SIC-Prüfung hat. Dementsprechend könnten die geringfügigen Spannungsabfälle auf die Lösung des Haftverbundes bzw. das Abscheren von mikroskopisch kleinen Mörtelkonsolen zwischen den Einkerbungen der Fasern, bei dem ein Auszugskanal gebildet wird, zurückzuführen sein. Eine weitere Ursache könnte eine Unstetigkeit im Probekörper oder ein äußerer Einfluss auf die Prüfung sein. Auch eine geringfügige Exzentrizität der Faserprobe wäre eine weitere mögliche Ursache. Da die genaue Ursache nicht geklärt werden kann, wurden die Probekörper, die ein entsprechendes Zugtragverhalten zeigen aber keine Ausreißer nach Grubbs repräsentieren, weiter bei der Auswertung der Versuchsergebnisse berücksichtigt. Ferner zeigen die SIC-Proben der PET-Fasern das gleiche Materialverhalten unter

Zugbeanspruchung, wie die Restzugproben. Die Proben versagen ebenfalls schlagartig, sobald ihre entsprechende Bruchspannung erreicht wurde.

Die Spannungs-Dehnungsdiagramme der weiteren Prüfserien der SIC-Proben der PET-Fasern sind in Bild B11 und Bild B12, Anhang B, abgebildet. Bei Serie PET-SIC-60-7d wurden drei Proben (Probe 7, Probe 11 und Probe 12) aus der Einspannung gezogen. Dies ist anhand der Spannungs-Dehnungslinien deutlich zu erkennen. Diese Proben wurden bei der Auswertung nicht weiter berücksichtigt und sind in den Tabellen der Einzelwerte der Prüfergebnisse (Tabelle A30 bis Tabelle A35, Anhang A) nicht mit aufgeführt. Alle Serien zeigen in den Spannungs-Dehnungskurven das gleiche Verhalten unter Zugbeanspruchung wie die Referenzserie (PET-SIC-20-0d). Erst bei den Serien, bei denen die Probekörper bei 80 °C gelagert wurden, ist ein deutlich frühzeitiger Faserbruch bei geringerer Zugspannung zu beobachten. Die im Mittel erreichten Bruchspannungen der einzelnen Prüfserien mit zugehöriger Standardabweichung sind in Bild 21 dargestellt.

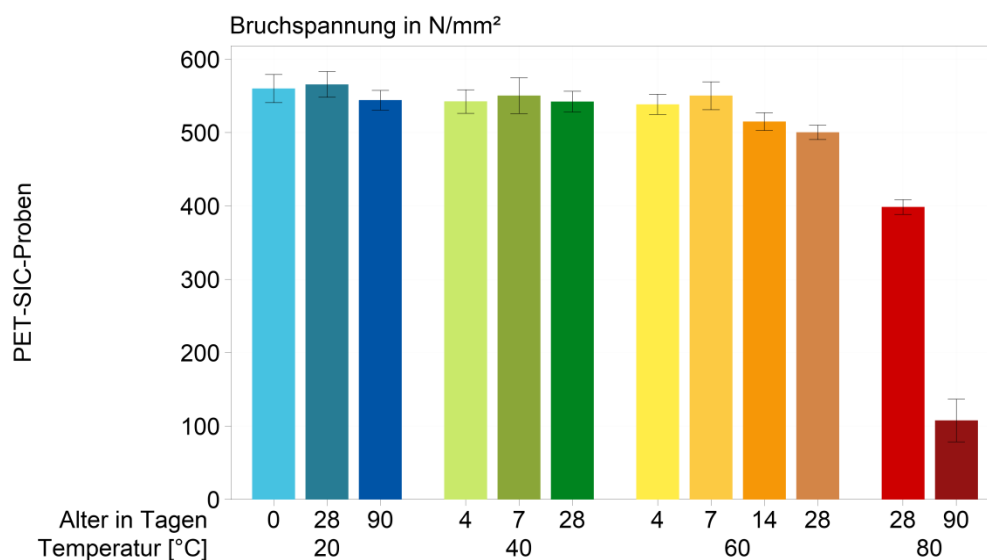


Bild 21: Balkendiagramm der erreichten mittleren Bruchspannungen der einzelnen Prüfserien der PET-SIC-Proben mit zugehöriger Standardabweichung

Die Probenlagerung bei 80 °C ist kritisch zu bewerten, da die Glasübergangstemperatur der PET-Fasern im Bereich zwischen 79,1 °C und 89,1 °C liegt (vgl. Bild B2, Anhang B). Schon bei den Untersuchungen der Restzugproben wurde beobachtet, dass sich das Fasermaterial bei einer längeren Lagerung bei Temperaturen ≥ 60 °C zusammenzieht. Dem Aufbau der SIC-Probekörper geschuldet, bei der die Harzblöcke, die für die Einspannung der Faserproben benötigt werden, unmittelbar an das, die Prüflänge umschließende, Mörtelprisma angrenzen, kann sich die Faserprobe bei erhöhten Temperaturen nicht verkürzen. Die vom Fasermaterial angestrebte Verformung wird durch den nahtlosen Übergang zwischen Harz und Mörtel behindert. Infolgedessen treten innere Spannungen im Probekörper auf. Dies führt mit großer Wahrscheinlichkeit zu dem markanten Festigkeitsabfall der Prüfserie PET-SIC-80-90d.

Die rechnerisch ermittelten Festigkeitsänderungen der Prüfserien, in Bezug auf die Zugfestigkeit der Referenzserie, sind in Tabelle 12 aufgelistet. Die zu verzeichnenden Schwankungen von bis zu 4 % scheinen im Streubereich der Fasermaterialeigenschaften zu liegen. Die zunehmende Festigkeitsabnahme der Proben, die mindestens 14 Tage bei einer Umgebungstemperatur von 60 °C gelagert wurden, ist jedoch höchstwahrscheinlich auf die temperaturbedingte Änderung des Fasermaterials zurückzuführen. Durch die behinderte Verkürzung der Faserproben innerhalb der SIC-Probekörper stehen die Faserproben schon vor der Zugprüfung unter Spannung und sind dementsprechend vorgeschädigt. Mit zunehmender Lagerungsdauer bei mindestens 60 °C steigt entsprechend des geprüften Zeitraums, in welchem die Faserprobe intern unter Spannung steht, die Vorschädigung und damit einhergehend resultiert der rapide Festigkeitsabfall. Dies zeichnet sich entsprechend auch in der Zunahme der Festigkeitsänderung ab. Nach einer Lagerung von 90 Tagen bei 80 °C weisen die PET-Fasern lediglich noch eine Restzugfestigkeit von knapp 20 % der ursprünglichen Zugfestigkeit auf. Zusätzlich steigt der Variationskoeffizient dieser Prüfserie auf 40 %. Zu berücksichtigen ist außerdem der geringe Probekörperumfang von lediglich 11 Probekörpern, da bereits ein Probekörper vor der Prüfung gebrochen war.

Tabelle 12: Mittlere Bruchspannung aller untersuchten Prüfserien an den PET-Fasern und entsprechende Festigkeitsänderung

Serie	Bruchspannung Mittelwert	Festigkeitsänderung
	N/mm ²	%
PET-SIC-20-0d	559,8	-
PET-SIC-20-28d	565,6	+1,03
PET-SIC-20-90d	544,0	-2,83
PET-SIC-40-4d	542,2	-3,14
PET-SIC-40-7d	550,3	-1,70
PET-SIC-40-28d	542,1	-3,17
PET-SIC-60-4d	538,3	-3,83
PET-SIC-60-7d	550,1	-1,73
PET-SIC-60-14d	514,8	-8,04
PET-SIC-60-28d	500,2	-10,65
PET-SIC-80-28d	398,6	-28,80
PET-SIC-80-90d	107,7	-80,75

Zusammenfassend ist bei der Lagerung bei 20 °C und 40 °C sowie der kurzzeitigen Lagerung von maximal 7 Tagen bei 60 °C keine ausschlaggebende Festigkeitsabnahme der Zugfestigkeit der untersuchten PET-Fasern festzustellen. Erst ab einer Lagerungsdauer von mindestens 14 Tagen bei ≥ 60 °C ist ein signifikanter Abbau der Zugfestigkeit zu verzeichnen. Dieser Festigkeitsabfall ist jedoch mit großer Wahrscheinlichkeit auf die temperaturbedingte Veränderung des Fasermaterials und damit auf den Temperatureinfluss und nicht auf einen alkalischen Angriff, bedingt durch den umgebenden Mörtel, zurückzuführen. Folglich scheint

die untersuchte PET-Faser alkalibeständig, jedoch nicht beständig bei Temperaturen ab 60 °C zu sein.

3.2.3 Einzelfaser-Zugversuche der PA-Fasern

Das Spannungs-Dehnungsdiagramm der Referenzserie des RZ-Versuchs (PA-RZ-20-0d) wird in Bild 22 gezeigt. Im Mittel wurde eine Höchstlast von 171,4 N erreicht, so dass sich bei einer mittleren äquivalenten Querschnittsfläche von 0,43 mm² eine mittlere Zugfestigkeit von 396,3 N/mm² ergibt. Die Ergebnisse weisen eine Standardabweichung von 9,43 mit einem Variationskoeffizienten von 2,38 % auf. Die Einzelergebnisse der Prüfsreihe sind der Tabelle A36, Anhang A, zu entnehmen.

Bedingt durch die alternative Einspannmethode der PA-Fasern mittels Pappen und mechanischer Klemmung sind einige Faserproben nicht in der Probekörpermitte, sondern an der Einspannung gerissen. Diese Proben sind im Diagramm gestrichelt dargestellt. Da die Prüfergebnisse dieser Proben den Durchschnitt der Serie jedoch nicht durch Extrema beeinflussen und keine Ausreißer nach Grubbs repräsentieren, wurden diese bei der Auswertung berücksichtigt.

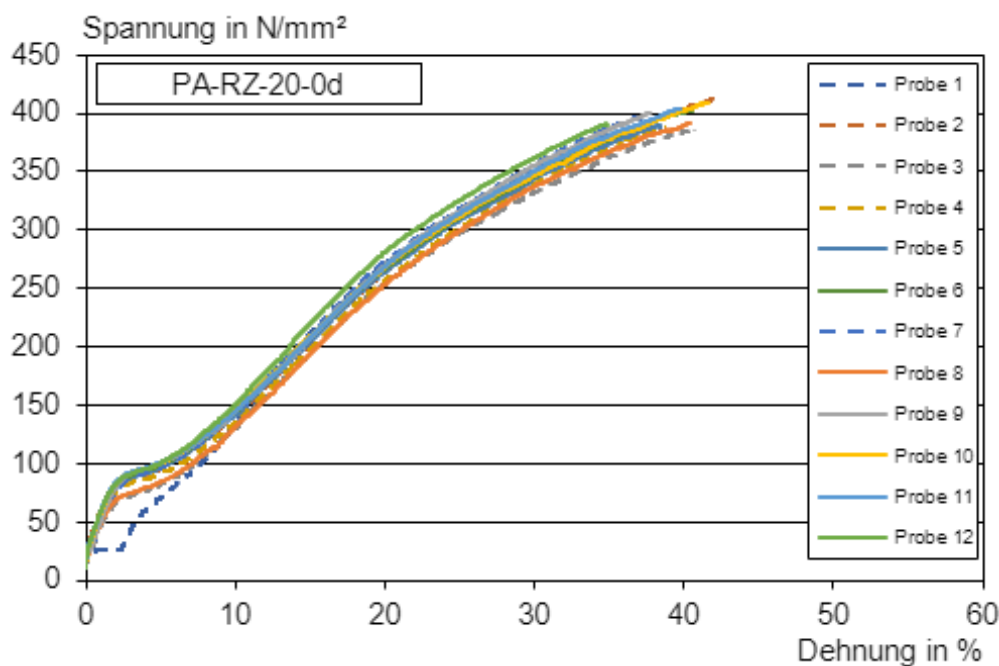


Bild 22: Spannungs-Dehnungsdiagramm der Referenz-Serie PA-RZ-20-0d

Der Kurvenverlauf der Spannungs-Dehnungslinien zeigt zu Beginn der Prüfung einen steilen Anstieg der Zugspannungen. Bei Erreichen einer Spannung von etwa 90 N/mm², fängt das Fasermaterial an zu fließen. Es ist ein erheblicher Dehnungszuwachs von ca. 4 % zu verzeichnen, bevor die Zugspannung weiter zunimmt. Der weitere Spannungszuwachs verläuft annähernd parabelförmig bis zu dem Erreichen einer Bruchspannung von ca. 400 N/mm². Der anschließende Faserbruch erfolgt schlagartig. Der vertikale Abfall der Spannung-Dehnungskurve nach Faserbruch wird im Diagramm nicht mehr dargestellt.

Die PA-Faser wird, bei einer Ausgangslänge von 150 mm, während der Prüfung um bis zu 40 % gedehnt.

Die Spannungs-Dehnungsdiagramme der weiteren Prüfserien der Restzugproben der PA-Fasern sind in Bild B13 und Bild B14, Anhang B, abgebildet und die Einzelergebnisse sind in Tabelle A37 bis Tabelle A40, Anhang A, aufgeführt. Die Kurvenverläufe der einzelnen Serien entsprechen in etwa dem zuvor beschriebenen Verlauf der Spannungs-Dehnungslinien der Referenzserie (PA-RZ-20-0d). Sie weisen jedoch nicht das anfänglich zu erkennende Fließplateau auf und der Faserbruch setzt je nach Lagerungsbedingungen frühzeitiger ein, so dass insgesamt eine geringere maximale Zugspannung sowie Gesamtdehnung erreicht wird. Die im Mittel erreichten Bruchspannungen mit zugehöriger Standardabweichung der untersuchten Prüfserien sind in Bild 23 dargestellt.

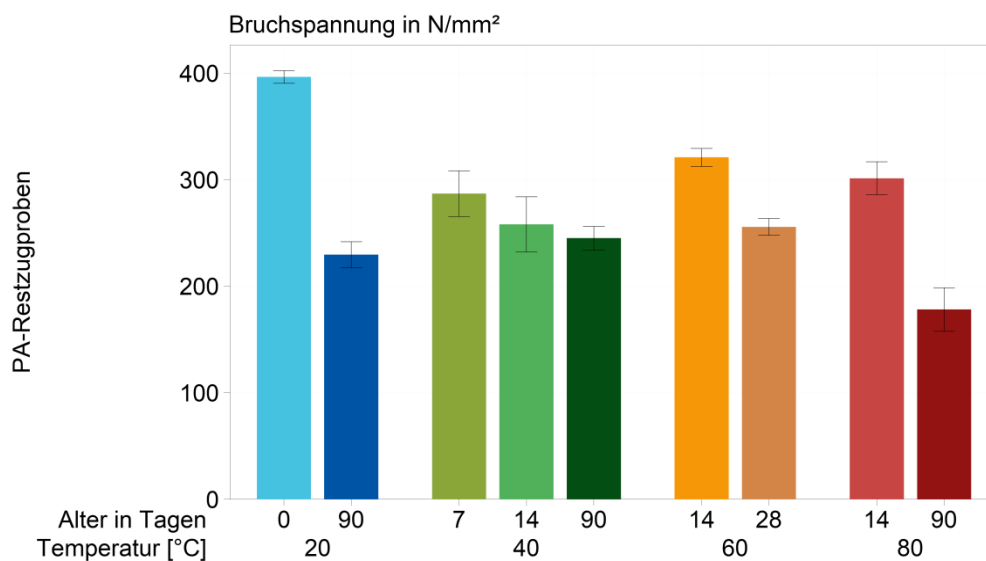


Bild 23: Balkendiagramm der erreichten mittleren Bruchspannungen der einzelnen Prüfserien der PA-Restzugproben mit zugehöriger Standardabweichung

Auffällig ist der rapide Festigkeitsabfall der Serie PA-RZ-20-90d, bei der die Probekörper für 90 Tage in künstlicher Porenlösung gelagert wurden, von 42 % im Vergleich zur Ausgangszugfestigkeit der PA-Fasern. Da bei dieser Serie ausschließlich die Exposition in künstlicher Porenlösung für den Zeitraum von 90 Tagen ohne zusätzlichen Temperatureinfluss untersucht wurde, deutet diese Festigkeitsabnahme auf eine Degradation der Fasern durch einen alkalischen Angriff hin. Die rechnerisch ermittelte Festigkeitsänderung der untersuchten Prüfserien, in Bezug auf die Ausgangszugfestigkeit, ist in Tabelle 13 aufgeführt.

Des Weiteren lässt sich auch für die übrigen Prüfserien, die in künstlicher Porenlösung für variierende Lagerungsdauern und -temperaturen gelagert wurden, eine Festigkeitsabnahme in Bezug auf die Referenz feststellen. Dabei fällt auf, dass bei der Lagerung bei 40 °C die Abnahme der Festigkeit über die Lagerungsdauer insgesamt langsamer abläuft. Des Weiteren kann festgestellt werden, dass die Bruchspannung der Serie, die für eine Expositionsdauer von 14 Tagen bei 60 °C gelagert wurde etwas höher als die der Serie deren Proben für 7 Tage bei 40 °C gelagert wurden ist. Dies kann auch bei den 14-tägig gelagerten Proben bei 80 °C

festgestellt werden, die jedoch wiederum etwas geringer als die der 14-tägig bei 60 °C gelagerten Proben ist. Die Festigkeitsabnahme bei zunehmender Lagerungsdauer bei entsprechender Lagerungstemperatur von 60 °C bzw. 80 °C nimmt jedoch anschließend proportional zur erhöhten Umgebungstemperatur zu. Die mittlere Restzugfestigkeit der Proben, die für 90 Tage bei 80 °C in künstlicher Porenlösung lagerten, beträgt letztendlich lediglich noch 45 % der Ausgangszugfestigkeit.

Tabelle 13: Mittlere Bruchspannung aller untersuchten Prüfserien an den PA-Fasern und entsprechende Festigkeitsänderung

Serie	Bruchspannung Mittelwert	Festigkeitsänderung
	N/mm ²	%
PA-RZ-20-0d	396,3	-
PA-RZ-20-90d	229,5	-42,08
PA-RZ-40-7d	286,8	-27,62
PA-RZ-40-14d	258,0	-34,89
PA-RZ-40-90d	245,0	-38,18
PA-RZ-60-14d	320,8	-19,04
PA-RZ-60-28d	255,6	-35,50
PA-RZ-80-14d	301,2	-24,00
PA-RZ-80-90d	178,1	-55,05

Die Ergebnisse der DSC-Analyse (siehe Bild B1, Anhang B) ergaben, dass der Glasübergangstemperaturbereich der untersuchten PA-Fasern zwischen 49 °C und 59,3 °C liegt. Auf Grund der alternativen Einspannmethode über Pappen, die erst nach der Lagerung in künstlicher Porenlösung an die Faserproben angeklebt wurden, konnte, anders als bei den Untersuchungen der PET-Faser, visuell keine Veränderung des Fasermaterials festgestellt werden. Anhand der ermittelten Restzugfestigkeit, die bei 60 °C und 80 °C zunächst, trotz doppelt so langer Lagerung, höher lag als die der Proben der Serie PA-RZ-40-7d und der ermittelten Glasübergangstemperatur von ca. 50 °C, lässt sich vermuten, dass die erhöhte Lagerungstemperatur zu einer Verfestigung des Fasermaterials führt. Dafür spricht auch die Reduktion der Geschwindigkeit der Festigkeitsabnahme bei der Lagerung bei 40 °C. Die Geschwindigkeit der Festigkeitsabnahme nimmt vermutlich lediglich auf Grund der, durch die Erhöhung der Umgebungstemperatur beschleunigten Reaktion (beschleunigte Alterung) bei der längeren Expositionsdauer bei 60 °C bzw. 80 °C entsprechend proportional zu.

Anhand dieser Versuchsergebnisse konnte festgestellt werden, dass die untersuchten PA-Fasern sowohl durch die Alkalität als auch durch die erhöhte Umgebungstemperatur in ihren Festigkeitseigenschaften beeinflusst werden. Da auch die Lagerungstemperatur einen Einfluss auf die ermittelten Restzugfestigkeiten zu haben scheint, konnte durch die Variation der Umgebungstemperatur nicht allein eine beschleunigte Alterung der Probekörper erzielt werden. Die Prüfergebnisse lassen in diesem Zuge, durch die Überlagerung der einwirkenden Einflüsse, keine Beurteilung der realen Geschwindigkeit der Abbauprozesse, bedingt durch

das alkalische Milieu, zu. Abschließend kann jedoch zusammengefasst werden, dass die untersuchten PA-Fasern weder alkalibeständig noch beständig bei Temperaturen ab 40 °C sind.

Wie auch bei den Fasermaterialien zuvor, wurde für den SIC-Test der PA-Fasern zunächst die Zugfestigkeit anhand von 12 Probekörpern unmittelbar nach dem Aushärten des SIC-Mörtels, der die Prüflänge der Faserprobe umschließt, ermittelt. Das Spannungs-Dehnungsdiagramm der Referenzserie (PA-SIC-20-0d) ist in Bild 24 abgebildet. Im Mittel wurde eine Höchstlast von 108,9 N erreicht, so dass sich bei einer mittleren äquivalenten Querschnittsfläche von 0,43 mm² eine mittlere Zugfestigkeit von 240,6 N/mm² ergibt. Die Ergebnisse weisen eine Standardabweichung von 25,27 mit einem Variationskoeffizienten von 10,50 % auf. Die Einzelergebnisse der Prüfserie sind der Tabelle A43, Anhang A, zu entnehmen.

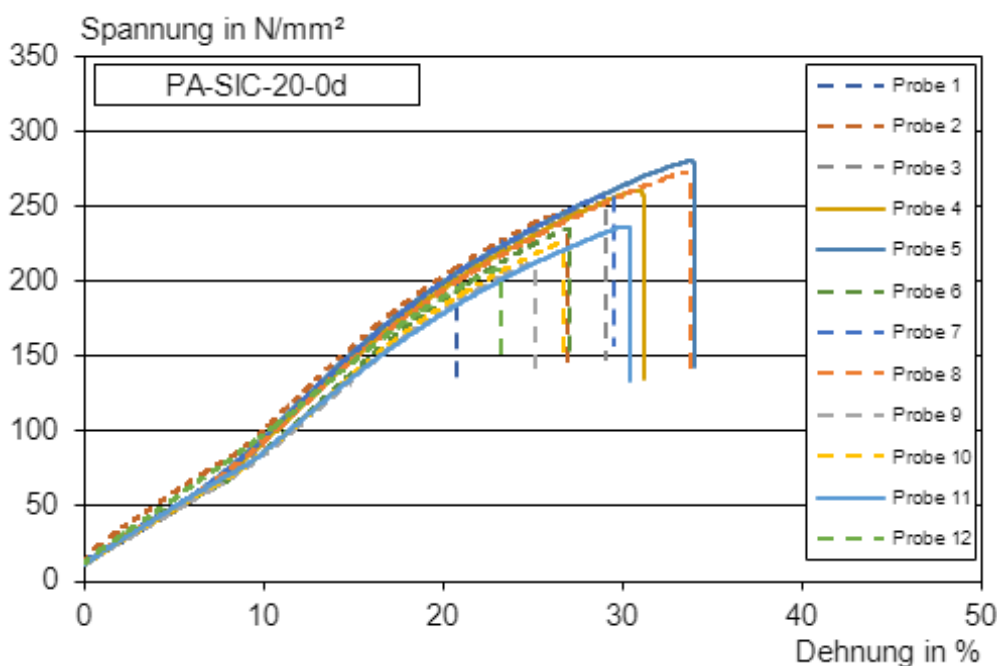


Bild 24: Spannungs-Dehnungsdiagramm der Referenz-Serie PA-SIC-20-0d

Die Spannungs-Dehnungsdiagramme der weiteren Prüfserien der PA-Fasern, die nach der Durchführung des SIC-Tests bei variierter Lagerungsdauer und -temperatur erstellt wurden, sind in Bild B15 und Bild B16, Anhang B, dargestellt. Die Einzelwerte der Prüfergebnisse sind in Tabelle A44 bis Tabelle A47, Anhang A, aufgeführt. Bei den Serien PA-SIC-40-90d und PA-SIC-60-14d konnte jeweils ein Ausreißer nach Grubbs identifiziert werden, der in den Diagrammen und der Tabelle gekennzeichnet ist. Die Kurvenverläufe der Spannungs-Dehnungslinien zeigen das gleiche Materialverhalten unter Zugbeanspruchung, das auch schon für die Referenzserie beschrieben werden konnte. Lediglich die erreichte Bruchspannung und damit scheinbar proportional verbunden die Dehnung steigt bzw. sinkt je nach Lagerungsvariation. Kann die mittlere Zugfestigkeit bei einer Prüfserie im Vergleich zur Referenzserie gesteigert werden, nimmt dementsprechend auch die Gesamtdehnung bis zu 40 % zu und wird im Mittel eine geringere Zugfestigkeit erreicht, ist auch das Dehnungsmaß bei Faserbruch geringer. Dabei erreicht beispielsweise die Serien PA-SIC-60-14d eine mittlere

Bruchspannung von 283,1 N/mm² mit einer mittleren Gesamtdehnung von ca. 36 % und die Serie PA-SIC-80-90d eine mittlere Bruchspannung von lediglich 136,7 N/mm² mit einer Gesamtdehnung von im Mittel etwa 15 %. In Bild 25 sind die im Mittel erreichten Bruchspannungen aller Prüfserien der PA-Fasern, die mittels SIC-Prüfung bestimmt werden konnten, mit zugehöriger Standardabweichung dargestellt.

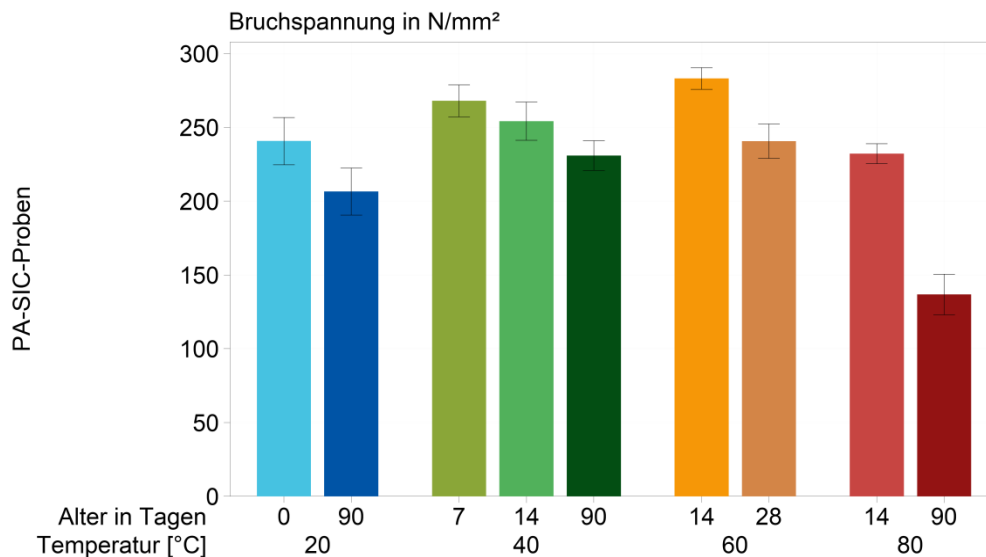


Bild 25: Balkendiagramm der erreichten mittleren Bruchspannungen der einzelnen Prüfserien der PA-SIC-Proben mit zugehöriger Standardabweichung

Schon bei der Lagerung bei 20 °C kann im Alter von 90 Tagen in Bezug auf die Zugfestigkeit der Referenzserie (PA-SIC-20-0d) eine deutliche Festigkeitsabnahme von ca. 14 % festgestellt werden. Die rechnerisch ermittelten Festigkeitsänderungen der einzelnen Prüfserien, in Bezug auf die Referenz-Restzugfestigkeit, sind in Tabelle 14 aufgeführt. Bei den Restzugproben konnte an dieser Stelle bereits eine Festigkeitsabnahme von etwa 42 % verzeichnet werden, doch die Referenz-Restzugfestigkeit der SIC-Proben liegt bereits knapp 40 % unter der der Restzugproben. Zudem liegt der pH-Wert des Porenwassers des SIC-Mörtels lediglich zu Beginn bei 13,6 und im Alter von 90 Tagen nur noch bei 13,2. Der pH-Wert der künstlichen Porenlösung liegt dagegen konstant bei 13,6. Dementsprechend wird im SIC-Mörtel eine Veränderung in der Zusammensetzung und Konzentration des angreifenden Mediums stattfinden und eventuell einen abgeschwächten alkalischen Angriff auf das Fasermaterial mit sich bringen. Des Weiteren kommt die Faserprobe lediglich in den Bereichen der Poren des Mörtelprismas mit dem Porenwasser in Berührung und liegt nicht, wie bei den Untersuchungen an den Restzugproben, mit der gesamten Prüflänge in der Porenlösung. Aus diesem Grund läuft der alkalische Angriff auf das Fasermaterial bei den Untersuchungen der Restzugproben, im Vergleich zu denen der SIC-Proben, überproportional beschleunigt ab. Die Untersuchungen der SIC-Proben entsprechen eher einer realitätsnahen Exposition, bei der die Degradation in normaler Geschwindigkeit abläuft.

Analog zu den Erkenntnissen, die bei den Untersuchungen der Restzugproben gewonnen werden konnten, ist auch bei den Untersuchungen anhand der SIC-Proben eine

Festigkeitszunahme bei einer erhöhten Lagerungstemperatur festzustellen. Bei der Probenlagerung für 7 Tage bei 40 °C konnte ein Zugfestigkeitszuwachs von etwas mehr als 11 % und bei der Lagerung für 14 Tage bei 60 °C sogar von annähernden 18 % ermittelt werden. Dieses Materialverhalten lässt sich mit großer Wahrscheinlichkeit auf die Lagerung im Glasübergangstemperaturbereich des Fasermaterials, zwischen 49 °C und 59,3 °C, zurückführen (vgl. Bild B1, Anhang B). Dies scheint eine verfestigende Wirkung auf die Festigkeitseigenschaften des Fasermaterials zu haben. Bei längerer Expositionsdauer und entsprechend höherem Probenalter nimmt die Zugfestigkeit der PA-Fasern wiederum ab. Dies spricht für eine Schädigung der Faserproben durch einen alkalischen Angriff, welcher den zunächst positiven Effekt aus der Temperaturlagerung, auf die Zugfestigkeit des Fasermaterials, überlagert. Bei der Lagerungstemperatur von 40 °C liegt die Zugfestigkeit nach 14 Tagen noch über der Referenz-Zugfestigkeit, doch nach 90 Tagen überwiegt die Degradation der Faser und die Restzugfestigkeit liegt ca. 4 % unter der Ausgangszugfestigkeit. Die Lagerungstemperatur von 60 °C führt zu dem wirksamsten Festigkeitszuwachs. Dieser ist jedoch bereits nach 28 Tagen, durch die Schädigung der Faser wieder ausgeglichen. Daran kann zudem festgestellt werden, dass die Erhöhung der Lagerungstemperatur, trotz Verfestigung des Fasermaterials, auch bei den PA-Fasern die Geschwindigkeit der Degradation beschleunigt (beschleunigte Alterung). Bei der Lagerungstemperatur von 80 °C ist bereits nach 14 Tagen keine positive Wirkung des Temperatureinflusses auf die Zugfestigkeit mehr nachzuweisen, außer dass die Festigkeitsabnahme lediglich knapp 4 % umfasst und nicht bedeutender ausfällt. Nach 90 Tagen ist die Restzugfestigkeit der PA-Faser unter 60 % der Referenz-Restzugfestigkeit gesunken und der Variationskoeffizient der Prüfungsergebnisse der Serie auf 15,76 % gestiegen. Mit einer dementsprechend großen Streuung der Versuchsergebnisse ist diese Serie im Regelfall zu verwerfen und muss wiederholt werden.

Tabelle 14: Mittlere Bruchspannung aller untersuchten Prüfserien an den PA-Fasern und entsprechende Festigkeitsänderung

Serie	Bruchspannung Mittelwert	Festigkeitsänderung
	N/mm ²	%
PA-SIC-20-0d	240,6	-
PA-SIC-20-90d	206,5	-14,19
PA-SIC-40-7d	267,9	+11,35
PA-SIC-40-14d	254,1	+5,61
PA-SIC-40-90d	230,8	-4,07
PA-SIC-60-14d	283,1	+17,64
PA-SIC-60-28d	240,6	-0,02
PA-SIC-80-14d	232,1	-3,53
PA-SIC-80-90d	136,7	-43,17

Anhand dieser Beobachtungen können die PA-Fasern, wie auch schon bei den Untersuchungen der Restzugproben, als weder alkali- noch als temperaturbeständig bewertet werden. Da sich die Einwirkungen aus Temperatur und alkalischer Umgebung auf die Festigkeitseigenschaften des Fasermaterials überlagern, kann die Dauerhaftigkeit der PA-Faser nicht qualitativ beurteilt werden.

3.2.4 Einzelfaser-Zugversuche der Basalt-Fasern

Das Spannungs-Dehnungsdiagramm der Referenzserie des RZ-Versuchs (B-RZ-20-0d) ist in Bild 26 dargestellt. Im Mittel wurde eine Höchstlast von 378,8 N erreicht, so dass sich bei einer mittleren äquivalenten Querschnittsfläche von $0,30 \text{ mm}^2$ eine mittlere Zugfestigkeit von $1.263,9 \text{ N/mm}^2$ ergibt. Die Ergebnisse weisen eine Standardabweichung von 56,73 mit einem Variationskoeffizienten von 4,49 % auf. Die Einzelergebnisse der Prüfsreihe sind der Tabelle A48, Anhang A, zu entnehmen.

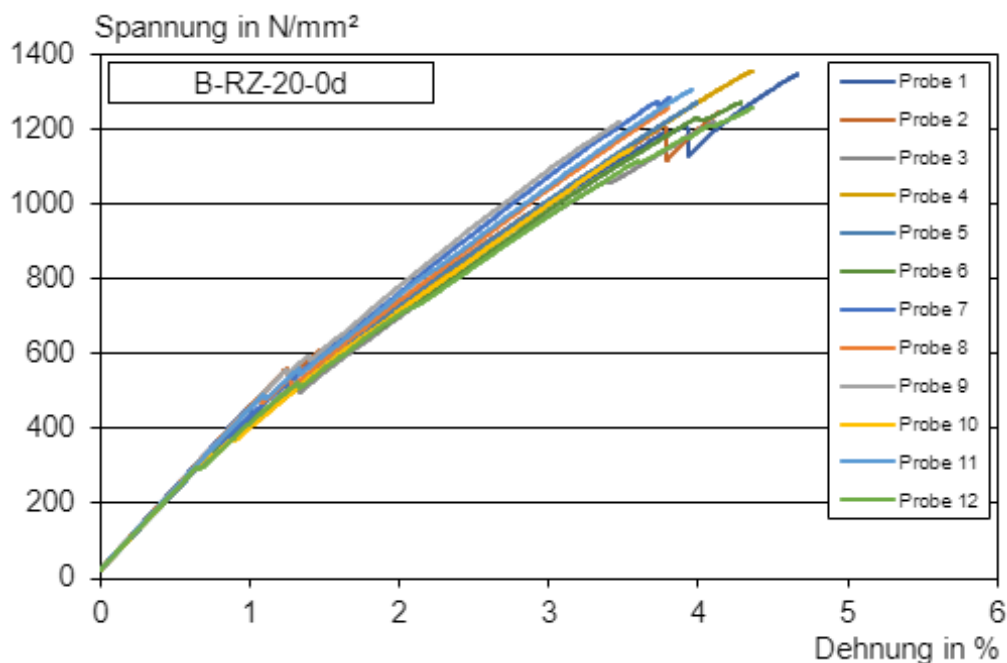


Bild 26: Spannungs-Dehnungsdiagramm der Referenz-Serie B-RZ-20-0d

Da es sich bei den Basaltfasern um eine mineralische Kompositfaser handelt, unterscheidet sich der Kurvenverlauf der Spannungs-Dehnungslinie von denen der zuvor betrachteten Polymerfasern. Der Spannungszuwachs nimmt stetig, annähernd linear im Verlauf der Zugprüfung zu. Der Faserbruch erfolgt schlagartig beim Erreichen der Bruchspannung von knapp 1.300 N/mm^2 und einer maximalen Dehnung von etwa 4 %, bei einer Ausgangslänge von 150 mm. Der vertikale Abfall der Spannungs-Dehnungskurve nach Faserbruch wird im Diagramm nicht mehr abgebildet. Die kurzzeitigen Spannungsabfälle einiger Proben während der Zugprüfung können entweder darauf zurückgeführt werden, dass die Faser geringfügig aus dem Harzblock der Einspannung ausgezogen wurde oder darauf, dass einzelne Filamente des Multifilamentgarns frühzeitig gerissen sind bevor die gesamte Faser bzw. alle verbliebenen Filamente reißen. Da die Ursache dieser temporären Spannungsabfälle nicht

eindeutig geklärt werden kann und während der Prüfung keine Auffälligkeiten beobachtet wurden, die für einen Auszug aus dem Harzblock sprechen, werden entsprechende Faserproben mit in die Wertung einbezogen, sofern sie bei der erreichten Bruchspannung keine Ausreißer nach Grubbs darstellen.

Die Spannungs-Dehnungsdiagramme der weiteren Prüfserien der Restzugproben der Basaltfaser sind in Bild B17 und Bild B18, Anhang B, dargestellt und die Einzelwerte der Prüfergebnisse sind Tabelle A49 bis Tabelle A53, Anhang A, zu entnehmen. Die Kurvenverläufe scheinen grundsätzlich dem zuvor beschriebenen Spannungs-Dehnungslinien-Verlauf der Referenzserie B-RZ-20-0d zu entsprechen. Lediglich die erreichte Bruchspannung nimmt mit zunehmender Lagerungsdauer und -temperatur ab. Zudem steigt die Streubreite der Versuchsergebnisse deutlich. Die im Mittel erreichten Bruchspannungen mit zugehöriger Standardabweichung der untersuchten Prüfserien sind in Bild 27 dargestellt.

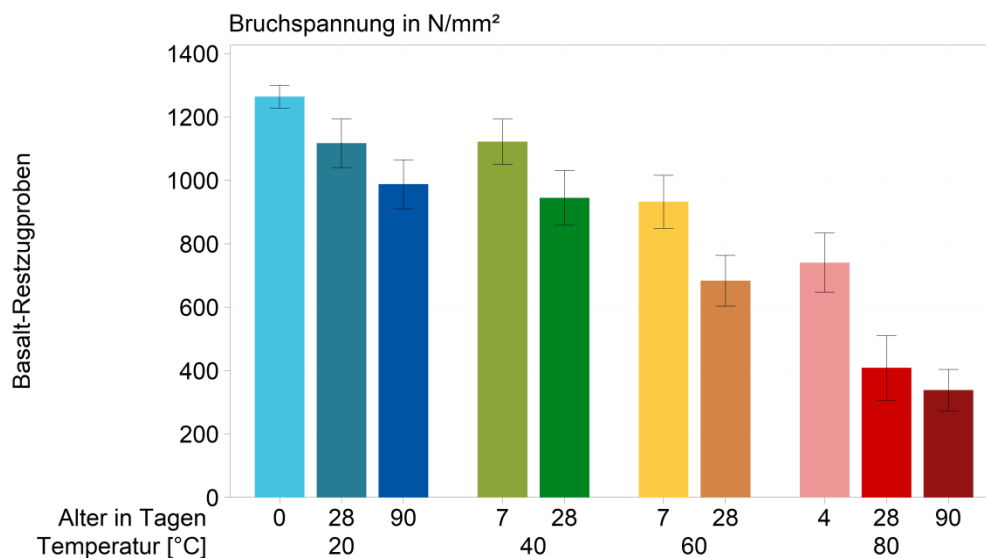


Bild 27: Balkendiagramm der erreichten mittleren Bruchspannungen der einzelnen Prüfserien der Basalt-Restzugproben mit zugehöriger Standardabweichung

Es kann eine stetige Abnahme der Restzugfestigkeit mit steigender Lagerungsdauer und -temperatur verzeichnet werden. Dies lässt eindeutig auf einen alkalischen Angriff des Fasermaterials und damit einer damit verbundenen Degradation der Basaltfaser schließen. Die rechnerisch ermittelten Festigkeitsänderungen sind Tabelle 15 zu entnehmen. Der Festigkeitsverlust der Prüfserien mit einer Lagerungstemperatur von 20 °C über die Dauer, lässt eine annähernd lineare Beziehung vermuten. Zudem ist festzustellen, dass eine Erhöhung der Umgebungstemperatur den Degradationsprozess deutlich beschleunigt. Nach 28 Tagen Lagerungsdauer weisen die Basaltfasern bei der Lagerungstemperatur von 20 °C noch eine Restzugfestigkeit von knapp 89 % der Ausgangszugfestigkeit auf, bei 40 °C sind es noch knapp 75 %, bei 60 °C noch 54 % und bei 80 °C verbleibt lediglich noch etwa 33 % der ursprünglichen Zugfestigkeit. Bei einer Lagerungstemperatur von 80 °C für eine Dauer von 90 Tagen erreichen die Probekörper im Mittel lediglich noch knapp 27 % der ursprünglichen

Zugfestigkeit. Dabei steigt jedoch auch der Variationskoeffizient der Versuchsergebnisse der einzelnen Serie auf nahezu 40 % an (vgl. Tabelle A53, Anhang A). Dies könnte jedoch auf den starken Angriff des Fasermaterials bzw. den Einfluss der Beschichtung, die das Fasermaterial umgibt und gegebenenfalls nicht jedes Filament gleichermaßen schützt, und der daraus resultierenden, unterschiedlich geringen verbleibenden Restzugfestigkeit der Fasern zurückzuführen sein.

Tabelle 15: Mittlere Bruchspannung aller untersuchten Prüfserien an den Basaltfasern und entsprechende Festigkeitsänderung

Serie	Bruchspannung Mittelwert	Festigkeitsänderung
	N/mm ²	%
B-RZ-20-0d	1.263,9	-
B-RZ-20-28d	1.117,0	-11,62
B-RZ-20-90d	987,7	-21,85
B-RZ-40-7d	1.121,6	-11,26
B-RZ-40-28d	945,0	-25,23
B-RZ-60-7d	932,4	-26,23
B-RZ-60-28d	683,5	-45,92
B-RZ-80-4d	740,7	-41,40
B-RZ-80-28d	408,7	-67,67
B-RZ-80-90d	338,8	-73,20

Ausgehend von dem Ergebnis der DSC-Analyse (siehe Bild B4, Anhang B), bei der keine Schmelz- bzw. Glasübergangstemperatur im Analyse-Bereich von bis zu 500 °C ermittelt werden konnte, hat die Lagerungstemperatur von bis zu 80 °C vermutlich keinen Einfluss auf die Festigkeitseigenschaften der Basaltfasern. Dementsprechend kann anhand der Erhöhung der Umgebungstemperatur bei der Probenlagerung in künstlicher Porenlösung ausschließlich die Geschwindigkeit der ablaufenden Reaktion beeinflusst und beschleunigt werden.

Wegen der geringen Datengrundlage kann für die jeweiligen Lagerungstemperaturen nur ein logarithmisch linearer zeitlicher Zusammenhang der Festigkeitsabnahme aufgestellt werden (siehe Bild 28). Dennoch ist anhand dieser Darstellung ein deutlicher Einfluss der Temperatur auf die Beschleunigung der Degradation der Basaltfaser erkennbar. Wird die Gerade der 40 °C-Lagerung horizontal nach rechts verschoben, trifft sie relativ genau auf die der 20 °C-Lagerung. Dementsprechend kann näherungsweise die 7 Tage Lagerung bei 40 °C mit der 28 Tage Lagerung bei 20 °C gleichgesetzt werden und die Lagerung für 28 Tage bei 40 °C entspricht ungefähr der Lagerung für 90 Tage bei 20 °C. Auch die horizontale Verschiebung der Geraden der 60 °C-Lagerung ermöglicht eine Prognose, in der die Lagerung für 7 Tage bei 60 °C ungefähr der Lagerung für 28 Tage bei 40 °C sowie der Lagerung für 90 Tage bei 20 °C entspricht. Um die beschleunigten Abbauprozesse genauer abschätzen zu können und einen möglichen logarithmischen Zeit-Verschiebungs-Faktor ermitteln zu können, wird jedoch eine vollumfängliche Datengrundlage benötigt.

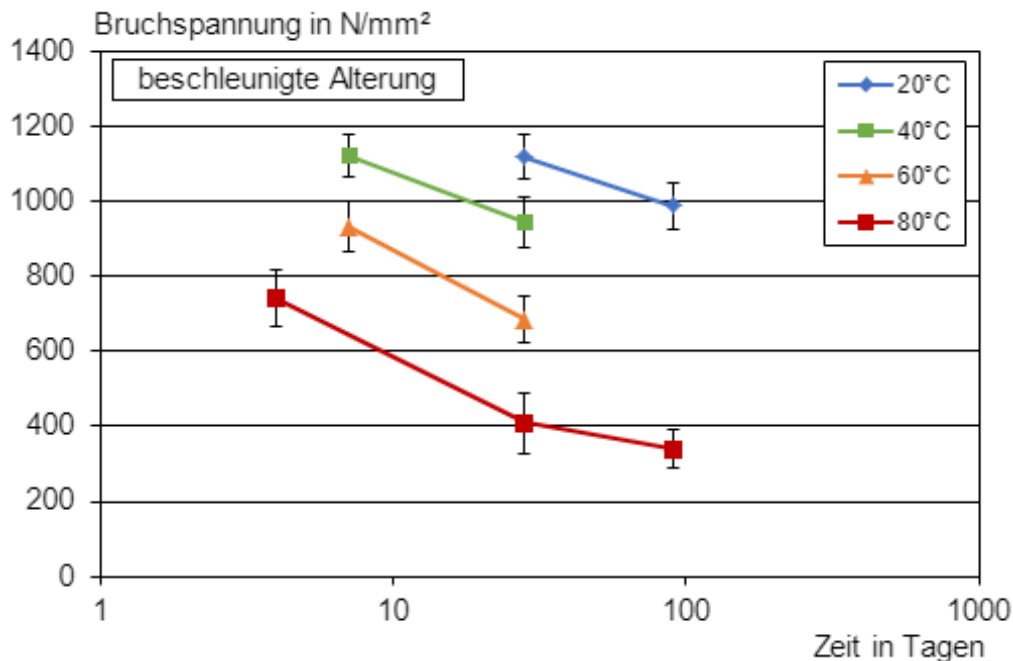


Bild 28: Festigkeitsrückgang von in künstlicher Porenlösung bei unterschiedlichen Temperaturen gelagerten Restzugproben der Basaltfasern

Bei dieser Betrachtung der Versuchsergebnisse ist zu beachten, dass die Abbauprozesse durch die Alterung der Faserproben in künstlicher Porenlösung überproportional schnell ablaufen und somit keine realitätsnahe Abschätzung der tatsächlichen Geschwindigkeit der Degradationsprozesse im alkalischen Milieu von Beton möglich ist. Dennoch ist anhand der ermittelten Versuchsergebnisse eine Degradation des Fasermaterials durch einen alkalischen Angriff des umgebenden Milieus festzustellen. Die Auswertung der Versuchsergebnisse führt zu der Schlussfolgerung, dass die untersuchte Basaltfaser nicht alkalibeständig ist. Andererseits konnte festgestellt werden, dass die untersuchte Basaltfaser bis zu 80 °C temperaturbeständig zu sein scheint.

Für die SIC-Tests wurde abschließend auch für die Basaltfasern die Zugfestigkeit anhand von 12 Probekörpern unmittelbar nach dem Aushärten des SIC-Mörtels, der die Prüflänge der Faserprobe umschließt, bestimmt. Das Spannungs-Dehnungsdiagramm der Referenzserie (B-SIC-20-0d) ist in Bild 29 abgebildet. Im Mittel wurde eine Höchstlast von 364,4 N erreicht, so dass sich bei einer mittleren äquivalenten Querschnittsfläche von 0,30 mm² eine mittlere Zugfestigkeit von 1.225,4 N/mm² ergibt. Die Ergebnisse weisen eine Standardabweichung von 63,81 mit einem Variationskoeffizienten von 5,21 % auf. Die Einzelergebnisse der Prüfserie sind der Tabelle A54, Anhang A, zu entnehmen.

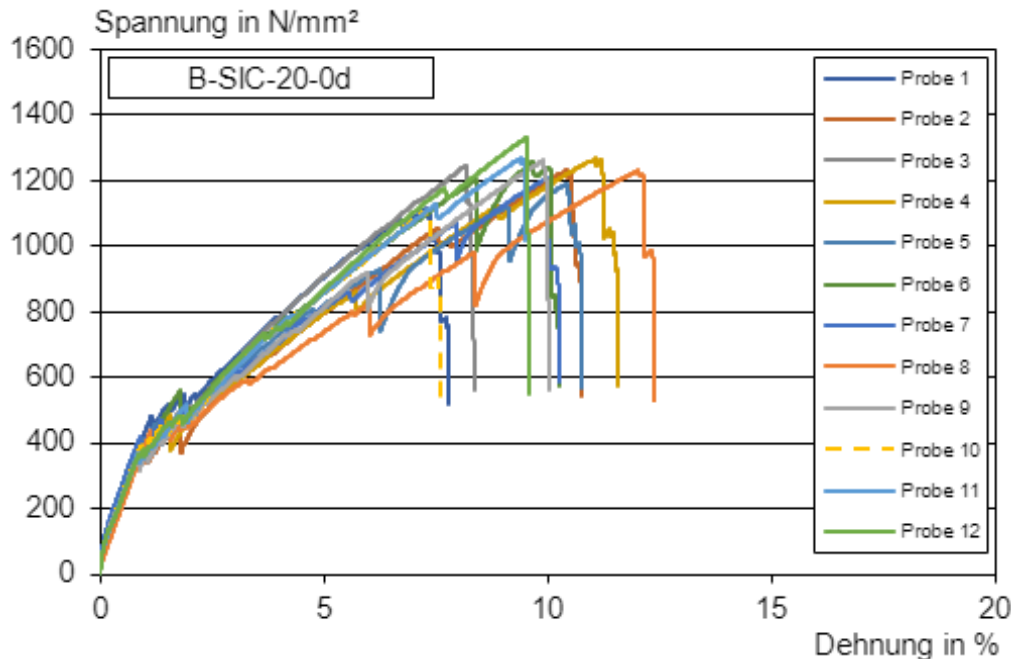


Bild 29: Spannungs-Dehnungsdiagramm der Referenz-Serie B-SIC-20-0d

Der Kurvenverlauf der Spannungs-Dehnungslinien der Basaltfasern der mittels SIC-Test ermittelt wurde, zeigt das gleiche Materialverhalten unter Zugbeanspruchung wie schon bei den Untersuchungen anhand der Restzugproben, bis auf den Bereich mit den mehreren, kurzzeitigen Spannungsabfällen bei einer Zugspannung von ca. 400 N/mm² und das höhere Dehnungsmaß. Da das Fasermaterial bei beiden Prüfmethoden bis zum Erreichen der Zugspannung von etwa 350 N/mm² keine Streuung aufweist und im weitergehenden Verlauf der Zugprüfung die Zugspannungen stetig weiter aufgebaut werden können, ist davon auszugehen, dass die Streckgrenze des Materials im Bereich von ca. 400 N/mm² liegt. Des Weiteren ist zu vermuten, dass in diesem Zugspannungsbereich die ersten äußeren Filamente reißen, die eventuell im Zuge der Probenpräparation und durch die kurzzeitige Exposition im alkalischen Milieu des SIC-Mörtels bereits vorgeschädigt sein können, da es sich bei der untersuchten Basaltfaser um ein Multifilamentgarn handelt. Die anschließende, weitere Steigerung der aufzunehmenden Zugspannungen bis zum vollständigen Faserbruch, wird daraufhin von den verbleibenden Filamenten übernommen. Der Faserbruch erfolgt, wie auch schon bei den Restzugproben, schlagartig nach dem Erreichen der Bruchspannung. Das höhere Dehnungsmaß, im Vergleich zu den Untersuchungen der Restzugproben, ist mit großer Wahrscheinlichkeit auf die geringere Prüfgeschwindigkeit von lediglich 1 mm/min anstatt 6 mm/min zurückzuführen. Die mittlere Dehnung bei Faserbruch von knapp 10 % ist doppelt so groß wie die der Restzugproben. Dieser Unterschied im Dehnungsverhalten während der Zugprüfung, zwischen den beiden Prüfmethoden, konnte auch schon bei den untersuchten Fasermaterialien PP und PET festgestellt werden.

Die Spannungs-Dehnungsdiagramme der weiteren Prüfserien der SIC-Proben, welche für die Untersuchungen der Basaltfasern erstellt wurden, sind in Bild B19 und Bild B20, Anhang B, abgebildet. Die Einzelwerte der Prüfungsergebnisse der jeweiligen Serien sind Tabelle A55 bis Tabelle A59, Anhang A, zu entnehmen. Die Serien B-SIC-20-28d, B-SIC-20-90d,

B-SIC-60-7d, B-SIC-80-28d sowie B-SIC-80-90d weisen jeweils einen Ausreißer nach Grubbs auf, welche in den Tabellen und Diagrammen gekennzeichnet sind. Alle Prüfserien weisen den zuvor erläuterten Kurvenverlauf mit den mehreren, kurzzeitigen Spannungsabfällen bei einer Spannung von etwa 400 N/mm² in den Spannungs-Dehnungslinien auf. Des Weiteren zeigen sie ebenfalls das erhöhte Dehnungsmaß. Die weiteren kurzzeitigen Spannungsabfälle in den Kurvenverläufen einzelner Proben, oberhalb der Zugspannung von 400 N/mm², könnten auf einen geringfügigen Auszug aus dem Harzblock der Einspannung oder dem Reißen weiterer Faserfilamente des Multifilamentgarns zurückgeführt werden. Unter der Voraussetzung eines alkalischen Angriffes auf das Fasermaterial durch den umgebenden Mörtel, liegt die Vermutung des Reißens weiterer äußerer, vorgeschädigter Filamente sehr nahe, weshalb entsprechende Proben nicht aus der Wertung genommen wurden. Bis auf die abnehmende Zugfestigkeit und die zunehmende Streuung der Versuchsergebnisse bei zunehmender Lagerungstemperatur und –dauer der Probekörper, sind anhand der Spannungs-Dehnungsdiagramme keine weiteren Auffälligkeiten der einzelnen Prüfserien festzustellen. Die im Mittel erreichten Bruchspannungen mit zugehöriger Standardabweichung aller Serien der Basaltfasern, die anhand der SIC-Prüfung bestimmt werden konnten, sind in Bild 30 dargestellt.

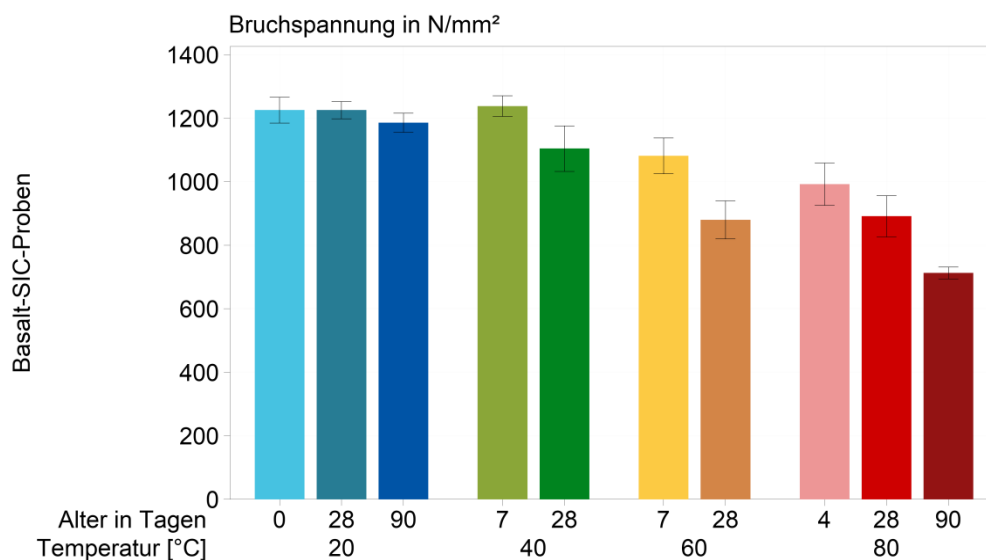


Bild 30: Balkendiagramm der erreichten mittleren Bruchspannungen der einzelnen Prüfserien der Basalt-SIC-Proben mit zugehöriger Standardabweichung

Anhand von Bild 30 ist eine deutliche Festigkeitsabnahme der Zugfestigkeit nach erhöhter Lagerungsdauer und –temperatur festzustellen. Die rechnerisch ermittelten Festigkeitsänderungen in Bezug auf die ermittelte Zugfestigkeit der Referenzserie sind in Tabelle 16 aufgeführt. Bei der Lagerungstemperatur von 20 °C ist lediglich eine geringe Festigkeitsabnahme nach 90 Tagen festzustellen, was für eine sehr langsam ablaufende Degradation der Faser unter realitätsnahen Bedingungen spricht. Die geringfügige Festigkeitszunahme der Proben, die für 7 Tage bei 40 °C gelagert wurden, könnte auf eine Streuung der Materialeigenschaften hindeuten. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der

geprüften Mörtelbiegezug- und Mörteldruckfestigkeiten, eventuellen Auffälligkeiten während der Versuchsdurchführung sowie den Verläufen der Spannungs-Dehnungskurven, ist keine Ursache für den geringen Festigkeitszuwachs festzustellen. Eine generelle Zunahme der Festigkeit des untersuchten Fasermaterials durch die spezifischen Randbedingungen der Lagerung und Prüfung dieser Serie kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, auch wenn die Festigkeitszunahme nur sehr gering ausfällt. Um dies validieren zu können, sollte eine weitere Prüfserie bei 20 °C und 7 oder 14 Tage Lagerungsdauer untersucht werden.

Anhand der verbleibenden Prüfserien kann eine stetige Festigkeitsabnahme festgestellt werden. Dabei fällt lediglich auf, dass die Festigkeitsabnahme der Serie B-SIC-80-28d mit 27,28 % geringer ist als die der Serie B-SIC-60-28d mit 28,18 %. Dieses Ergebnis entspricht nicht dem Trend. Im gleichen Probenalter bzw. bei gleicher Expositionsdauer von 28 Tagen, müsste die Degradation der Faser bei 80 °C, gemäß dem Prinzip der beschleunigten Alterung, weiter fortgeschritten und dementsprechend die verbliebene Restzugfestigkeit niedriger sein als bei der Lagerung bei 60 °C. Bei genauerer Betrachtung der Mörtelbiegezug- und Mörteldruckfestigkeiten der Begleitprobekörper der einzelnen Serien fällt auf, dass die Festigkeitswerte der Serie B-SIC-80-28d etwas unter den Werten der anderen Prüfserien liegen. Dies könnte ein Indikator sein, der auf einen Fehler bei der Einwaage und des Mischens des SIC-Mörtels hindeutet, bei dem der verwendete Zementgehalt unter dem vorgesehenen Zementanteil der Mischungszusammensetzung liegt. Dies würde zu einer Abnahme der Festigkeitswerte sowie einer geringeren Alkalität im SIC-Mörtel, der die Faserprobe im SIC-Probekörper umschließt, führen. Dementsprechend würde der SIC-Mörtel eine weniger aggressive Umgebung liefern, in der die Degradation der Faser, im Vergleich zu der vorgesehenen Mischungszusammensetzung, verzögert abläuft. Aus diesem Grund sollte diese Serie erneut hergestellt und geprüft werden, um den Einfluss eines eventuellen Mischfehlers zu korrigieren und eine qualitative Bewertung der beschleunigten Degradation durch die Steigerung der Umgebungstemperatur zu ermöglichen.

Die SIC-Proben, die 90 Tage bei einer Lagerungstemperatur von 80 °C beschleunigt gealtert wurden, weisen lediglich noch eine Restzugfestigkeit von ca. 58 % der ermittelten Ausgangszugfestigkeit der Referenzserie auf. Unter denselben Lagerungsbedingungen erreichten die untersuchten Restzugproben nur noch eine Restzugfestigkeit von knapp 27 %. Dieser Unterschied verdeutlicht die überproportionale Beschleunigung der ablaufenden Korrosionsprozesse durch die unmittelbare Lagerung in künstlicher Porenlösung.

Tabelle 16: Mittlere Bruchspannung aller untersuchten Prüfserien an der Basaltfaser und entsprechende Festigkeitsänderung

Serie	Bruchspannung Mittelwert	Festigkeitsänderung
	N/mm ²	%
B-SIC-20-0d	1.225,4	-
B-SIC-20-28d	1.225,2	-0,01
B-SIC-20-90d	1.185,7	-3,24
B-SIC-40-7d	1.237,9	+1,03
B-SIC-40-28d	1.104,2	-9,89
B-SIC-60-7d	1.081,3	-11,75
B-SIC-60-28d	880,0	-28,18
B-SIC-80-4d	992,1	-19,04
B-SIC-80-28d	891,1	-27,28
B-SIC-80-90d	712,7	-41,84

Die Probenlagerung bei Temperaturen bis zu 80 °C hat, ohne den Einfluss der alkalischen Umgebung, keine Auswirkung auf das Zugtragverhalten der Basaltfasern. Dies konnte bereits bei der Auswertung der Restzugproben und anhand der Ergebnisse der DSC-Analyse (vgl. Bild B4, Anhang B) festgestellt werden. Dementsprechend ist die zu verzeichnende Festigkeitsabnahme der untersuchten Basaltfasern allein auf den korrosiven Angriff des Fasermaterials, auf die, durch den SIC-Mörtel bedingte, alkalische Umgebung zurückzuführen. Dies führt zu der Beurteilung, dass die untersuchten Basaltfasern temperaturbeständig, jedoch nicht alkalibeständig sind.

Um einen Anhaltswert für die Geschwindigkeit der Degradation durch die beschleunigte Alterung unter Laborbedingungen zu erhalten, wurde in Anlehnung an /Pro82/ die Lagerungsdauer aus dem Labor, unter Berücksichtigung der erhöhten Lagerungstemperaturen, in die Freibewitterungszeit in England umgerechnet. Die ermittelten Beschleunigungsfaktoren und die Umrechnung der resultierenden Freibewitterungszeit in Monate und Jahre sind Tabelle A62, Anhang A, zu entnehmen. In Bild 31 ist die im Mittel erreichte Bruchspannung mit zugehöriger Standardabweichung der einzelnen Prüfserien in der Abfolge der ausgerechneten Freibewitterungszeit in England dargestellt. Um die Prüfserien eindeutig zuordnen zu können, wurde die festgelegte Farbkennung aus dem Balkendiagramm übernommen (vgl. Bild 30).

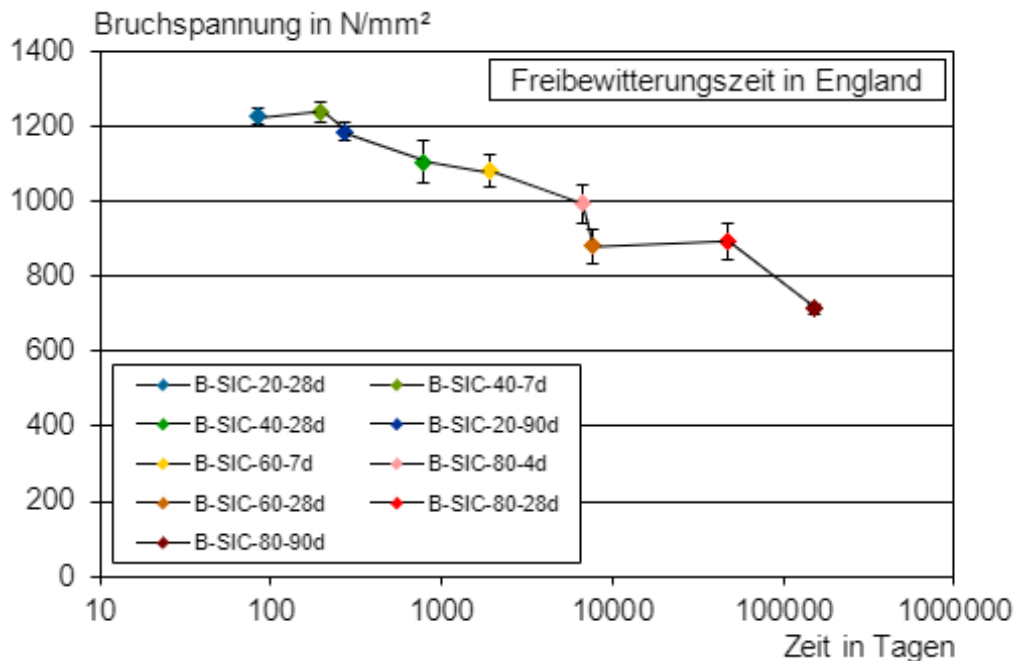


Bild 31: Mittlere Bruchspannung der SIC-Proben der Basaltfasern umgerechnet in die resultierende freie Bewitterungszeit in Tagen in England in Anlehnung an /Pro82/

Auch hier wird deutlich, dass der Wert der Prüfsreihe B-SIC-80-28d nicht in den Trend der zunehmenden Festigkeitsabnahme zu passen scheint. Zudem scheinen die ermittelten und angesetzten Beschleunigungsfaktoren, die auf den Daten von Untersuchungen an spezifischen AR-Glasfasern beruhen, nicht auf die Geschwindigkeit der ablaufenden Korrosionsprozesse des untersuchten Fasermaterials Basalt übertragbar zu sein. Dies wird u. a. durch den Knick im Kurvenverlauf, der durch den Wert der Serie B-SIC-60-28d verursacht wird, deutlich. Entweder resultiert die Lagerung der Probekörper für 28 Tage bei 60 °C in der Realität in einer längeren resultierenden freien Bewitterungszeit oder die gesamten getroffenen Zusammenhänge zwischen Temperatur und Lagerungsdauer stimmen für das untersuchte Fasermaterial nicht überein. Diese Feststellung war jedoch abzusehen, da es sich bei der Basaltfaser um ein gänzlich anderes Fasermaterial handelt, als das für welches die Beschleunigungsfaktoren von /Pro82/ aufgestellt wurden. Aus diesem Grund wurde diese Darstellung nur für eine grobe Einordnung der zeitlichen Entwicklung erstellt. Für eine genaue zeitliche Einordnung bedarf es einer umfangreichen Studie, bei der die Beschleunigungsfaktoren empirisch mit realen Daten ermittelt werden.

3.3 4-Punkt-Biegezugversuche

Die Erstrisslast bei der 4-Punkt-Biegezugprüfung wird maßgeblich von den Festigkeitseigenschaften des Betons bestimmt. Bei der Auswertung der Serien der verschiedenen Faserbetone konnte festgestellt werden, dass die Höhe der Erstrisslast wesentlich von der temperierten Lagerung bei 50 °C beeinflusst wird. Da alle Serien in Wasserbecken gelagert wurden, kann ein Austreiben des Anmachwassers durch die erhöhte Temperatur von 50 °C ausgeschlossen werden. Die geringere Festigkeit des Betons bedingt

durch die 50 °C Lagerung, kann auf den „Crossover-Effect“ zurückgeführt werden: Die erhöhte Temperatur von 50 °C, bei der die Probekörper für einen definierten Zeitraum gelagert wurden, führt zu einer höheren Frühfestigkeit, jedoch zu einer niedrigeren 28-Tage-Festigkeit.

Zusätzlich muss darauf hingewiesen werden, dass die Serien PA-50-180d, B-50-90d und B-50-180d bedingt durch einen technischen Defekt, für einen kurzen Zeitraum von wenigen Stunden einer höheren Temperatur als den vorgesehenen 50 °C ausgesetzt waren. Im Maximum betrug die Temperatur knapp 95 °C. Dieser Einfluss könnte eventuell die geringfügig höheren Erstrisslasten dieser Serien im Vergleich zu den Serien der weiteren Faserbetone, die bei konstanten 50 °C im Wasserbecken gelagert wurden, erklären.

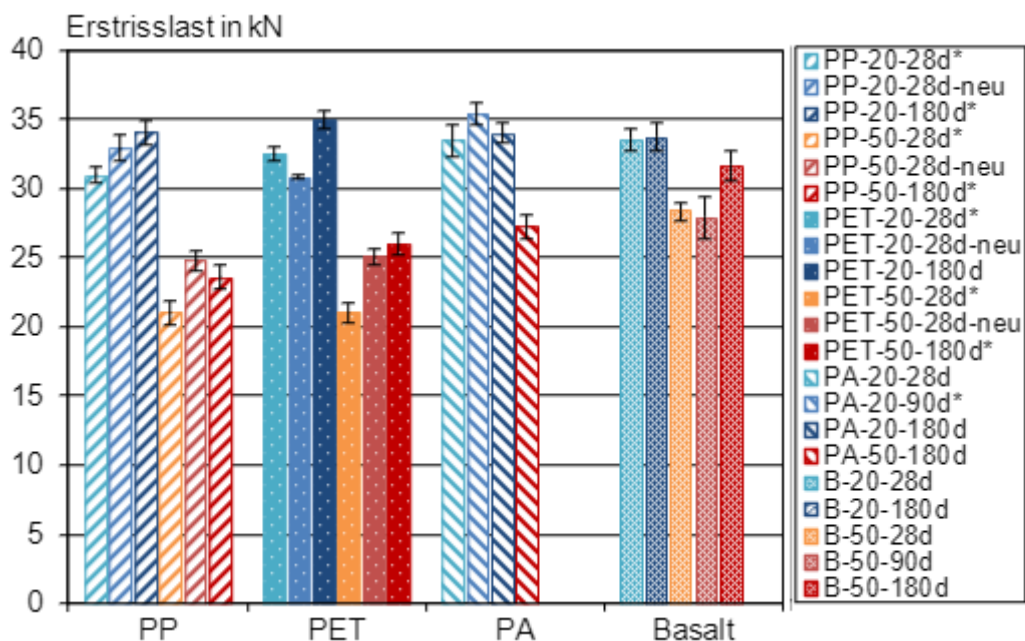


Bild 32: Mittelwerte der Erstrisslast F_U aller untersuchten Biegebalkenserien; mit Stern markierte Biegebalken wurden unmittelbar nach der Lagerung im warmen Zustand geprüft

3.3.1 4-Punkt-Biegezugversuche der PP-Fasern

Für die Untersuchungen der PP-Fasern anhand des 4-Punkt-Biegezugversuchs wurden zunächst 4 Serien bestehend aus jeweils 6 Biegebalken hergestellt und im Alter von 28 bzw. 180 Tagen unmittelbar nach der Lagerung im 20 °C bzw. 50 °C temperierten Wasserbecken geprüft. Wie bereits erläutert, kann so die Beurteilung der Dauerhaftigkeit im alkalischen Milieu von Beton jedoch nicht losgelöst von den Einflüssen ausgehend von der Probekörpertemperatur von 50 °C beurteilt werden. Zudem betrug die Expositionsdauer im temperierten Wasserbecken nur 27 bzw. 179 Tage. Aus diesem Grund wurden zwei zusätzliche Serien, jeweils eine für die Lagerung bei 20 °C und 50 °C hergestellt, die nach einer Expositionsdauer von 28 Tagen im temperierten Wasserbecken, im Probekörperalter von 36 Tagen geprüft wurden. Diese Serien werden mit dem Zusatz „neu“ in den Diagrammen und Tabellen gekennzeichnet.

In Bild 33 sind die mittleren Flächenanteile des Fasereinflusses am Arbeitsvermögen der beiden betrachteten Bemessungsstellen $D_{fl,I}^f$ und $D_{fl,II}^f$ als Balkendiagramm mit zugehöriger Standardabweichung der Prüfserien des PP-Faserbetons zusammengefasst dargestellt.

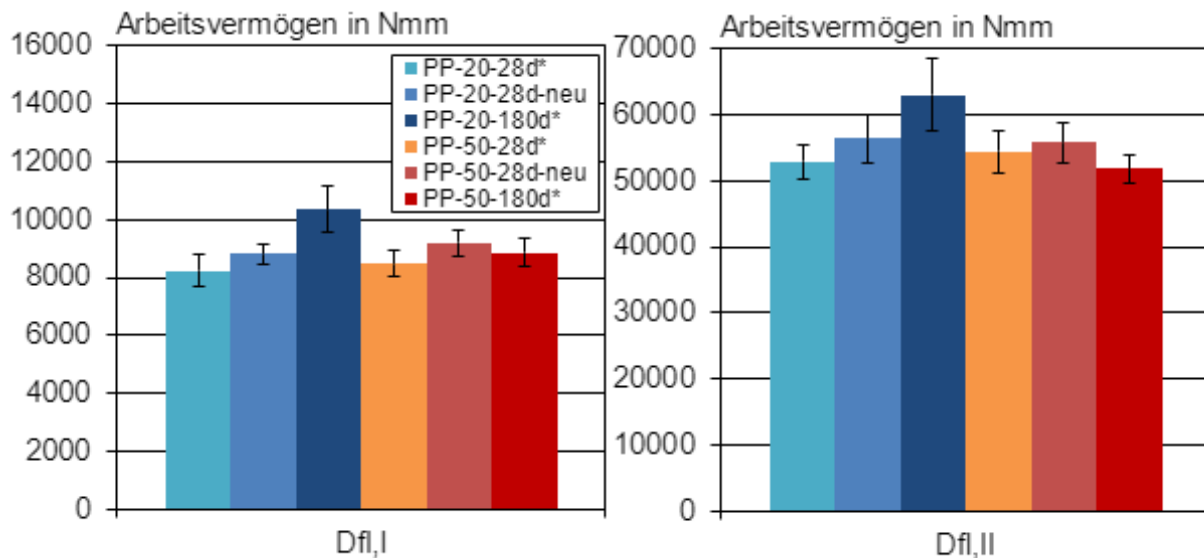


Bild 33: Balkendiagramm der mittleren Energieabsorptionsfähigkeit $D_{fl,I}^f$ und $D_{fl,II}^f$ der Faserbewehrung der Prüfserien des PP-Faserbetons mit zugehöriger Standardabweichung

Bei Betrachtung des Arbeitsvermögens $D_{fl,I}^f$ und $D_{fl,II}^f$, welches ein Maß für die zum Bruch des Baustoffs erforderliche Energie darstellt können dieselben, zuvor anhand der mittleren Biegezugfestigkeit beobachteten Trends festgestellt werden. Die genauen Werte der Energieabsorptionsfähigkeit der Fasern mit zugehöriger Änderung mit Bezug auf die Serie PP-20-28d* sind in Tabelle 17 aufgeführt. Bei der 20 °C Lagerung kann auch im Nachstragverhalten eine Steigerung des Arbeitsvermögens mit Zunahme des Probenalters verzeichnet werden. Dies zeigt den unmittelbaren Zusammenhang zwischen Betonfestigkeit und dem Verbund der Fasern zur Matrix. Mit steigender Betonfestigkeit scheint sich ebenso das Verbundverhalten zu verbessern und es können weitere Zugkräfte übertragen werden. Die Grenze dieses Zusammenhangs wird erreicht, sobald die Verbundspannungen größer sind als die Zugfestigkeit der Fasern. Dies ist bei den Untersuchungen jedoch nicht der Fall, da ansonsten ein schlagartiger Abfall in den Last-Durchbiegungskurven zu verzeichnen wäre. Die gesteigerte Energieabsorptionsfähigkeit der Fasern bei der 20 °C Lagerung im Probekörperalter von 180 Tagen um knapp 26 %, spricht zudem für die Beständigkeit des Fasermaterials im alkalischen Milieu von Beton und zeigt die verbesserten Verbundeigenschaften des Betons mit zunehmenden Alter auf.

Bei der Betrachtung des Arbeitsvermögens $D_{fl,I}^f$ und $D_{fl,II}^f$ der Serien, die bei 50 °C gelagert wurden, wird ebenfalls unmittelbar der Zusammenhang zwischen der Betonfestigkeit und dem Verbund zwischen den Fasern und der Betonmatrix deutlich. Da die Biegezugfestigkeit bei dieser Lagerung geringer ist, kann das Arbeitsvermögen entsprechend nicht weiter gesteigert werden. Es fällt jedoch auf, dass die Energieabsorptionsfähigkeit der Fasern, trotz geringerer

Betonfestigkeit im Vergleich zu den bei 20 °C gelagerten Proben, nicht abnimmt, sondern auf dem Niveau der 28 Tage alten Probekörper bleibt. Dies spricht für eine konstante Leistungsfähigkeit der untersuchten PP-Fasern und ihrer Temperaturunabhängigkeit. Anders als der Beton zeigt das Fasermaterial bei erhöhten Temperaturen kein duktileres Verhalten. Lediglich der Beton verhält sich auf Grund der erhöhten Prüftemperatur im Versagen duktiler und beeinflusst somit das Verbundverhalten.

Tabelle 17: Mittelwerte der Energieabsorptionsfähigkeit $D_{f_{fl,I}}^f$ und $D_{f_{fl,II}}^f$ der PP-Fasern, ermittelt anhand der 4-Punkt-Biegezugprüfung, mit zugehöriger prozentualer Änderung in Bezug auf die Prüfserie PP-20-28d*

Serie	$D_{f_{fl,I}}^f$	Änderung	$D_{f_{fl,II}}^f$	Änderung
	Nmm	%	Nmm	%
PP-20-28d*	8.225	-	52.880	-
PP-20-28d-neu	8.805	+7,05	56.361	+6,58
PP-20-180d*	10.342	+25,74	63.054	+19,24
PP-50-28d*	8.483	+3,14	54.398	+2,87
PP-50-28d-neu	9.209	+11,96	55.746	+5,42
PP-50-180d*	8.856	+7,67	51.791	-2,06

Die erzielten Ergebnisse lassen auf die Temperatur- und Alkalibeständigkeit, bei Temperaturen bis zu 50 °C, der verwendeten PP-Faser und damit verbunden auf ihre Dauerhaftigkeit im alkalischen Milieu von Beton schließen.

3.3.2 4-Punkt-Biegezugversuche der PET-Fasern

Für die Untersuchungen der PET-Fasern anhand des 4-Punkt-Biegezugversuchs wurden, wie auch schon zuvor bei den Untersuchungen der PP-Fasern zuvor, zunächst 4 Serien bestehend aus jeweils 6 Biegebalken hergestellt. Davon wurden jeweils zwei Serien bei 20 °C und 50 °C in temperierten Wasserbecken gelagert. Die in dem Wasserbecken bei 50 °C gelagerten Serien wurden unmittelbar im Probenalter von 28 bzw. 180 Tagen geprüft, sowie auch die Serie, die für 27 Tage im Wasserbecken bei 20 °C gelagert wurde. Die Lagerung wurde jedoch während der Untersuchungen angepasst, um den Temperatureinfluss bei der Prüfung zu vermeiden, so dass die zweite Serie im 20 °C temperiertem Wasserbecken (180 Tage) bereits nach der angepassten Lagerung geprüft werden konnte. Die erste Lagerungsvariante wird in den Diagrammen und Tabellen mit einem Sternchen (*) gekennzeichnet, wohingegen die vorgesehene, angepasste Lagerungsvariante keinen gesonderten Namenszusatz trägt. Daraufhin wurden zwei zusätzliche Serien hergestellt, die für 28 Tage im 20 °C bzw. 50 °C temperierten Wasserbecken und ergänzende 7 Tage in feuchten Tüchern und Folie, gelagert wurden. Diese Serien sind in den Diagrammen und Tabellen mit dem Zusatz „neu“ eindeutig zuzuordnen.

Bei der Betrachtung der Last-Durchbiegungskurven der Serien, die bei 20 °C gelagert wurden, kann bei der Serie PET-20-28d* eine Höchstlast F_U , bei welcher der erste Riss ausgebildet wird, von etwa 30 kN bis 35 kN festgestellt werden. Darauf folgt der schlagartige Lastabfall auf

etwa 10 kN bis 15 kN. Daraufhin wird die Faserbewehrung am Lastabtrag beteiligt und das Lastniveau von ca. 10 kN kann anschließend annähernd konstant gehalten werden. Es lässt sich lediglich ein geringfügig abfallender Trend des Kurvenverlaufs zum Ende der Prüfung hin wahrnehmen. Bei der Serie PET-20-28d-neu kann im Vergleich lediglich eine Erstrisslast F_U von ca. 30 kN erfasst werden. Das Nachstragverhalten entspricht jedoch dem zuvor beschriebenen Verhalten der Serie PET-20-28d*. Prüfserie PET-20-180d hingegen, weist eine Höchstlast F_U von im Mittel 35 kN und einen anschließenden Lastabfall auf bis zu 5 kN auf. Die abtragbare Last von im Mittel 6 kN kann jedoch bis zum Ende der Prüfung, bei einer Durchbiegung von 4,0 mm, konstant gehalten werden.

Bei den Serien, die bei 50 °C gelagert wurden, wird lediglich eine Erstrisslast F_U von etwa 20 kN bis 25 kN erreicht. Der anschließende Lastabfall der 28 Tage alten bzw. gelagerten Proben fällt, auf Grund des niedrigeren Lastniveaus der Kraft F_U im Vergleich zu den bei 20 °C gelagerten Proben, geringer aus. Die Serie PET-50-28d-neu weist jedoch, auf Grund der Prüfung im abgekühlten Zustand, bis auf das geringere Lastniveau von F_U , dasselbe Tragverhalten wie das der Serie PET-20-28d* auf. Bei der Prüfung im warmen Zustand der Probekörper fällt die durch die Fasern aufnehmbare Last nach der Erstrissbildung weiter ab als bei den abgekühlten Proben. Im Anschluss an die Erstrissbildung können die Probekörper im Alter von 28 Tagen noch ein Lastniveau von etwa 8 kN über die Zuglastübertragung der Faserbewehrung halten. Bis zum Ende der Prüfung sinkt die aufnehmbare Last noch geringfügig auf etwa 7 kN ab. Im Probekörperalter von 180 Tagen ist dieser Trend im Tragverhalten deutlicher ausgeprägt. Nach der Erstrissbildung sinkt die aufnehmbare Last auf etwa 7 kN und nimmt bis zum Prüfungsende weiter auf bis zu 3 kN ab.

Für eine bessere Übersicht der Unterschiede im Tragverhalten der einzelnen Serien und der damit verbundenen Einflüsse aus den Lagerungsvarianten, sind in Bild 34 alle erzeugten Mittelwertkurven der einzelnen Prüfserien zusammengefasst dargestellt. Die Serien, die bei 20 °C gelagert wurden, werden dabei in Blautönen und die Serien, die bei 50 °C gelagert wurden, in Rottönen wiedergegeben. Anhand der Darstellung der Mittelwertkurven ist eine klare Abstufung der Kurven mit zunehmendem Alter und zunehmender Lagerungstemperatur sowie Probekörpertemperatur bei der Prüfung zu erkennen.

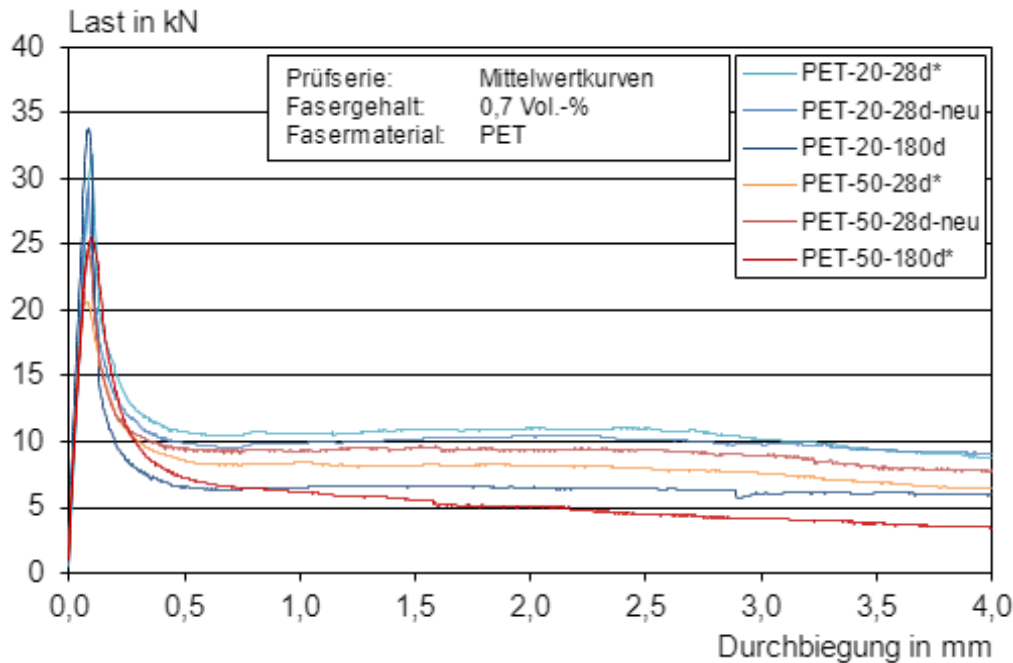


Bild 34: Last-Durchbiegungskurven der Mittelwerte der Prüfserien des PET-Faserbetons

Zusätzlich wurde die Biegezugfestigkeit des Betons $f_{ct,fl}^f$ für jeden Probekörper anhand der Höchstlast F_U ermittelt. Diese ist in den Tabellen der Einzelergebnisse (siehe Tabelle A63 bis Tabelle A65, Anhang A) mit aufgeführt. Dabei fällt auf, dass die mittlere Biegezugfestigkeit $f_{ct,fl}^f$ der Serie PET-20-28d-neu um 4,5 % geringer ist als die der Serie PET-20-28d*. Unter Einbeziehung der Ergebnisse der Frischbeton- und Druckfestigkeitsprüfungen an den Würfel-Probekörpern, liegt auch das Ausbreitmaß mit Fasern (vgl. Tabelle A5 und die Druckfestigkeit nach 28 °C nach Normlagerung [L7]) unter den Werten der anderen PET-Faserbetone. Die Mischungszusammensetzung war jedoch immer die gleiche. Eine Ursache für diese Abweichungen könnte möglicherweise ein unterlaufender Fehler bei der Einwaage und damit bei der Herstellung des Faserbetons dieser Serie sein. Im Regelfall, bei korrekter Herstellung des Faserbetons, sollte die Biegezugfestigkeit zwischen den Werten der Serien PET-20-28d* und PET-20-180d liegen, da die Probekörper insgesamt 8 Tage älter waren. Um dies zu verifizieren, sollte die Herstellung und Prüfung dieser Serie wiederholt werden. Diese geringe Abweichung hat jedoch keinen signifikanten Einfluss auf die untersuchten Dauerhaftigkeitseigenschaften des Fasermaterials. Aus diesem Grund werden die Ergebnisse dieser Serie weiterhin bei der Auswertung berücksichtigt.

Die mittlere Biegezugfestigkeit $f_{ct,fl}^f$ der Serie PET-20-180d liegt wie erwartet am höchsten, da die Probekörper das höchste Probenalter bei gleichzeitig konstanter Lagerungstemperatur von 20 °C aufweisen. Die geringste Biegezugfestigkeit $f_{ct,fl}^f$ weist die Prüfserie PET-50-28d* auf. Dies lässt sich, wie schon bei den Untersuchungen zum PP-Faserbeton (vgl. Kapitel 3.3.1, auf den „Crossover-Effect“ und die Abnahme der Bruchenergie bei der Prüfung mit erhöhten Probekörpertemperaturen zurückführen (vgl. Kapitel 3.3. Bei den weiteren Prüfserien, welche in Wasser bei 50 °C gelagert wurden, liegt die Biegezugfestigkeit im Vergleich wiederum etwas höher. Dies wird auf das höhere Probekörperalter und die Abkühlung der Probekörper vor der

Prüfung der Serie PET-50-28d-neu zurückzuführen sein. In Bild 35 sind die mittleren Flächenanteile der beiden betrachteten Bemessungsstellen $D_{f1,I}$ und $D_{f1,II}$, welche das Arbeitsvermögen des Faserbetons widerspiegeln, als Balkendiagramme mit zugehöriger Standardabweichung der Prüfserien dargestellt.

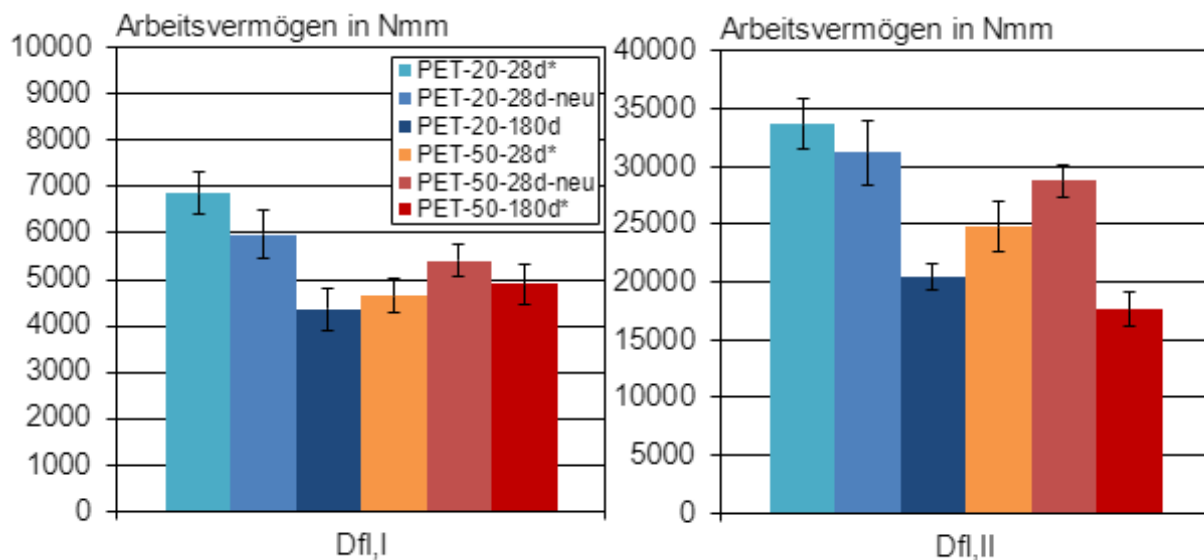


Bild 35: Balkendiagramm der mittleren Energieabsorptionsfähigkeit $D_{f1,I}$ und $D_{f1,II}$ der Faserbewehrung der Prüfserien des PET-Faserbetons mit zugehöriger Standardabweichung

Bei Betrachtung des Arbeitsvermögens $D_{f1,I}$ und $D_{f1,II}$ weist die Serie PET-20-28d* die höchsten Werte und damit das beste Nachrisstragverhalten der untersuchten PET-Faserbetone nach variierter Lagerungsdauer und -temperatur auf. Die genauen Mittelwerte der Energieabsorptionsfähigkeit der einzelnen Serien mit ihren zugehörigen prozentualen Änderungen in Bezug auf die Serie PET-20-28d* sind in Tabelle 18 aufgeführt. Das Arbeitsvermögen der Serien, die bei 20 °C gelagert wurden, zeigt mit steigendem Probekörperalter eine stetige Abnahme. Der Einfluss des niedrigeren Lastniveaus des Nachrisstragverhaltens der Serie PET-20-180d macht sich bei der Betrachtung der Energieabsorptionsfähigkeit von Bemessungswert 1 zu 2 noch ausgeprägter bemerkbar. Ein besserer Verbund zwischen Faserbewehrung und Betonmatrix auf Grund einer höheren Betonfestigkeit kann, anders als bei den Untersuchungen des PP-Faserbetons, in diesem Fall nicht festgestellt werden. Es lässt sich jedoch auch kein Faserversagen, bei dem die Zugfestigkeit des Fasermaterials überschritten wird, identifizieren, das aus einem verbesserten Verbund zwischen Matrix und Fasern durch die erhöhte Betonfestigkeit resultieren könnte. Dies deutet grundsätzlich darauf hin, dass die untersuchte PET-Faser nicht beständig im alkalischen Milieu von Beton und damit nicht dauerhaft ist.

Die Serien, bei denen die Probekörper bei 50 °C gelagert wurden, weisen bereits auf Grund der geringeren Biegezugfestigkeit des Betons ein geringeres Arbeitsvermögen im Vergleich zu den bei 20 °C gelagerten Serien auf. Die Serie, die im abgekühlten Zustand geprüft wurde, weist dabei die größte Energieabsorptionsfähigkeit der Serien, die bei 50 °C gelagert wurden

auf. Die vergleichsweise schlechtere Energieabsorptionsfähigkeit des Faserbetons, der unmittelbar nach der Entnahme aus dem 50 °C warmen Wasserbecken geprüft wurde, kann vor allem auf das duktilere Verhalten des Betons im erwärmten Zustand zurückgeführt werden. Durch die Prüfung des warmen Betons, werden der Verbund zwischen Fasern und Matrix und damit verbunden die von den Fasern übertragbaren Zugspannungen scheinbar zusätzlich negativ beeinflusst. Die geringste Energieabsorptionsfähigkeit weist die Serie PET-50-180d* auf, da das durch die Fasern abtragbare Lastniveau im Verlauf der Prüfung stetig abnimmt, was bereits bei der Analyse der Last-Durchbiegungskurven festgestellt werden konnte. Im Vergleich zu der Serie PET-20-28d* liegt die Energieabsorptionsfähigkeit dieser Serie lediglich noch bei knapp 50 %.

Tabelle 18: Mittelwerte der Energieabsorptionsfähigkeit $D_{fl,I}^f$ und $D_{fl,II}^f$ der PET-Fasern, ermittelt anhand der 4-Punkt-Biegezugprüfung, mit zugehöriger prozentualer Änderung in Bezug auf die Prüfserie PET-20-28d*

Serie	$D_{fl,I}^f$	Änderung	$D_{fl,II}^f$	Änderung
	Nmm	%	Nmm	%
PET-20-28d*	6.861	-	33.665	-
PET-20-28d-neu	5.978	-12,87	31.191	-7,35
PET-20-180d	4.354	-36,54	20.422	-39,34
PET-50-28d*	4.647	-32,27	24.774	-26,41
PET-50-28d-neu	5.407	-21,19	28.728	-14,67
PET-50-180d*	4.897	-28,63	17.632	-47,63

Anhand der Ergebnisse des untersuchten PET-Faserbetons, können die verwendeten PET-Fasern als nicht dauerhaft eingestuft werden. Eventuell könnte die Abnahme in dem Nachstragverhalten und dem Arbeitsvermögen im fortschreitenden Probekörperalter auch auf die zeitliche Veränderung der Interphase zwischen Faser und Betonmatrix zurückzuführen sein. Eine, durch die Lagerung bei 50 °C, induzierte beschleunigte Alterung und damit verbundene beschleunigte Abnahme des Nachstragverhaltens kann bedingt festgestellt werden. Beim Vergleich der Serien PET-20-28d-neu mit PET-50-28d-neu und den Serien PET-20-180d mit PET-50-180d* kann eine Beschleunigung der Abnahme des Arbeitsvermögens um 7 % und 8 % festgestellt werden. Dabei handelt es sich jedoch um eine vergleichsweise unwesentliche Beschleunigung, bei gleichzeitiger Berücksichtigung des Einflusses der erhöhten Temperatur auf die Festigkeitsentwicklung des Betons und dessen Einfluss auf das Verbund- und Tragverhalten des Faserbetons.

3.3.3 4-Punkt-Biegezugversuche der PA-Fasern

Für die Untersuchungen der PA-Faser anhand des 4-Punkt-Biegezugversuchs wurden insgesamt 4 Serien bestehend aus jeweils 6 Biegebalken hergestellt. Davon wurden drei Serien bei 20 °C, für 28, 90, und 180 Tage, und eine für 180 Tage bei 50 °C, in temperierten Wasserbecken, gelagert. Lediglich bei der Serie, die für 90 Tage im 20 °C temperierten

Wasserbecken gelagert werden sollte, betrug die Lagerungsdauer, wie in Kapitel 2.4.3 erläutert, lediglich 89 Tage und die Probekörper wurden im Alter von 90 Tagen geprüft. Aus diesem Grund ist diese Serie in den Diagrammen und Tabellen mit einem Sternchen (*) markiert. Alle weiteren Probekörper der anderen Prüfserien wurden für die angegebene Zeitspanne im entsprechend temperierten Wasserbecken und anschließend für zusätzliche 7 Tage in feuchten Tüchern und Folie im Labor gelagert.

Bei der Betrachtung der Last-Durchbiegungskurven der Serien, bei denen die Probekörper bei 20 °C gelagert wurden, ist zu erkennen, dass die Erstrissbildung aller Serien ungefähr bei der Höchstlast F_U von etwa 35 kN stattfand. Darauf folgt der rapide Lastabfall auf bis zu 5 kN. Bei der Serie PA-20-180d fällt der Lastabfall geringfügig schwächer, auf in etwa 7 kN, aus. Das im Anschluss an die Erstrissbildung erreichte Lastniveau kann bis zum Ende der Prüfung bei einer Durchbiegung von 4,0 mm konstant gehalten werden und bei den meisten Proben zusätzlich leicht gesteigert werden. Bei der Serie, bei welcher die Probekörper für 180 Tage gelagert wurden, ist dieser Trend am deutlichsten ausgeprägt. Dieses Tragverhalten kann möglicherweise auf den geringen Elastizitätsmodul des Fasermaterials zurückzuführen sein. Schon bei den Faser-Zugversuchen der Restzug- und SIC-Proben konnte eine Dehnung der Faserproben von bis zu 40 % festgestellt werden, bevor die Faser versagte (vgl. Kapitel 3.2.4). Dies lässt vermuten, dass die Makrofasern in der Betonmatrix bei der 4-Punkt-Biegezugprüfung ebenfalls im Bereich des entstehenden Risses gedehnt werden. Durch das hohe Dehnungsmaß der Fasern wird der Riss im Probekörper weiter aufgeweitet, ohne dass signifikant höhere Lasten abgetragen werden oder die Fasern versagen.

Anhand der Last-Durchbiegungskurve der Serie, bei der die Probekörper für 180 Tage im 50 °C warmen Wasserbecken gelagert wurden, lässt sich lediglich eine Erstrisslast F_U von 25 kN bis 30 kN feststellen. Das erreichte Lastniveau nach anschließendem Lastabfall liegt zwischen 5 kN und 10 kN. Das darauffolgende Nachrisstragverhalten, dass durch die Zuglastübertragung der PA-Faserbewehrung erreicht werden kann, entspricht dem gleichen Tragverhalten, welches bereits bei den Proben, die bei 20 °C gelagert wurden, festgestellt werden konnte. Auch bei der Serie PA-50-180d kann das abtragbare Lastniveau bis zum Ende der Prüfung, bei einer Durchbiegung von 4,0 mm, geringfügig gesteigert werden. Bei dieser Serie ist zusätzlich darauf hinzuweisen, dass während der Lagerung im Wasserbecken die vorherrschende Temperatur, auf Grund eines technischen Defekts, kurzzeitig für wenige Stunden auf bis zu 95 °C angestiegen ist. Dies wurde schnellstmöglich behoben. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass die kurzzeitige Exposition bei deutlich erhöhter Temperatur einen Einfluss auf das Tragverhalten unter Biegezugbeanspruchung hatte.

Die für die einzelnen Serien des untersuchten PA-Faserbetons erstellten Mittelwertkurven wurden für eine bessere Übersicht der Versuchsergebnisse in Bild 36 zusammengefasst dargestellt. Dabei sind die Serien, die im Wasserbecken bei 20 °C gelagert wurden, in Blautönen und die Serie, die im Wasserbecken bei 50 °C gelagert wurde, in dunkelrot abgebildet. Anhand dieser Darstellung wird deutlich, dass die Energieabsorptionsfähigkeit der PA-Fasern mit steigendem Probenalter zunimmt. Des Weiteren fällt auf, dass die Mittelwertkurven der 20 °C gelagerten Serien im Nachrisstragverhalten ab einer Durchbiegung von etwa 1,0 mm nahezu parallel zueinander verlaufen. Der abweichende Verlauf der Kurve

von Serie PA-50-180d könnte auch auf ein verändertes Material- und Verbundverhalten des Fasermaterials durch die Lagerung im Glasübergangstemperaturbereich und der zusätzlichen, kurzzeitigen, fehlerhaften Exposition der Probekörper bei knapp 95 °C hindeuten. Die Glasübergangstemperatur der untersuchten PA-Faser konnte mittels der DSC-Analyse (vgl. Bild B3, Anhang B) zu ca. 50 °C bestimmt werden.

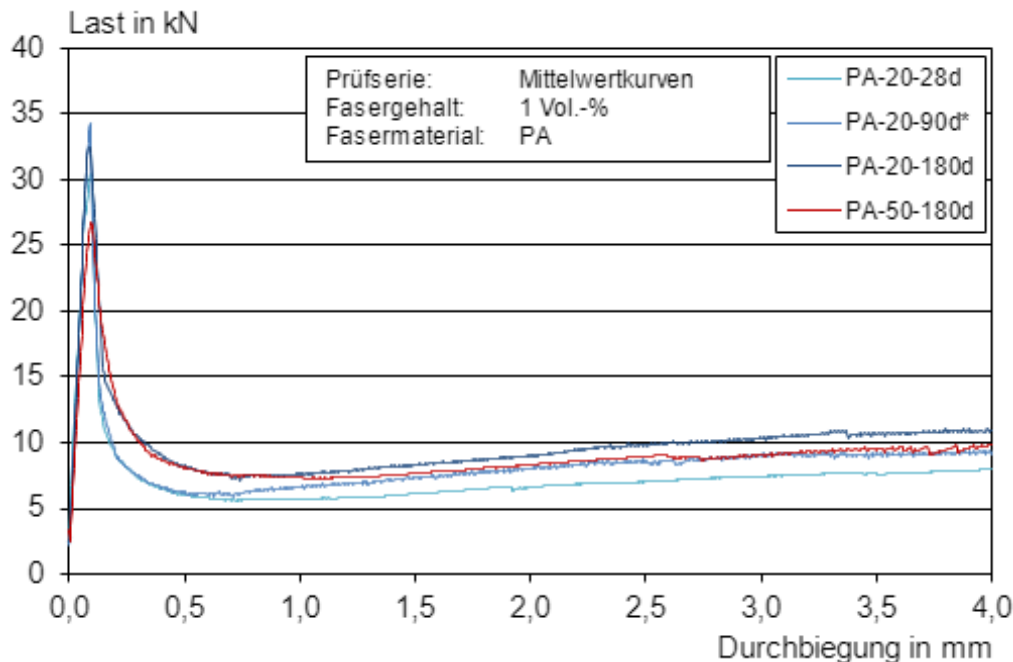


Bild 36: Last-Durchbiegungskurven der Mittelwerte der Prüfserien des PA-Faserbetons

Die zusätzlich bestimmten Biegezugfestigkeiten des Faserbetons $f_{ct,fl}^f$ der einzelnen Proben, die anhand der ermittelten Höchstlast F_U berechnet werden konnten, sind in den Tabellen der Einzelergebnisse (siehe Tabelle A66 und Tabelle A67, Anhang A) mit aufgeführt. Dabei fällt auf, dass die mittleren Biegezugfestigkeiten der bei 20 °C gelagerten Serien auf einem vergleichbaren Niveau liegen und die Serie, die in einem Probenalter von 90 Tagen geprüft wurde, die höchste Biegezugfestigkeit aufweist. Diese Beobachtungen entsprechen nicht den erwarteten Ergebnissen. Im Regelfall nimmt die Betonfestigkeit mit steigendem Alter weiter zu und fällt nicht in einem erhöhten Probenalter wieder ab. Unter Einbeziehung der Frischbeton- und Druckfestigkeitsprüfungen, die an den Mischungen des PA-Faserbetons jeder Serie durchgeführt wurden, lässt sich jedoch keine entsprechende Ursache für die geringere Biegezugfestigkeit der Serie PA-20-180d bzw. der dementsprechend hohen Biegezugfestigkeit der Serie PA-20-90d* erkennen. Die im Vergleich zu den anderen Serien geringere mittlere Biegezugfestigkeit der Serie, die bei 50 °C gelagert wurde, lässt sich auf den „Crossover-Effect“ zurückführen (vgl. Kapitel 3.3).

In Bild 37 sind die mittleren Flächenanteile der beiden betrachteten Bemessungsstellen $D_{fl,I}^f$ und $D_{fl,II}^f$, welche das Arbeitsvermögen des Faserbetons widerspiegeln als Balkendiagramm mit zugehöriger Standardabweichung der einzelnen Prüfserien des PA-Faserbetons zusammengefasst dargestellt.

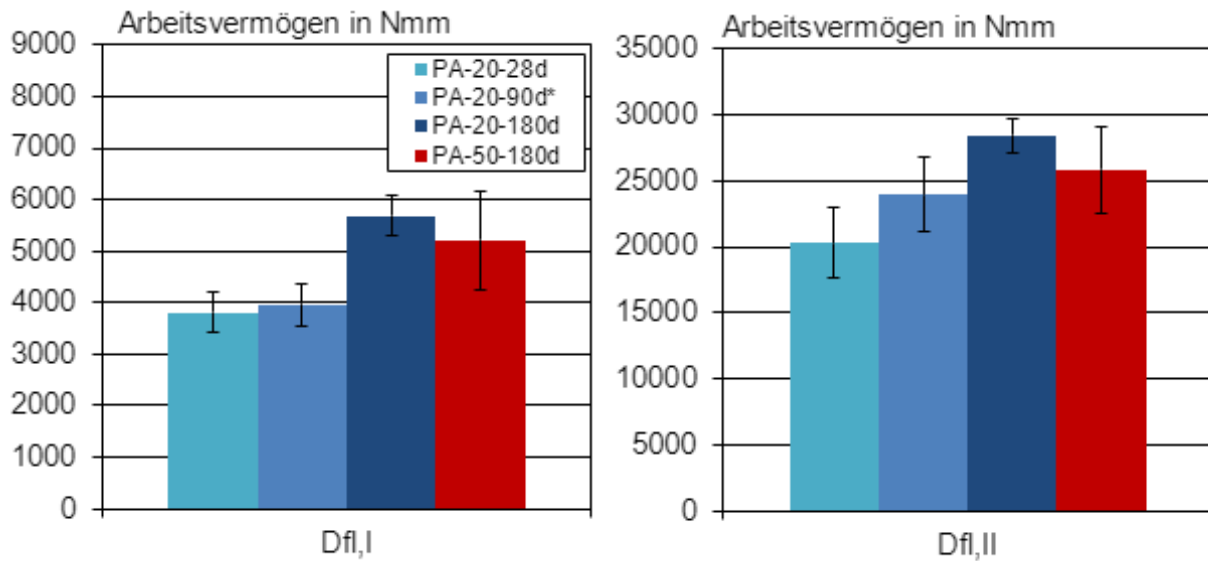


Bild 37: Balkendiagramm der mittleren Energieabsorptionsfähigkeit $D_{fI,I}$ und $D_{fI,II}$ der Faserbewehrung der Prüfserien des PA-Faserbetons mit zugehöriger Standardabweichung

Bei dieser Darstellung kann anhand der Betrachtung des zweiten Bemessungswerts festgestellt werden, dass die Energieabsorptionsfähigkeit des PA-Faserbetons bei der Lagerung von 20 °C mit zunehmendem Alter proportional zunimmt. Die genauen Mittelwerte der Energieabsorptionsfähigkeit der einzelnen Serien mit ihren zugehörigen prozentualen Änderungen in Bezug auf die Serie PA-20-28d sind in Tabelle 19 aufgeführt. Es ist festzustellen, dass das Arbeitsvermögen der 36-Tage alten Proben im Vergleich zu den 90-Tage alten Proben um annähernd 20 % und im Vergleich zu den 188-Tage alten Proben um knapp 40 % zunimmt. Da die Biegezugfestigkeit des untersuchten PA-Faserbetons, wie zuvor beschrieben, mit steigendem Alter nicht entsprechend zugenommen hat, kann der Einfluss der verbesserten Energieabsorptionsfähigkeit nicht auf den Einfluss eines besseren Verbundes zwischen Fasern und Matrix auf Grund einer höheren Betonfestigkeit zurückgeführt werden. Aus diesem Grund liegt die Vermutung nahe, dass die Fasern durch die Einbindung in den Beton, über einen längeren Zeitraum, in ihren Materialeigenschaften positiv beeinflusst werden und dies zu einem verbesserten Verbundverhalten bzw. zu einer höheren Leistungsfähigkeit der untersuchten PA-Fasern führt. Eventuell könnte dieses Verhalten auch auf eine, den Verbund zwischen Fasern und Matrix begünstigende, zeitliche Veränderung der Interphase hindeuten.

Die Energieabsorptionsfähigkeit der Serie, deren Probekörper für 180 Tage in einem auf 50 °C temperierten Wasserbecken gelagert wurden, liegt etwas niedriger als die der Serie PA-20-180d. Dies ist wahrscheinlich hauptsächlich auf die geringere Biegezugfestigkeit, bedingt durch den „Crossover-Effect“, zurückzuführen ist. Zudem führt die Lagerung bei erhöhter Temperatur zu größeren Streuungen in den Versuchsergebnissen, was deutlich anhand der eingezeichneten Standardabweichung zu erkennen ist. Dies könnte eventuell auch durch die kurzzeitig erhöhte Lagerungstemperatur bedingt worden sein. Des Weiteren könnte die

Lagerung im und über dem Glasübergangstemperaturbereich der PA-Faser bei 50 °C zu einem veränderten Material- und Verbundverhalten führen.

Tabelle 19: Mittelwerte der Energieabsorptionsfähigkeit $D_{fl,I}^f$ und $D_{fl,II}^f$ der PA-Fasern, ermittelt anhand der 4-Punkt-Biegezugprüfung, mit zugehöriger prozentualer Änderung in Bezug auf die Prüfsérie PA-20-28d

Serie	$D_{fl,I}^f$	Änderung	$D_{fl,II}^f$	Änderung
	Nmm	%	Nmm	%
PA-20-28d	3.817	-	20.303	-
PA-20-90d*	3.963	+3,82	23.978	+18,10
PA-20-180d	5.686	+48,97	28.419	+39,97
PA-50-180d	5.215	+36,63	25.869	+27,41

Die erzielten Ergebnisse bezüglich des PA-Faserbetons, könnten auf die Dauerhaftigkeit der verwendeten Fasern im alkalischen Milieu von Beton schließen lassen.

3.3.4 4-Punkt-Biegezugversuche der Basalt-Fasern

Für die Untersuchungen der Basaltfaser anhand des 4-Punkt-Biegezugversuchs wurden insgesamt 5 Serien mit jeweils 6 Biegebalken hergestellt. Davon wurden zwei Serien im Wasserbecken bei 20 °C, für 28 und 180 Tage gelagert und drei Serien im Wasserbecken bei 50 °C, für 28, 90 und 180 Tage. Nach der Exposition im temperierten Wasserbecken, wurden alle Probekörper weitere 7 Tage in feuchten Tüchern und Folie im Labor bis zum Tag ihrer Prüfung gelagert. Das Probenalter betrug dementsprechend 36, 98 bzw. 188 Tage bei der 4-Punkt-Biegezugprüfung. Die Erläuterung der Probenlagerung ist Kapitel 2.4.3 zu entnehmen.

Bei der Betrachtung der Last-Durchbiegungskurven der Serien, die bei 20 °C gelagert wurden, ist zu erkennen, dass die Höchstlast F_U der Erstrissbildung bei etwa 35 kN liegt. Der anschließende Lastabfall fällt verhältnismäßig gering aus. Die Basaltfasern werden nach einer Lagerung des Faserbetons von 28 Tagen bei 20 °C in Wasser im Mittel ab einem Lastniveau von ca. 25 kN an der Zuglastabtragung beteiligt. Nach 180 Tagen beträgt die mittlere aufnehmbare Last der Proben, die bei 20 °C in Wasser gelagert wurden sogar 27 kN. Daraufhin kann das Lastniveau in den meisten Fällen geringfügig weiter gesteigert werden, bevor es bei der mittleren Durchbiegung von etwa 2,0 mm wieder abnimmt. Die Lastabnahme ab einer Durchbiegung von 2,0 mm findet bei den Balken mit einem höheren Probekörperalter ausgeprägter statt. Am Ende der Prüfung, bei einer Probekörperdurchbiegung von 4,0 mm, liegt das Lastniveau der Serie B-20-28d, dass durch die Zuglastübertragung der Faserbewehrung weiter abgetragen werden kann, zwischen 15 kN und 26 kN, wohingegen das der Serie B-20-180d noch lediglich im Bereich von 12 kN bis 17 kN liegt.

Die Serien, die bei einer Temperatur von 50 °C in Wasserbecken gelagert wurden, weisen im geringen Probenalter eine Höchstlast F_U von bis zu 30 kN auf, wobei die Versuchsergebnisse nach einer Expositionsdauer von 90 Tagen eine größere Streubreite aufweisen. Im hohen Probenalter erreichen die Probekörper bei der Erstrissbildung eine Höchstlast F_U in einem Bereich von 30 kN bis 35 kN. Bei der Serie B-50-28d beträgt der anschließende Lastabfall

etwa 10 kN. Anschließend wird die Faserbewehrung im Mittel bei einem Lastniveau von 20 kN am Lastabtrag beteiligt. Dieses Lastniveau kann zunächst konstant bzw. mit einer geringfügigen Steigerung beibehalten werden. Erst ab einer mittleren Durchbiegung von 2,5 mm sinkt die Kapazität weitere Zugkräfte zwischen den Rissufern der Betonmatrix zu übertragen. Im Vergleich dazu fällt bei der Serie B-50-90d der minimale Lastabfall nach Erstrissbildung auf, der lediglich 2 kN bis 3 kN beträgt. Damit kann im Mittel noch ein Lastniveau von 25 kN durch die Beteiligung der Fasern am Lastabtrag übertragen und beibehalten werden. Dabei setzt die Abnahme des Arbeitsvermögens bereits ab einer Durchbiegung von 1,5 mm ein. Die Proben der Serie B-50-180d zeigen zum Teil ebenfalls einen relativ geringen Lastabfall nach der Erstrissbildung und andererseits aber auch einen etwas deutlicheren Lastabfall von bis zu 10 kN, wie bei der Serie B-50-28d. Zudem fällt bei dieser Serie auf, dass das Lastniveau nach dem Lastabfall nicht mehr konstant gehalten werden kann, sondern von Beginn an sinkt. Die Abnahme der Energieabsorptionsfähigkeit findet zusätzlich im Bereich zwischen 1,5 mm und 2,0 mm bis zum Ende der Prüfung ausgeprägter statt. Des Weiteren ist darauf hinzuweisen, dass die Serien B-50-90d und B-50-180d von dem kurzzeitigen Defekt des temperierten Wasserbeckens betroffen waren und für einen Zeitraum von wenigen Stunden einer erhöhten Lagerungstemperatur von knapp 95 °C ausgesetzt waren. Dieser Vorfall könnte Auswirkungen auf die Versuchsergebnisse dieser Serien haben und eventuell für die Zunahme der Streuung verantwortlich sein. Die Festigkeit des Betons wurde jedoch nicht sichtbar negativ beeinflusst und die Leistungsfähigkeit der Fasern scheint ebenfalls nicht signifikant beeinflusst worden zu sein. Dennoch ist ein möglicher Einfluss auf das Tragverhalten der Proben dieser Serien durch die Exposition der Probekörper bei nicht vorgesehenen erhöhten Temperaturen nicht auszuschließen.

Für jede untersuchte Prüfserie des Basalt-Faserbetons wurde eine Mittelwertkurve erstellt, die in Bild 38 zusammengefasst dargestellt sind. Die Mittelwertkurven der Serien, die bei 20 °C gelagert wurden, sind in Blautönen und die Serien, die bei 50 °C gelagert wurden, in Rottönen illustriert. Anhand dieser Darstellung ist festzustellen, dass die Serie B-20-28d, bis zu einer Durchbiegung von 4,0 mm, die größte Energieabsorptionsfähigkeit aufweist. Die weiteren Serien erreichen zum Ende der Prüfung ein vergleichbares Lastniveau. Dadurch lässt sich vermuten, dass die Abnahme der Leistungsfähigkeit der Fasern mit zunehmendem Alter und zusätzlich erhöhter Lagerungstemperatur von 50 °C scheinbar nicht linear zunimmt. Serie B-50-28d besitzt nach der Erstrissbildung das geringste Arbeitsvermögen. Dabei scheinen aber die Mittelwertkurven der Serien B-20-28d und B-50-28d parallel zueinander zu verlaufen. Das abweichende Lastniveau scheint konstant etwa 5 kN zu betragen. Diese Differenz kann bereits bei der erreichten Höchstlast bei Erstrissbildung verzeichnet werden. Das Verbundverhalten scheint somit im Probenalter von 28 Tagen vergleichbar zu sein, wird jedoch durch die Lagerung bei erhöhter Temperatur von 50 °C in der Höhe des abtragbaren Lastniveaus beeinflusst. Der Verbund zwischen Fasern und Betonmatrix scheint mit einem höheren Probenalter bei geringeren Durchbiegungen verbessert zu werden. Je älter die Proben bei der Prüfung waren, desto höhere Lasten konnten unmittelbar nach der Erstrissbildung abgetragen werden. An diesem Verhalten zeigt sich ein direkter Zusammenhang zwischen der Festigkeitsentwicklung des Betons und dem Verbundverhalten zwischen Fasern und Beton.

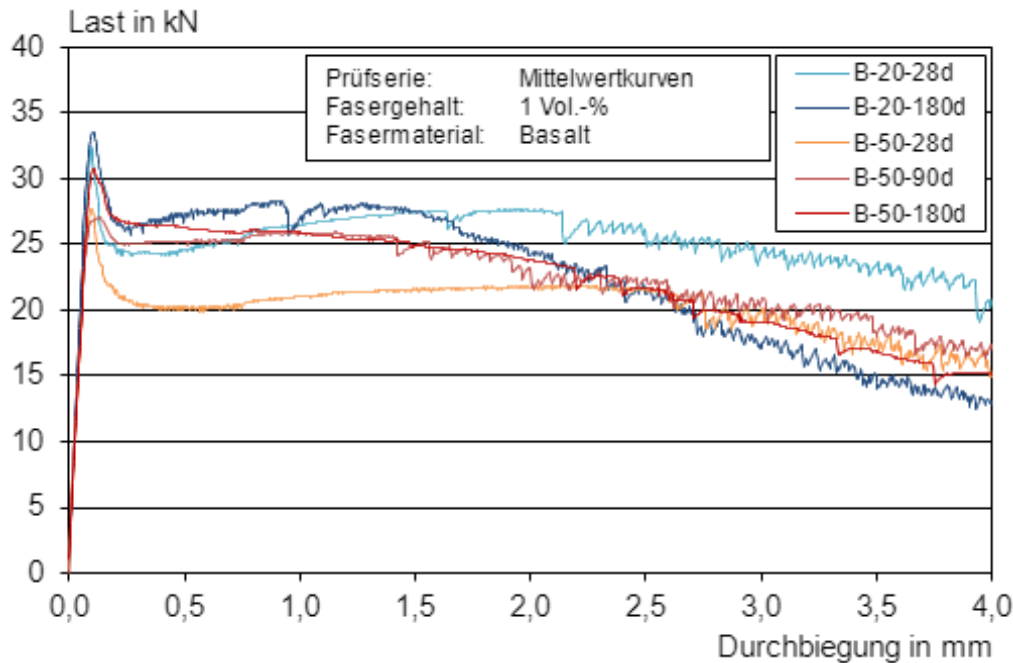


Bild 38: Last-Durchbiegungskurven der Mittelwerte der Prüfserien des Basalt-Faserbetons

Die zusätzlich bestimmten Biegezugfestigkeiten des Betons $f_{ct,fl}^f$ der einzelnen Proben, die anhand der ermittelten Höchstlast F_U berechnet werden konnten sind in den Tabellen der Einzelergebnisse (siehe Tabelle A68 bis Tabelle A70, Anhang A) mit aufgeführt. Dabei liegt die mittlere Biegezugfestigkeit der Serien, deren Proben im Wasserbecken bei 20 °C gelagert wurden auf einem vergleichbaren Niveau. Die mittleren Biegezugfestigkeiten der Serien, deren Proben im Wasserbecken bei 50 °C gelagert wurden sind im Vergleich etwas niedriger. Dabei liegen die Biegezugfestigkeiten der Serien mit einer Expositionsdauer von 28 und 90 Tagen in etwa auf demselben Niveau und die der Serie die für 180 Tage gelagert wurden, auf Grund des wesentlich höheren Probenalters, wiederum etwas höher. Die im Verhältnis zur 20 °C Lagerung geringere Betonfestigkeit der Proben der 50 °C Lagerung lässt sich mit hoher Wahrscheinlichkeit auf den „Crossover-Effect“ zurückführen.

In Bild 39 sind die mittleren Flächenanteile der beiden betrachteten Bemessungsstellen $D_{fl,I}^f$ und $D_{fl,II}^f$, welche das Arbeitsvermögen des Faserbetons widerspiegelt als Balkendiagramm mit zugehöriger Standardabweichung der einzelnen Prüfserien des Basalt-Faserbetons dargestellt.

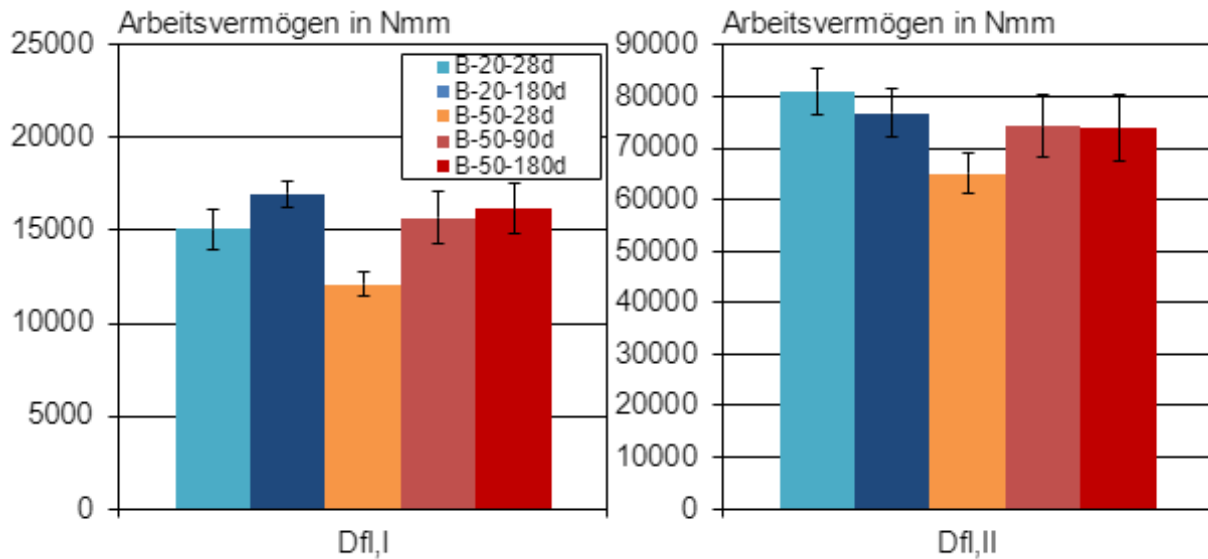


Bild 39: Balkendiagramm der mittleren Energieabsorptionsfähigkeit $D_{fI,I}$ und $D_{fI,II}$ der Faserbewehrung der Prüfserien des Basalt-Faserbetons mit zugehöriger Standardabweichung

Anhand dieser Darstellung wird deutlich, dass die Basaltfasern die größte Energieabsorptionsfähigkeit, nach der geringsten Beanspruchung ausgehend von der Lagerung, bei Serie B-20-28d aufweisen. Das Arbeitsvermögen nach 180 Tagen bei einer Lagerung von 20 °C liegt im Vergleich bei geringen Durchbiegungen etwas höher weist jedoch bei größeren Durchbiegungen, auf Grund der stärkeren Abnahme der aufnehmbaren Lasten, eine geringere Energieabsorptionsfähigkeit auf. Dabei handelt es sich jedoch um den relevanten Kennwert für die Tragfähigkeit. Des Weiteren fällt auf, dass die Energieabsorptionsfähigkeit der Fasern bei zunehmender Lagerungsdauer sowie bei erhöhter Lagerungstemperatur und damit verbunden stärkerer Beanspruchung, nicht weiter abnimmt. Die exakten Mittelwerte der Energieabsorptionsfähigkeit der einzelnen Serien, mit ihren zugehörigen prozentualen Änderungen in Bezug auf die Serie B-20-28d, sind dazu in Tabelle 20 aufgeführt. Dabei ist festzustellen, dass die Abnahmen der Energieabsorptionsfähigkeiten der Serien B-50-90d und B-50-180d in etwa auf einem Niveau liegen und insgesamt weniger als 10 % betragen. Die generelle Abnahme der Leistungsfähigkeit bei längerer Lagerungsdauer und zusätzlich erhöhter Lagerungstemperatur, weist auf eine Beeinträchtigung der Faserbewehrung durch das alkalische Milieu des Betons hin. Auf Grund des verbesserten Verbundes zwischen Fasern und Matrix mit zunehmendem Probenalter und damit verbunden steigender Betonfestigkeit, scheinen sich die Effekte aus der Abnahme der Leistungsfähigkeit und der Steigerung der abtragbaren Lasten auszugleichen, so dass die Energieabsorptionsfähigkeit der Faserbewehrung im betrachteten Zeitraum nicht unter 10 % ihrer ursprünglichen Leistungsfähigkeit sinkt.

Serie B-50-28d sticht auch bei der Betrachtung des ermittelten Arbeitsvermögens heraus. Da die bedeutende Abweichung jedoch auf das abweichende, anfängliche Verbundverhalten der Proben zurückzuführen ist, bei dem im Vergleich zu den anderen Serien ein geringeres

Lastniveau durch die Faserbewehrung abgetragen werden kann, wird auf diesen Unterschied an dieser Stelle nicht weiter eingegangen.

Tabelle 20: Mittelwerte der Energieabsorptionsfähigkeit $D_{fl,I}^f$ und $D_{fl,II}^f$ der Basaltfasern, ermittelt anhand der 4-Punkt-Biegezugprüfung, mit zugehöriger prozentualer Änderung in Bezug auf die Prüfserie B-20-28d

Serie	$D_{fl,I}^f$	Änderung	$D_{fl,II}^f$	Änderung
	Nmm	%	Nmm	%
B-20-28d	15.066	-	81.121	-
B-20-180d	16.971	+12,64	76.819	-5,30
B-50-28d	12.111	-19,61	65.102	-19,75
B-50-90d	15.658	+3,93	74.254	-8,47
B-50-180d	16.191	+7,47	73.796	-9,03

Die erzielten Ergebnisse bezüglich des Basalt-Faserbetons weisen auf Grund der Abnahme der Energieabsorptionsfähigkeit mit steigendem Alter und zusätzlich erhöhter Beanspruchung ausgehend von der Probenlagerung bei 50 °C, auf keine Beständigkeit der untersuchten Basaltfasern im alkalischen Milieu von Beton hin. Da sich jedoch ein Gleichgewichtszustand einzustellen und die Abnahme des Arbeitsvermögens nicht unter 10 % zu sinken scheint, könnte die Basaltfaser eventuell dennoch als dauerhaft bewertet werden.

4 Diskussion und Bewertung der Eignung der Versuche

4.1 Allgemeines

Im Folgenden wird die Eignung zur Bewertung der Dauerhaftigkeit des alkalischen Widerstandes der verschiedenen Fasermaterialien anhand der drei durchgeführten Versuchsverfahren diskutiert und abschließend bewertet.

4.2 Bewertung der Verfahren

Die zur Bewertung der Dauerhaftigkeit der Fasermaterialien durchgeführten Versuche sind in Tabelle 21 hinsichtlich ihrer grundsätzlichen Eignung kategorisiert. Die entsprechenden Bedeutungen sind der Legende unterhalb der Tabelle zu entnehmen.

Tabelle 21: Bewertung der untersuchten Fasermaterialien bezüglich ihrer Beständigkeit im alkalischen Milieu durch die verwendeten Prüfverfahren sowie Bewertung der Eignung des Prüfverfahrens bezüglich der Untersuchung der Dauerhaftigkeit von Polymerfasern im alkalischen Milieu

Fasermaterial	Restzugfestigkeit		SIC-Test		4-Punkt-Biegezugversuch	
	Beständig	geeignet	beständig	geeignet	beständig	geeignet
PP	✓	(✓)	✓	(✓)	✓	(✓)
PET	✓*	(✓)	✓*	(✓)	✗	✗
PA	✗*	(✓)	✗*	(✓)	✓	✗
Basalt	✗	(✓)	(✗)	(✓)	(✗)	(✓)

✓ beständig/geeignet

(✓) bedingt beständig/geeignet

✗ nicht beständig/nicht geeignet

(✗) bedingt nicht beständig/nicht geeignet

* überlagernder Einfluss aus veränderten Fasereigenschaften bei erhöhter Temperatur

Die PP-Fasern können durch alle drei verwendeten Prüfverfahren als beständig im alkalischen Milieu bewertet werden. Diese Bewertung stimmt mit den Erkenntnissen aus vorhergehenden Studien überein. Die PET-Fasern können durch Langfaser-Zugversuche anhand der Restzug- und SIC-Proben als beständig bewertet werden, weisen jedoch eine Beeinflussung der Fasereigenschaften bei erhöhter Temperatur in Form einer Verkürzung auf. Anhand der Ergebnisse der 4-Punkt-Biegezugversuche sind die untersuchten PET-Fasern als nicht dauerhaft zu bewerten. Bei den Untersuchungen der Restzug- und SIC-Proben der PA-Fasern konnte ebenfalls eine Veränderung der Fasereigenschaften bedingt durch die Lagerung bei erhöhter Temperatur, jedoch in Form einer Verfestigung, festgestellt werden. Zudem sind die Fasern im Rahmen dieser Prüfmethode als nicht beständig im alkalischen Milieu zu bewerten. Im Zuge der 4-Punkt-Biegezugversuche konnte hingegen keine Beeinträchtigung der Leistungsfähigkeit festgestellt werden, so dass die PA-Fasern als beständig im alkalischen Milieu bewertet werden können. Die untersuchten Basaltfasern zeigten bei allen Untersuchungen eine eindeutige Degradation und damit verbunden keine Beständigkeit im alkalischen Milieu. Dies entspricht ebenfalls den vorhergehenden Studien. Bei der Prüfmethode des SIC-Tests wird jedoch die Bewertungsgrenze gemäß /DIN18/ eingehalten und bei der 4-Punkt-Biegezugprüfung sinkt die Leistungsabnahme im betrachteten Zeitraum nicht unter 10 %, so dass die Basaltfasern bedingt, also zeitlich begrenzt, als dauerhaft im alkalischen Milieu bewertet werden können.

Die Untersuchung der Dauerhaftigkeitseigenschaften von Polymerfasern anhand der Prüfung der Restzugfestigkeit nach Lagerung in künstlicher Porenlösung in Verbindung mit der beschleunigten Alterung durch erhöhte Temperaturen, ist lediglich bedingt geeignet. Bereits bei Raumtemperatur laufen die Korrosionsprozesse nicht in realitätsgetreuer Geschwindigkeit ab. Dazu kommt die fehlende Datengrundlage bezüglich der Beschleunigung bei erhöhten Lagerungstemperaturen. Zuzüglich ist der Glasübergangstemperaturbereich der Fasermaterialien zu beachten, um eine Überlagerung der Effekte der Materialveränderungen bedingt durch die Lagerung bei erhöhten Temperaturen und in alkalischer Lösung zu

vermeiden. Zudem muss für jedes Fasermaterial zu Beginn eine geeignete Einspannmethode gefunden werden. Für die generelle Beurteilung der Beständigkeit von Fasermaterialien in einer alkalischen Umgebung, ohne Bezug zu einer zeitlichen Einordnung der Geschwindigkeit der ablaufenden Prozesse, ist dieser Versuch jedoch geeignet.

Die Untersuchung der Dauerhaftigkeitseigenschaften von Polymerfasern anhand des SIC-Tests ist ebenfalls lediglich bedingt geeignet. Für die Untersuchungen bei Raumtemperatur laufen die Degradationsprozesse in realitätsnaher Geschwindigkeit ab, da das umgebende alkalische Milieu dem späteren Anwendungsbereich entspricht. Doch für die Beurteilung der beschleunigten Alterung und Abschätzung des zeitlichen Rahmens in dem die Degradation abläuft, fehlt für die Bewertung von Polymerfasern die Datengrundlage. Die Geschwindigkeit und Art des ablaufenden Korrosionsprozesses ist nicht ohne weiteres von einem Material auf ein anderes übertragbar. Des Weiteren sollte auch bei der Lagerung der SIC-Proben auf den Glasübergangstemperaturbereich der zu untersuchenden Faser geachtet werden, um die Überlagerung von temperaturbedingten und die durch einen eventuellen alkalischen Angriff bedingten Änderungen des Fasermaterials zu verhindern. Zudem sollte bei zukünftiger Durchführung des SIC-Tests die Prüfgeschwindigkeit auf das zu untersuchende Fasermaterial abgestimmt werden, um den Einfluss aus dem Kriechverhalten der Fasern zu vermeiden und die Knetmasse sollte durch ein temperaturbeständiges Material ersetzt werden. Auch bei dieser Prüfmethode sollte eine geeignete Einspannmethode gewählt werden. Eventuell sollten zudem die Probekörperabmessungen angepasst werden, um weniger fragile Probekörper herstellen zu können, die weniger anfällig für präparationsbedingte Vorschädigungen sind. Unter Berücksichtigung dieser Einschränkungen kann eine generelle Beurteilung der Beständigkeit von Fasermaterialien in einer realitätsnahen alkalischen Umgebung in Echtzeit erfolgen. Für eine zeitliche Einordnung der Geschwindigkeit der ablaufenden Prozesse, bei der beschleunigten Alterung durch erhöhte Lagerungstemperaturen, fehlt derzeit die Datengrundlage.

Die Untersuchung der Dauerhaftigkeitseigenschaften von Polymerfasern anhand des 4-Punkt-Biegezugversuchs ist bei der hier untersuchten Versuchsdurchführung nicht geeignet. Für spezielle Anwendungsfälle, bei denen Fasermaterialien in biegezugbeanspruchten Bauteilen eingesetzt werden sollen, ist diese Prüfmethode bedingt geeignet. Diese Einteilung der Eignung des Prüfverfahrens wurde getroffen, da die zeitlichen Änderungen und Entwicklungen der Eigenschaften des umgebenden Betons maßgeblich die Ergebnisse der 4-Punkt-Biegezugprüfung beeinflussen. Aus diesem Grund kann eine eventuelle Degradation des Fasermaterials nicht eindeutig und unabhängig von überlagernden Einflüssen bestimmt und bewertet werden. Für den Anwendungsfall, dass Fasermaterialien als Bewehrung in einem biegezugbeanspruchten Bauteil eingesetzt werden sollen, bietet es sich an die Dauerhaftigkeit im alkalischen Milieu anhand des 4-Punkt-Biegezugversuchs durchzuführen, da die Randbedingungen der später einwirkenden Einflüsse und die Beanspruchung realitätsnah abgebildet werden können. Dafür sollten die untersuchten Fasern jedoch auch statisch wirksam sein, da sie fernerhin nicht für den Einsatz in biegezugbeanspruchten Bauteilen geeignet sind. Für die Beurteilung der Beständigkeit im alkalischen Milieu könnten daraufhin ebenfalls die Kriterien gemäß /DIB05/, anhand derer die statische Wirksamkeit der Fasern

bewertet wird, herangezogen werden. Sofern die Abnahme der Leistungsfähigkeit der Fasern nach langzeitiger Lagerung nicht weiter abfällt, als dass die Faser nicht mehr als statisch wirksam bewertet werden kann, so ist sie ebenfalls als dauerhaft im alkalischen Milieu zu bewerten. Zudem könnte eine zusätzliche Begrenzung des, in diesem Rahmen einzuhaltenden, maximal zulässigen Leistungsabfalls getroffen werden. In Anlehnung an die Bewertung des SIC-Tests könnte in diesem Fall ebenfalls 80 % der ursprünglichen Leistungsfähigkeit der Faserbewehrung als Bewertungsgrenze verwendet werden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass eine alternative Betonzusammensetzung abweichende Festigkeitseigenschaften besitzt. Auch die zeitlich und thermisch bedingte Festigkeitsentwicklung und Änderungen in der Bildung der Interphase haben einen Einfluss auf die Versuchsergebnisse. Zudem sollte auf eine beschleunigte Alterung durch Lagerung bei erhöhten Temperaturen verzichtet werden, da die Einflüsse auf die Festigkeitsentwicklung des Betons und den Verbund zwischen Faser und Matrix die Beschleunigung der Degradationsprozesse der Fasern überwiegen. Daraus resultieren jedoch lange Lagerungszeiten um die Dauerhaftigkeitseigenschaften der Fasermaterialien beurteilen zu können. Des Weiteren fehlt auch für diese Untersuchungen die notwendige Datengrundlage, um eine mögliche beschleunigte Alterung in einen zeitlichen Kontext stellen zu können.

Abschließend kann zusammengefasst werden, dass eine beschleunigte Alterung nur dann sinnvoll ist, wenn durch die temperierte Lagerung keine weiteren Materialeigenschaften, weder des Fasermaterials noch des Betons oder eines weiteren Bestandteils der Probekörper, beeinflusst wird und so eine Überlagerung von verschiedenen Effekten stattfindet. Dazu sollte zum Beispiel die maximale Lagerungstemperatur etwa 30 % unterhalb des Glasübergangsbereichs des Fasermaterials liegen. Bei den Balken für die 4-Punkt-Biegezugprüfung sollte vollständig auf die temperierte Lagerung verzichtet, oder erst bei Erreichung einer ausreichenden Festigkeit des Betons, wenn keine signifikantes weiteres Wachstum der Festigkeit des Betons mehr zu erwarten ist, mit der temperierten Lagerung begonnen werden, um die Einflüsse des „Crossover-Effects“ zu minimieren. Zudem ist die beschleunigte Alterung nicht sinnvoll, sofern noch keine Datengrundlage bezüglich der Beschleunigung der Korrosionsprozesse bei bestimmter Lagerungstemperatur und –dauer existiert.

i. A.

i. A.

Dr.-Ing. Cynthia Morales Cruz
(Institutsleitung)

Fabian Thems, M. Sc.
(Sachbearbeiter)

5 Literatur

- /DAf12/ Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: DAfStb-Richtlinie „Stahlfaserbeton“ - Ausgabe: November 2012.
- /DBV01/ Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e. V.: DBV-Merkblatt Stahlfaserbeton, Fassung 2001.
- /DIA19/ DIAMANT The Metal-Polymer Company DIAMANT The Metal-Polymer Company: MM1018-FL-1866-DE. Technisches Datenblatt, 2019.
- /DIB05/ DIBt, Deutsches Institut für Bautechnik DIBt, Deutsches Institut für Bautechnik: Zulassungs- und Überwachungsgrundsätze Faserprodukte als Betonzusatzstoff. Schriften des Deutschen Instituts für Bautechnik, 2005.
- /DIN01/ DIN EN 206-1:2001-07: Beton - Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206-1:2000. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2001.
- /DIN05/ DIN EN 14649:2005-07, Vorgefertigte Betonerzeugnisse_- Prüfverfahren zur Bestimmung der Beständigkeit von Glasfasern in Beton (SIC-Prüfung); Deutsche Fassung EN_14649:2005. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- /DIN06/ DIN EN 14889-1:2006-11, Fasern für Beton - Teil 1: Stahlfasern - Begriffe, Festlegungen und Konformität; Deutsche Fassung EN 14889-1:2006.
- /DIN08/ DIN 1045-2:2008-08, Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton_- Teil_2: Beton_- Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität_- Anwendungsregeln zu DIN_EN_206-1. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- /DIN11/ DIN EN 197-1:2011-11, Zement - Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement; Deutsche Fassung EN_197-1:2011. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- /DIN16/ DIN EN 196-1:2016-11, Prüfverfahren für Zement_- Teil_1: Bestimmung der Festigkeit; Deutsche Fassung EN_196-1:2016. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- /DIN18/ DIN EN 14889-2:2018-09, Fasern für Beton_- Teil_2: Polymerfasern_- Begriffe, Festlegungen und Konformität; Deutsche und Englische Fassung prEN_14889-2:2018. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- /DIN19a/ DIN EN 12390-5:2019-10, Prüfung von Festbeton - Teil 5: Biegezugfestigkeit von Probekörpern; Deutsche Fassung EN 12390-5:2019, 2019.
- /DIN19b/ DIN 51007:2019-04, Thermische Analyse (TA) – Differenz-Thermoanalyse (DTA) und Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC) – Allgemeine Grundlagen. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- /DIN19c/ DIN EN 12390-2:2019-10, Prüfung von Festbeton - Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen; Deutsche Fassung EN 12390-2:2019, 2019.

- /DIN19d/ DIN EN 12390-3:2019-10, Prüfung von Festbeton_ - Teil_3: Druckfestigkeit von Probekörpern; Deutsche Fassung EN_12390-3:2019. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- /DIN21/ DIN EN ISO 5079:2021-02, Textilfasern - Bestimmung der Höchstzugkraft und Höchstzugkraftdehnung an einzelnen Fasern (ISO 5079:2020); Deutsche Fassung EN ISO 5079:2020, 2021.
- /Enn22/ Enneatech. Engineering Polymers: Technisches Datenblatt: ENNEAFIL Macro-B 60, 2022.
- /fib12/ fib: Model Code 2010. Final draft. International Federation for Structural Concrete, Lausanne, 2012.
- /Mas20/ Master Builder Solutions Master Builder Solutions: MasterFiber 255 SPA. High-Performance Polypropylen-Makrofaser gemäß DIN EN 14889-2. Technisches Datenblatt, 2020.
- /Pro82/ Proctor, B. A.; Oakley, D. R.; Litherland, K. L.: Developments in the assessment and performance of grc over 10 years. In Composites, 1982, 13; S. 173–179.

Anhang A – Tabellen

Tabelle A1: Mischungszusammensetzung des Basalt-Faserbetons

Ausgangsstoffe	Gehalt	Vol.-Gehalt
	kg/m ³	[%]
CEM I 32,5 R	360,0	11,6
Wasser	180,0	18,0
Gesteinskörnung	1.772,6	67,4
Basaltfasern	19,6	1,0
Luft	-	2,0
Summe:	2332,0	100,0

Tabelle A2: Mischungszusammensetzung des PA-Faserbetons

Ausgangsstoffe	Gehalt	Vol.-Gehalt
	kg/m ³	[%]
CEM I 32,5 R	360,0	11,6
Wasser	180,0	18,0
Gesteinskörnung	1.772,6	67,4
PA-Fasern	11,1	1,0
Luft	-	2,0
Summe:	2324,0	100,0

Tabelle A3: Mischungszusammensetzung des PET-Faserbetons

Ausgangsstoffe	Gehalt	Vol.-Gehalt
	kg/m ³	[%]
CEM I 32,5 R	360,0	11,6
Wasser	180,0	180,0
Gesteinskörnung	1.781,0	67,7
PET-Fasern	9,0	0,7
Luft	-	2,0
Summe:	2330,0	100,0

Tabelle A4: Mischungszusammensetzung des PP-Faserbetons

Ausgangsstoffe	Gehalt	Vol.-Gehalt
	kg/m ³	[%]
CEM I 32,5 R	360,0	11,6
Wasser	180,0	18,0
Gesteinskörnung	1.772,6	67,4
PP-Fasern	9,0	1,0
Luft	-	2,0
Summe:	2322,0	100,0

Tabelle A5: Frischbetonprüfungen der Faserbetonserien

Serie	Frischbeton -temperatur	Frischbeton -rohdichte	Luftgehalt	Ausbreitmaß ohne Fasern		Ausbreitmaß mit Fasern	
	°C	kg/dm ³	%	mm			
B-20-28d	24,5	2,36	1,6	550	525	370	380
B-50-28d	22,7	2,37	1,4	545	525	390	380
B-50-90d	23,0	2,37	1,3	510	535	375	375
B-20-180d	21,4	2,37	1,2	485	470	360	360
B-50-180d	21,4	2,38	1,2	520	510	375	370
PA-20-28d	23,1	2,34	1,4	460	445	350	370
PA-20-90d*	22,3	2,36	1,7	460	450	375	380
PA-20-180d	23,8	2,35	1,5	470	470	360	360
PA-50-180d	23,4	2,35	1,5	470	470	360	350
PET-20-28d*	24,7	2,36	1,8	450	450	355	355
PET-50-28d*	25,1	2,36	1,6	450	440	375	350
PET-20-28d-neu	23,5	2,34	1,7	440	445	320	340
PET-50-28d-neu	25,2	2,35	1,4	460	430	350	360
PET-20-180d	22,5	2,37	1,6	435	440	350	340
PET-50-180d*	21,8	2,36	1,3	450	445	380	385
PP-20-28d*	23,8	2,34	1,5	495	490	400	400
PP-50-28d*	21,5	2,35	1,6	450	440	350	370
PP-20-180d*	24,2	2,34	1,4	490	490	410	410
PP-50-180d*	21,3	2,34	1,6	445	425	360	350
PP-20-28d-neu	24,5	2,35	2,0	410	410	350	340
PP-50-28d-neu	25,4	2,34	1,4	440	435	360	375

Tabelle A6: Übersicht über die Prüfmatrix der SIC- und Restzugfestigkeitsprüfungen

°C	0 d	4 d	7 d	14 d	28 d	90 d
20	X X X X	-	-	-	X X	X X X X
40	-	X	x x X X	x X	X X	x X
60	-	X	x X	x X X	x X X X	X
80	-	X X	-	x X	X X	X X X X

X = PP-Fasern, X = PET-Fasern, X = PA-Fasern, X = Basaltfasern (mittels Minitab bestimmt)
zusätzlich durchgeführte Serien mit x, x, x, x gekennzeichnet

Tabelle A7: Übersicht über die Prüfmatrix der 4-Punkt-Biegezugprüfungen

°C	7 d	28 d	90 d	180 d
20	-	Xx Xx X X	X	X X X X
50	-	xx Xx X	X	X X X X

X = PP-Fasern, X = PET-Fasern, X = PA-Fasern, X = Basaltfasern (mittels Minitab bestimmt)
zusätzlich durchgeführte Serien mit x, x, x, x gekennzeichnet

Tabelle A8: Prüfergebnisse der einzelnen Restzugproben der Referenzserie der PP-Fasern

Serie	Höchst- last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
PP-RZ-20-0d	191,90	508,5	497,1	16,83	3,39
	191,82	508,3			
	180,81	479,1			
	194,86	507,9			
	191,00	497,9			
	191,80	500,0			
	193,17	503,8			
	187,14	488,1			
	189,80	495,0			
	187,34	454,3			
	212,93	516,4			
	208,66	506,1			

Tabelle A9: Prüfergebnisse der einzelnen Restzugproben der weiteren Prüfserien der PP-Fasern

Serie	Höchst- last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
PP-RZ-20-90d	189,30	480,9	488,7	18,45	3,77
	187,63	476,7			
	177,00	449,7			
	182,52	471,0			
	194,11	500,9			
	195,71	505,0			
	195,93	493,8			
	198,13	499,3			
	193,23	487,0			
	202,62	519,7			
	194,84	499,8			
	187,47	480,8			

Tabelle A10: Prüfergebnisse der einzelnen Restzugproben der weiteren Prüfserien der PP-Fasern (Fortsetzung 1)

Serie	Höchst- last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
PP-RZ-40-7d	192,97	499,1	515,7	16,67	3,23
	201,31	520,7			
	199,36	529,3			
	200,71	532,9			
	206,71	548,9			
	194,62	497,9			
	201,84	516,4			
	201,89	516,5			
	197,76	496,0			
	208,75	523,5			
	203,65	510,7			
	197,43	496,2			
PP-RZ-40-14d	208,86	509,5	503,8	10,09	2,00
	207,02	505,0			
	199,41	486,4			
	199,97	508,4			
	194,73	495,1			
	192,52	489,5			
	196,25	505,4			
	192,38	495,4			
	201,88	519,9			
	194,69	513,4			
	192,23	506,9			
	193,65	510,7			

Tabelle A11: Prüfergebnisse der einzelnen Restzugproben der weiteren Prüfserien der PP-Fasern (Fortsetzung 2)

Serie	Höchst- last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
PP-RZ-40-90d	214,79	528,3	518,2	10,64	2,05
	209,31	514,9			
	202,59	498,3			
	206,51	519,2			
	209,90	527,7			
	205,44	516,5			
	201,85	516,6			
	202,02	517,1			
	209,80	536,9			
	213,17	527,0			
	205,34	507,6			
	205,62	508,3			
PP-RZ-60-14d	203,86	517,0	515,1	18,10	3,51
	182,54	462,9			
	203,70	516,5			
	221,58	532,5			
	214,09	514,5			
	212,35	510,3			
	209,37	529,3			
	209,74	530,3			
	203,52	514,6			
	202,33	524,8			
	197,11	511,3			
	199,20	516,7			

Tabelle A12: Prüfergebnisse der einzelnen Restzugproben der weiteren Prüfserien der PP-Fasern (Fortsetzung 3)

Serie	Höchst- last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
PP-RZ-60-28d	192,32	507,3	512,1	18,97	3,70
	187,20	493,8			
	194,14	512,1			
	211,34	539,8			
	198,30	506,5			
	211,57	540,4			
	194,55	483,6			
	200,39	498,2			
	201,86	501,8			
	193,63	502,6			
	207,74	539,2			
	200,33	520,0			
PP-RZ-60-90d	214,99	527,8	533,4	8,70	1,63
	216,61	531,7			
	216,97	532,6			
	199,73	523,3			
	203,23	532,4			
	203,31	532,7			
	208,33	538,8			
	211,46	546,9			
	199,38	515,7			
	212,19	539,5			
	214,26	544,7			
	210,41	534,9			

Tabelle A13: Prüfergebnisse der einzelnen Restzugproben der weiteren Prüfserien der PP-Fasern (Fortsetzung 4)

Serie	Höchst- last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
PP-RZ-80-4d	194,86	508,8	501,3	17,05	3,40
	200,96	494,1			
	199,90	491,5			
	201,60	495,7			
	192,76	497,7			
	193,66	500,0			
	205,17	529,7			
	191,91	466,7			
	214,60	521,8			
	207,11	503,6			
	197,76	486,8			
	210,73	518,7			
PP-RZ-80-14d	189,80	497,7	523,0	14,36	2,75
	196,43	515,0			
	195,31	512,1			
	216,53	539,7			
	209,39	521,8			
	214,86	535,5			
	198,39	526,4			
	203,44	539,8			
	191,96	509,3			
	213,39	544,1			
	201,69	514,3			
	203,99	520,1			

Tabelle A14: Prüfergebnisse der einzelnen Restzugproben der weiteren Prüfserien der PP-Fasern (Fortsetzung 5)

Serie	Höchst- last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
PP-RZ-80-90d	206,14	530,0	511,2	16,36	3,20
	202,93	515,5			
	207,74	527,7			
	192,95	490,2			
	191,68	489,1			
	195,57	499,0			
	205,80	525,1			
	207,99	513,8			
	199,97	494,0			
	201,22	497,1			
	200,19	532,0			
	195,95	520,7			

Tabelle A15: Prüfergebnisse der einzelnen SIC-Proben der Referenzserie der PP-Fasern

Serie	Höchst- last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
PP-SIC-20-0d	203,05	527,8	532,2	20,83	3,91
	203,81	529,8			
	209,55	555,7			
	202,60	537,3			
	205,73	545,6			
	213,97	567,5			
	209,77	556,3			
	200,09	514,8			
	196,18	504,7			
	203,37	523,2			
	202,99	522,2			
	195,01	501,7			

Tabelle A16: Prüfergebnisse der einzelnen SIC-Proben der weiteren Prüfserien der PP-Fasern

Serie	Höchst- last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
PP-SIC-20- 90d	204,86	527,1	530,7	13,47	2,54
	207,15	533,0			
	206,64	531,7			
	208,43	532,4			
	202,49	517,3			
	210,41	537,5			
	204,16	521,5			
	195,44	499,3			
	209,87	539,6			
	212,97	547,6			
	213,16	548,0			
	207,63	533,8			

Tabelle A17: Prüfergebnisse der einzelnen SIC-Proben der weiteren Prüfserien der PP-Fasern (Fortsetzung 1)

Serie	Höchst- last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
PP-SIC-40-7d	213,11	518,2	505,6	11,51	2,28
	214,75	522,2			
	210,43	511,7			
	203,05	493,8			
	205,00	498,5			
	199,72	510,3			
	200,01	511,0			
	202,98	518,6			
	209,23	503,0			
	202,48	486,8			
	208,23	500,6			
	204,65	492,0			
PP-SIC-40- 14d	209,02	513,9	523,2	9,84	1,88
	204,43	502,6			
	213,02	523,7			
	211,57	520,2			
	220,41	541,9			
	203,87	524,1			
	202,70	521,1			
	208,18	535,2			
	204,87	526,7			
	204,21	525,0			
	211,98	525,9			
	208,85	518,1			

Tabelle A18: Prüfergebnisse der einzelnen SIC-Proben der weiteren Prüfserien der PP-Fasern (Fortsetzung 2)

Serie	Höchst- last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
PP-SIC-40- 90d	213,02	512,1	536,5	18,63	3,47
	221,17	540,0			
	216,04	527,5			
	218,08	532,4			
	216,26	528,0			
	212,75	519,4			
	220,75	569,3			
	213,49	550,5			
	217,04	559,7			
	210,49	542,8			
	212,56	548,1			
	207,74	508,8			
PP-SIC-60- 14d	212,20	535,9	524,0	16,42	3,13
	209,09	528,1			
	205,83	519,8			
	210,87	532,6			
	211,43	534,0			
	216,80	524,6			
	212,32	513,8			
	222,21	537,7			
	213,53	516,7			
	212,57	514,4			
	219,59	546,6			
	194,11	483,2			

Tabelle A19: Prüfergebnisse der einzelnen SIC-Proben der weiteren Prüfserien der PP-Fasern (Fortsetzung 3)

Serie	Höchst- last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
PP-SIC-60- 28d	201,04	496,1	523,1	23,18	4,43
	213,08	525,9			
	199,71	492,9			
	198,02	488,7			
	209,18	516,2			
	213,74	534,5			
	220,30	550,9			
	218,54	546,5			
	212,68	531,9			
	222,59	556,7			
	214,77	530,9			
	204,48	505,5			
PP-SIC-60- 90d	194,37	511,1	530,2	14,42	3,29
	209,81	551,7			
	212,37	558,4			
	194,82	512,3			
	198,92	516,6			
	208,62	541,8			
	202,79	526,7			
	205,07	532,6			
	213,53	554,6			
	213,32	512,7			
	218,72	525,6			
	215,82	518,6			

Tabelle A20: Prüfergebnisse der einzelnen SIC-Proben der weiteren Prüfserien der PP-Fasern (Fortsetzung 4)

Serie	Höchst- last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
PP-SIC-80-4d	190,10	500,3	517,7	10,55	2,04
	212,85	511,7			
	203,39	526,9			
	201,39	521,7			
	200,30	518,9			
	199,69	517,3			
	198,44	514,1			
	193,32	525,3			
	196,45	533,8			
	194,58	528,7			
	188,83	513,1			
	184,08	500,2			
PP-SIC-80- 14d	210,21	519,7	515,8	13,83	2,68
	206,08	509,5			
	195,89	484,3			
	207,14	527,2			
	196,67	500,5			
	208,87	531,6			
	199,00	506,5			
	207,12	527,1			
	211,62	526,2			
	210,82	524,2			
	205,79	511,7			
	209,72	521,5			

Tabelle A21: Prüfergebnisse der einzelnen SIC-Proben der weiteren Prüfserien der PP-Fasern (Fortsetzung 5)

Serie	Höchst- last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
PP-SIC-80- 90d	189,72	506,8	515,8	14,07	2,73
	197,27	526,9			
	192,94	515,4			
	188,87	504,5			
	197,13	526,6			
	195,47	520,4			
	187,97	500,5			
	201,95	537,7			
	199,91	532,2			
	-	-			
	192,01	494,1			
	197,57	508,4			

Tabelle A22: Prüfergebnisse der einzelnen Restzugproben der Referenzserie der PET-Fasern

Serie	Höchst- last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
PET-RZ-20-0d	209,40	538,5	533,6	19,58	3,67
	220,47	567,0			
	199,53	513,1			
	214,36	556,6			
	216,86	555,6			
	204,03	522,7			
	203,29	515,5			
	207,64	526,5			
	201,47	510,9			
	205,89	520,6			
	214,66	542,8			
	-	-			

Tabelle A23: Prüfergebnisse der einzelnen Restzugproben der weiteren Prüfserien der PET-Fasern

Serie	Höchst -last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
PET-RZ-20-28d	216,41	552,8	550,0	17,48	3,18
	224,37	573,1			
	209,41	534,9			
	212,20	540,5			
	221,51	564,2			
	206,08	524,9			
	225,52	558,0			
	208,90	516,9			
	221,75	548,7			
	223,95	559,9			
	223,28	558,2			
	227,36	568,4			
PET-RZ-20-90d	218,64	567,7	557,7	19,74	3,54
	213,53	554,9			
	206,25	536,0			
	204,30	536,0			
	220,85	579,5			
	213,33	559,7			
	225,79	593,6			
	220,38	579,4			
	210,01	552,1			
	218,51	561,8			
	209,48	538,6			
	207,43	533,3			

Tabelle A24: Prüfergebnisse der einzelnen Restzugproben der weiteren Prüfserien der PET-Fasern (Fortsetzung 1)

Serie	Höchst -last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
PET-RZ-40-4d	192,79	494,3	526,6	17,50	3,32
	205,74	527,5			
	198,49	508,9			
	203,72	514,2			
	206,69	521,7			
	216,41	546,2			
	216,06	548,5			
	214,29	545,4			
	204,98	521,7			
	202,77	516,1			
	213,33	548,6			
	213,13	525,7			
PET-RZ-40-7d	218,86	547,5	532,4	23,69	4,45
	206,98	517,7			
	218,25	545,9			
	192,50	487,0			
	204,87	518,3			
	220,57	558,3			
	199,74	516,5			
	208,87	540,1			
	211,91	548,0			
	-	-			
	218,02	565,5			
	197,36	511,9			

Tabelle A25: Prüfergebnisse der einzelnen Restzugproben der weiteren Prüfserien der PET-Fasern (Fortsetzung 2)

Serie	Höchst -last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
PET-RZ-40-28d	203,81	506,7	527,6	22,94	4,35
	211,60	526,1			
	-	-			
	209,28	514,0			
	-	-			
	217,91	535,2			
	190,97	477,6			
	214,30	535,9			
	218,76	547,1			
	211,04	542,6			
	207,68	534,0			
	216,46	556,6			
PET-RZ-60-4d	214,99	552,8	537,2	18,39	3,42
	208,60	514,5			
	219,48	541,3			
	213,00	542,0			
	220,53	553,8			
	208,71	523,8			
	215,38	540,5			
	-	-			
	221,72	565,9			
	196,54	501,6			
	207,13	532,3			
	210,51	541,0			

Tabelle A26: Prüfergebnisse der einzelnen Restzugproben der weiteren Prüfserien der PET-Fasern (Fortsetzung 3)

Serie	Höchst -last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
PET-RZ-60-7d	209,14	541,1	541,7	12,9	2,37
	214,84	555,8			
	212,24	549,1			
	214,03	537,0			
	204,92	514,1			
	191,02*	479,3*			
	209,93	542,3			
	205,24	530,2			
	207,90	537,1			
	215,02	551,9			
	210,16	539,4			
	218,35	560,5			
PET-RZ-60-14d	212,85	532,3	542,6	20,15	3,71
	212,87	532,3			
	217,81	544,7			
	202,41	517,2			
	225,66	576,6			
	212,81	540,2			
	216,79	550,3			
	200,22	514,9			
	226,96	570,6			
	-	-			
	-	-			
	215,00	547,1			

* Ausreißer nach Grubbs in hellgrau gekennzeichnet

Tabelle A27: Prüfergebnisse der einzelnen Restzugproben der weiteren Prüfserien der PET-Fasern (Fortsetzung 4)

Serie	Höchst -last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
PET-RZ-60-28d	205,53	534,1	557,9	10,55	1,89
	220,98	565,1			
	-	-			
	215,17	550,2			
	217,15	564,3			
	217,60	565,5			
	216,05	554,5			
	219,26	562,7			
	189,57*	486,6*			
	211,25	551,0			
	216,04	563,5			
	217,97	568,6			
PET-RZ-80-28d	192,51	484,9	535,3	20,26	3,79
	-	-			
	203,11	511,6			
	209,99	534,6			
	211,15	540,3			
	210,68	539,2			
	218,35	558,8			
	208,66	548,6			
	205,27	539,7			
	207,01	544,2			
	207,02	541,6			
	208,29	544,9			

* Ausreißer nach Grubbs in hellgrau gekennzeichnet

Tabelle A28: Prüfergebnisse der einzelnen Restzugproben der weiteren Prüfserien der PET-Fasern (Fortsetzung 5)

Serie	Höchst- last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
PET-RZ-80-90d	187,76	478,2	472,6	14,66	3,10
	188,25	479,4			
	186,81	475,8			
	185,29	475,1			
	-	-			
	192,13	492,7			
	187,94	492,6			
	177,17	464,4			
	173,24	454,1			
	172,87	443,7			
	183,35	470,6			
	183,72	471,5			

Tabelle A29: Prüfergebnisse der einzelnen SIC-Proben der Referenzserie der PET-Fasern

Serie	Höchst- last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
PET-SIC-20-0d	205,99	527,7	559,8	30,05	5,37
	242,60	621,5			
	227,63	583,1			
	212,81	542,5			
	221,90	565,7			
	207,09	528,0			
	208,28	531,0			
	235,03	599,2			
	207,47	532,5			
	216,93	556,8			
	218,69	561,3			
	221,42	568,3			

Tabelle A30: Prüfergebnisse der einzelnen SIC-Proben der weiteren Prüfserien der PET-Fasern

Serie	Höchst -last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
PET-SIC-20- 28d	226,42	577,8	565,6	27,76	4,91
	215,11	549,0			
	225,43	575,3			
	218,24	556,9			
	207,42	529,3			
	238,96	617,4			
	199,77	514,1			
	219,96	566,1			
	213,87	550,4			
	224,81	578,6			
	228,67	588,5			
	227,25	583,3			
PET-SIC-20- 90d	208,74	544,1	544,0	21,16	3,89
	195,33	509,1			
	200,85	523,5			
	205,74	533,1			
	221,64	574,3			
	216,72	561,6			
	210,75	546,1			
	217,73	563,7			
	216,61	560,8			
	209,56	542,5			
	215,35	557,5			
	197,40	511,1			

Tabelle A31: Prüfergebnisse der einzelnen SIC-Proben der weiteren Prüfserien der PET-Fasern (Fortsetzung 1)

Serie	Höchst- last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
PET-SIC-40-4d	215,05	518,3	542,2	23,95	4,42
	232,96	578,7			
	219,72	553,4			
	205,70	518,1			
	218,35	538,4			
	203,05	500,6			
	221,07	545,1			
	214,02	527,7			
	223,03	567,1			
	220,53	560,7			
	218,78	556,3			
	171,53*	436,2*			
PET-SIC-40-7d	202,87	517,7	550,3	38,43	6,98
	211,40	539,5			
	210,00	535,9			
	195,18	498,1			
	191,26	492,4			
	215,60	555,1			
	211,17	544,2			
	214,26	552,2			
	223,87	576,9			
	224,92	579,6			
	225,74	583,8			
	242,83	628,0			

* Ausreißer nach Grubbs in hellgrau gekennzeichnet

Tabelle A32: Prüfergebnisse der einzelnen SIC-Proben der weiteren Prüfserien der PET-Fasern (Fortsetzung 2)

Serie	Höchst -last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
PET-SIC-40- 28d	198,43	510,3	542,1	22,49	4,15
	203,32	522,8			
	218,39	561,6			
	219,27	563,8			
	208,27	538,1			
	192,77	498,1			
	216,54	559,5			
	207,24	535,5			
	218,70	563,9			
	218,11	562,4			
	214,24	552,4			
	208,03	536,4			
PET-SIC-60-4d	227,52	550,9	538,3	21,56	4,01
	222,45	538,6			
	221,54	538,3			
	217,81	529,3			
	223,19	542,3			
	209,98	510,3			
	216,70	546,6			
	228,36	567,3			
	213,31	529,9			
	229,32	569,7			
	195,63	492,7			
	216,03	544,1			

Tabelle A33: Prüfergebnisse der einzelnen SIC-Proben der weiteren Prüfserien der PET-Fasern (Fortsetzung 3)

Serie	Höchst -last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
PET-SIC-60-7d	220,96	568,9	550,1	24,82	4,51
	215,46	554,8			
	238,07	604,9			
	209,95	533,5			
	212,75	540,6			
	216,68	550,6			
	-	-			
	209,51	541,8			
	208,32	535,8			
	202,20	520,0			
	-	-			
	-	-			
PET-SIC-60- 14d	207,77	503,1	514,8	18,98	3,69
	212,27	514,0			
	210,70	507,8			
	216,48	521,7			
	198,08	477,4			
	204,42	509,9			
	210,00	523,8			
	204,04	509,0			
	216,85	540,9			
	217,38	548,3			
	207,83	524,2			
	197,28	497,6			

Tabelle A34: Prüfergebnisse der einzelnen SIC-Proben der weiteren Prüfserien der PET-Fasern (Fortsetzung 4)

Serie	Höchst- last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
PET-SIC-60- 28d	201,55	525,3	500,2	15,32	3,06
	187,54	488,8			
	198,05	516,2			
	187,79	489,4			
	191,40	493,6			
	203,34	524,4			
	197,53	509,4			
	187,54	483,6			
	196,81	504,2			
	188,29	482,3			
	191,29	490,0			
	193,28	495,1			
PET-SIC-80- 28d	159,45	411,9	398,6	14,93	3,75
	154,23	398,5			
	153,32	396,8			
	152,59	394,9			
	155,41	402,2			
	162,63	420,9			
	109,97*	284,6*			
	140,03	360,3			
	156,98	403,9			
	155,96	401,3			
	153,04	393,8			
	155,34	399,7			

* Ausreißer nach Grubbs in hellgrau gekennzeichnet

Tabelle A35: Prüfergebnisse der einzelnen SIC-Proben der weiteren Prüfserien der PET-Fasern (Fortsetzung 5)

Serie	Höchst- last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
PET-SIC-80- 90d	40,33	104,3	107,7	43,29	40,18
	37,63	97,3			
	64,12	165,8			
	78,76	203,7			
	34,45	89,1			
	53,28	136,1			
	32,68	83,5			
	33,01	84,3			
	24,03	61,4			
	33,28	85,0			
	29,16	74,7			
	-	-			

Tabelle A36: Prüfergebnisse der einzelnen Restzugproben der Referenzserie der PA-Fasern

Serie	Höchst- last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
PA-RZ-20-0d	169,60	382,8	396,3	9,43	2,38
	182,66	412,2			
	171,15	386,2			
	172,17	388,5			
	165,53	389,9			
	171,01	402,8			
	168,52	396,9			
	166,33	391,8			
	171,91	400,0			
	175,82	409,1			
	173,80	404,4			
	167,89	390,7			

Tabelle A37: Prüfergebnisse der einzelnen Restzugproben der weiteren Prüfserien der PA-Fasern

Serie	Höchst- last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
PA-RZ-20-90d	96,84	227,3	229,5	19,16	8,35
	98,94	232,3			
	99,95	234,6			
	102,60	240,9			
	106,69	247,0			
	108,65	251,5			
	108,58	251,3			
	90,82	210,2			
	91,55	208,1			
	106,69	242,5			
	84,14	191,2			
	95,76	217,6			
PA-RZ-40-7d	87,73	208,7	286,8	33,77	11,77
	115,29	274,3			
	129,12	307,2			
	134,94	309,7			
	135,82	311,7			
	117,70	270,1			
	127,65	293,0			
	104,39	239,6			
	138,87	313,1			
	143,02	322,5			
	129,28	291,5			
	133,38	300,8			

Tabelle A38: Prüfergebnisse der einzelnen Restzugproben der weiteren Prüfserien der PA-Fasern (Fortsetzung 1)

Serie	Höchst- last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
PA-RZ-40-14d	75,63	172,6	258,0	40,78	15,80
	91,58	208,9			
	113,74	248,4			
	103,57	226,2			
	114,13	249,3			
	130,72	285,5			
	122,58	267,3			
	115,42	276,3			
	116,50	278,9			
	129,43	309,8			
	131,07	313,7			
	108,21	259,0			
PA-RZ-40-90d	103,27	237,20	245,0	17,43	7,12
	99,95	229,6			
	113,31	260,3			
	124,36	285,7			
	105,02	246,1			
	104,78	245,5			
	110,15	258,1			
	99,71	233,6			
	104,66	232,7			
	114,89	255,5			
	102,75	228,5			
	102,11	227,1			

Tabelle A39: Prüfergebnisse der einzelnen Restzugproben der weiteren Prüfserien der PA-Fasern (Fortsetzung 2)

Serie	Höchst- last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
PA-RZ-60-14d	139,21	334,4	320,8	13,33	4,16
	134,48	323,1			
	135,08	324,5			
	139,28	334,6			
	130,59	313,7			
	129,57	310,7			
	127,72	306,3			
	139,04	333,5			
	139,84	335,4			
	132,70	318,3			
	122,83	292,2			
	135,78	323,1			
PA-RZ-60-28d	108,09	244,0	255,6	12,49	4,88
	124,79	265,5			
	124,95	265,9			
	115,14	245,0			
	122,49	260,6			
	110,94	236,0			
	110,58	263,9			
	112,12	267,6			
	105,89	252,7			
	115,60	275,9			
	102,04	243,5			
	110,05	246,8			

Tabelle A40: Prüfergebnisse der einzelnen Restzugproben der weiteren Prüfserien der PA-Fasern (Fortsetzung 3)

Serie	Höchst- last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
PA-RZ-80-14d	140,99	315,8	301,2	24,53	8,15
	142,65	319,5			
	132,73	297,3			
	120,35	269,6			
	134,09	322,4			
	104,53	251,3			
	111,09	267,1			
	137,65	314,1			
	137,79	314,4			
	138,29	315,5			
	140,65	320,9			
	134,18	306,1			
PA-RZ-80-90d	75,85	185,4	178,1	32,19	18,07
	63,26	154,7			
	81,51	199,3			
	89,30	218,3			
	77,02	174,3			
	74,56	168,7			
	81,60	184,6			
	60,39	136,6			
	78,21	188,9			
	47,22	114,1			
	94,87	229,2			
	76,01	183,6			

Tabelle A41: Prüfergebnisse der einzelnen Restzugproben der Referenzserie der Basaltfasern

Serie	Höchst- last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
B-RZ-20-0d	398,96	1.345,0	1.263,9	56,73	4,49
	375,55	1.242,8			
	368,29	1.218,8			
	409,06	1.355,3			
	383,46	1.270,5			
	383,40	1.270,3			
	389,99	1.281,7			
	381,87	1.255,0			
	370,64	1.218,1			
	335,29	1.147,3			
	381,60	1.305,8			
	366,95	1.255,7			

Tabelle A42: Prüfergebnisse der einzelnen Restzugproben der weiteren Prüfserien der Basaltfasern

Serie	Höchst- last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
B-RZ-20-28d	265,99	925,6	1.117,0	120,23	10,76
	373,90	1.247,7			
	352,50	1.176,3			
	371,66	1.240,2			
	289,62	979,9			
	293,34	992,5			
	287,46	972,6			
	365,46	1.237,5			
	367,47	1.244,2			
	334,26	1.131,8			
	345,62	1.140,4			
	338,10	1.115,5			

Tabelle A43: Prüfergebnisse der einzelnen SIC-Proben der Referenzserie der PA-Fasern

Serie	Höchst- last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
PA-SIC-20-0d	91,69	202,5	240,6	25,27	10,50
	111,64	246,6			
	113,96	251,7			
	118,00	260,7			
	126,78	280,1			
	106,35	234,9			
	116,67	257,7			
	123,07	271,9			
	95,87	212,0			
	101,78	225,0			
	106,94	236,4			
	94,01	207,8			

Tabelle A44: Prüfergebnisse der einzelnen SIC-Proben der weiteren Prüfserien der PA-Fasern

Serie	Höchst- last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
PA-SIC-20- 90d	103,51	233,0	206,5	25,04	12,13
	102,94	231,7			
	111,99	252,1			
	96,54	217,3			
	92,53	218,4			
	85,55	202,0			
	73,83	174,3			
	83,41	196,9			
	90,21	210,1			
	75,31	175,4			
	79,01	184,0			
	78,34	182,4			
PA-SIC-40-7d	128,43	265,6	267,9	17,02	6,35
	131,48	271,9			
	135,17	279,5			
	135,92	281,1			
	122,12	252,6			
	137,66	284,7			
	138,19	285,8			
	136,64	282,6			
	135,87	276,3			
	116,44	236,8			
	119,78	243,6			
	125,20	254,6			

Tabelle A45: Prüfergebnisse der einzelnen SIC-Proben der weiteren Prüfserien der PA-Fasern (Fortsetzung 1)

Serie	Höchst- last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
PA-SIC-40- 14d	116,62	261,7	254,1	20,34	8,00
	108,89	244,3			
	116,99	262,5			
	122,87	275,7			
	100,96	226,5			
	105,89	237,6			
	117,51	263,7			
	120,01	269,3			
	123,05	283,6			
	103,23	237,9			
	95,21	219,4			
	115,93	267,2			
PA-SIC-40- 90d	44,39*	102,1*	230,8	15,02	6,51
	94,76	217,9			
	92,53	212,7			
	117,14	269,3			
	101,07	232,4			
	98,54	226,6			
	102,01	234,5			
	94,50	217,3			
	101,39	231,9			
	100,29	229,4			
	100,06	228,9			
	104,11	238,2			

* Ausreißer nach Grubbs in hellgrau gekennzeichnet

Tabelle A46: Prüfergebnisse der einzelnen SIC-Proben der weiteren Prüfserien der PA-Fasern (Fortsetzung 2)

Serie	Höchst- last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
PA-SIC-60- 14d	115,80	264,9	283,1	10,96	3,87
	119,21	272,7			
	118,07	270,1			
	120,16	274,9			
	106,50*	251,2*			
	123,03	290,2			
	120,83	285,0			
	126,70	298,8			
	123,90	292,2			
	124,63	294,0			
	122,06	287,9			
	119,97	283,0			
PA-SIC-60- 28d	99,79	202,9	240,6	18,35	7,63
	129,57	263,5			
	118,79	241,6			
	122,07	248,3			
	113,98	256,2			
	114,98	258,4			
	103,66	233,0			
	94,04	211,3			
	109,41	245,9			
	102,93	231,3			
	108,48	243,8			
	111,56	250,7			

* Ausreißer nach Grubbs in hellgrau gekennzeichnet

Tabelle A47: Prüfergebnisse der einzelnen SIC-Proben der weiteren Prüfserien der PA-Fasern (Fortsetzung 3)

Serie	Höchst- last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
PA-SIC-80- 14d	92,59	213,3	232,1	10,64	4,58
	108,63	250,3			
	105,66	243,5			
	97,37	224,4			
	98,24	239,6			
	91,61	223,4			
	91,62	223,5			
	93,94	229,1			
	100,11	244,2			
	94,58	230,7			
	96,00	234,1			
	94,04	229,4			
PA-SIC-80- 90d	72,03	162,2	136,7	21,55	15,76
	66,90	150,6			
	65,10	146,6			
	74,16	167,0			
	53,76	126,9			
	54,39	128,4			
	40,43	95,4			
	66,08	156,0			
	52,28	121,7			
	55,91	130,2			
	47,53	110,7			
	62,34	145,2			

Tabelle A48: Prüfergebnisse der einzelnen Restzugproben der Referenzserie der Basaltfasern

Serie	Höchst- last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
B-RZ-20-0d	398,96	1.345,0	1.263,9	56,73	4,49
	375,55	1.242,8			
	368,29	1.218,8			
	409,06	1.355,3			
	383,46	1.270,5			
	383,40	1.270,3			
	389,99	1.281,7			
	381,87	1.255,0			
	370,64	1.218,1			
	335,29	1.147,3			
	381,60	1.305,8			
	366,95	1.255,7			

Tabelle A49: Prüfergebnisse der einzelnen Restzugproben der weiteren Prüfserien der Basaltfasern

Serie	Höchst- last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
B-RZ-20-28d	265,99	925,6	1.117,0	120,23	10,76
	373,90	1.247,7			
	352,50	1.176,3			
	371,66	1.240,2			
	289,62	979,9			
	293,34	992,5			
	287,46	972,6			
	365,46	1.237,5			
	367,47	1.244,2			
	334,26	1.131,8			
	345,62	1.140,4			
	338,10	1.115,5			

Tabelle A50: Prüfergebnisse der einzelnen Restzugproben der weiteren Prüfserien der Basaltfasern (Fortsetzung 1)

Serie	Höchst- last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
B-RZ-20-90d	273,01	889,8	987,7	121,06	12,26
	334,30	1.089,5			
	269,58	878,6			
	322,27	1.081,4			
	343,58	1.152,9			
	276,49	927,8			
	300,63	1.014,5			
	245,87	829,7			
	294,49	993,8			
	324,49	1.080,2			
	238,37	793,5			
	336,64	1.120,6			
B-RZ-40-7d	364,50	1.228,8	1.121,6	112,84	10,06
	354,57	1.195,4			
	359,85	1.190,9			
	385,70	1.255,8			
	326,48	1.063,0			
	286,63	933,3			
	274,08	943,0			
	309,83	1.064,5			
	368,41	1.267,6			
	309,83	1.062,0			
	321,43	1.101,7			
	336,39	1.153,0			

Tabelle A51: Prüfergebnisse der einzelnen Restzugproben der weiteren Prüfserien der Basaltfasern (Fortsetzung 2)

Serie	Höchst- last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
B-RZ-40-28d	251,73	851,8	945,0	136,16	14,41
	352,52	1.192,8			
	264,66	895,5			
	293,06	990,0			
	231,08	780,7			
	233,15	787,6			
	342,00	1.138,1			
	263,50	876,8			
	306,27	1.019,2			
	311,58	1.075,4			
	255,88	883,2			
	245,81	848,4			
B-RZ-60-7d	327,88	1.089,0	932,4	132,04	14,16
	265,75	882,6			
	256,76	852,8			
	266,76	893,2			
	199,15	666,8			
	270,33	905,1			
	311,19	1.036,7			
	276,93	922,6			
	300,17	1.000,0			
	340,03	1.170,8			
	237,78	818,7			
	276,08	950,6			

Tabelle A52: Prüfergebnisse der einzelnen Restzugproben der weiteren Prüfserien der Basaltfasern (Fortsetzung 3)

Serie	Höchst- last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
B-RZ-60-28d	244,91	811,0	683,5	126,26	18,47
	230,95	764,7			
	175,60	581,5			
	213,59	713,1			
	226,13	755,0			
	123,72	413,1			
	175,72	579,2			
	206,78	681,6			
	263,94	870,0			
	188,58	620,2			
	238,61	784,7			
	191,07	628,4			
B-RZ-80-4d	199,71	662,8	740,7	147,20	19,87
	178,18	591,4			
	215,29	714,6			
	275,58	918,0			
	222,88	742,4			
	234,81	782,2			
	237,95	795,1			
	264,12	882,6			
	168,71	563,8			
	295,99	964,4			
	146,70	478,0			
	243,27	792,6			

Tabelle A53: Prüfergebnisse der einzelnen Restzugproben der weiteren Prüfserien der Basaltfasern (Fortsetzung 4)

Serie	Höchst- last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
B-RZ-80-28d	163,37	568,5	408,7	161,05	39,41
	146,81	510,9			
	174,55	582,2			
	100,91	336,6			
	101,23	337,7			
	65,85	226,2			
	152,25	522,9			
	101,98	350,3			
	212,12	699,9			
	64,45	219,6			
	69,83	237,9			
	91,37	311,3			
B-RZ-80-90d	163,65	550,2	338,8	102,6	30,27
	117,57	395,3			
	87,48	294,1			
	95,35	324,8			
	138,77	472,7			
	85,19	290,2			
	91,56	314,0			
	68,59	235,2			
	59,78	205,0			
	127,27	427,3			
	89,14	299,2			
	76,59	257,1			

Tabelle A54: Prüfergebnisse der einzelnen SIC-Proben der Referenzserie der Basaltfasern

Serie	Höchst- last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
B-SIC-20-0d	331,87	1.113,7	1.225,4	63,81	5,21
	367,04	1.231,7			
	371,38	1.246,2			
	377,25	1.265,9			
	351,57	1.186,8			
	372,48	1.257,3			
	357,94	1.208,3			
	364,25	1.229,5			
	375,23	1.260,1			
	330,14	1.108,7			
	377,22	1.266,7			
	395,90	1.329,5			

Tabelle A55: Prüfergebnisse der einzelnen SIC-Proben der weiteren Prüfserien der Basaltfasern

Serie	Höchst- last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
B-SIC-20-28d	373,40	1.298,1	1.225,2	40,58	3,31
	365,55	1.270,8			
	342,95	1.167,8			
	368,22	1.253,9			
	370,86	1.240,1			
	372,86	1.246,8			
	356,16	1.191,0			
	340,58	1.184,5			
	350,71	1.191,2			
	251,21*	853,2*			
	360,59	1.224,7			
	355,71	1.208,2			

* Ausreißer nach Grubbs in hellgrau gekennzeichnet

Tabelle A56: Prüfergebnisse der einzelnen SIC-Proben der weiteren Prüfserien der Basaltfasern (Fortsetzung 1)

Serie	Höchst- last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
B-SIC-20-90d	372,43	1.239,1	1.185,7	45,12	3,81
	331,84	1.104,0			
	350,64	1.166,6			
	371,21	1.235,0			
	369,43	1.229,6			
	348,26	1.159,1			
	354,19	1.183,2			
	368,56	1.231,2			
	355,80	1.173,9			
	342,31	1.129,4			
	361,01	1.191,1			
	249,19*	822,2*			
B-SIC-40-7d	389,58	1.274,7	1.237,9	51,32	4,15
	377,46	1.235,0			
	370,73	1.248,0			
	348,95	1.174,7			
	375,92	1.265,4			
	396,49	1.334,7			
	349,52	1.153,6			
	375,62	1.239,7			
	362,56	1.226,7			
	357,44	1.209,4			
	383,50	1.297,6			
	353,39	1.195,7			

* Ausreißer nach Grubbs in hellgrau gekennzeichnet

Tabelle A57: Prüfergebnisse der einzelnen SIC-Proben der weiteren Prüfserien der Basaltfasern (Fortsetzung 2)

Serie	Höchst- last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
B-SIC-40-28d	342,88	1.149,8	1.104,2	112,74	10,21
	364,95	1.223,8			
	320,91	1.076,1			
	334,92	1.127,3			
	344,06	1.158,1			
	361,34	1.216,3			
	277,85	935,2			
	305,78	1.037,5			
	368,22	1.249,4			
	296,21	1.005,0			
	343,38	1.165,1			
	269,96	906,6			
B-SIC-60-7d	202,88*	665,5*	1.081,3	84,15	7,78
	354,93	1.164,2			
	308,91	1.013,3			
	328,58	1.077,8			
	359,77	1.177,1			
	332,22	1.087,0			
	325,39	1.109,2			
	333,73	1.137,6			
	343,89	1.172,3			
	312,97	1.066,9			
	282,54	932,5			
	289,86	956,7			

* Ausreißer nach Grubbs in hellgrau gekennzeichnet

Tabelle A58: Prüfergebnisse der einzelnen SIC-Proben der weiteren Prüfserien der Basaltfasern (Fortsetzung 3)

Serie	Höchst- last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
B-SIC-60-28d	258,34	874,5	880,0	94,04	10,69
	241,85	818,7			
	262,74	889,5			
	297,50	1.007,1			
	226,24	755,5			
	255,23	852,3			
	258,23	862,3			
	316,95	1.058,4			
	223,69	750,1			
	290,30	974,9			
	265,05	890,2			
	246,14	826,6			
B-SIC-80-4d	261,56	877,5	992,1	105,39	10,62
	252,80	848,1			
	281,09	943,0			
	304,46	1.021,5			
	363,90	1.175,2			
	300,84	971,5			
	292,02	943,1			
	325,36	1.050,7			
	362,36	1.196,3			
	295,15	974,5			
	289,20	954,8			
	287,39	948,8			

Tabelle A59: Prüfergebnisse der einzelnen SIC-Proben der weiteren Prüfserien der Basaltfasern (Fortsetzung 4)

Serie	Höchst- last	Zugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	N	N/mm ²			%
B-SIC-80-28d	256,31	891,1	891,1	96,54	10,83
	129,41	449,9			
	270,29	920,4			
	285,38	971,8			
	206,08	689,1			
	241,63	840,4			
	255,24	887,7			
	284,87	990,8			
	262,07	877,3			
	313,65	1.050,0			
	261,52	875,5			
	241,46	808,3			
B-SIC-80-90d	247,80*	824,8*	712,7	27,53	3,86
	209,07	695,8			
	200,01	677,3			
	214,24	725,5			
	207,92	704,1			
	202,37	685,3			
	219,87	763,0			
	218,28	757,5			
	202,73	703,5			
	199,78	693,3			
	215,63	720,3			
	213,76	714,1			

* Ausreißer nach Grubbs in hellgrau gekennzeichnet

Tabelle A60: Mörtelbiegezugfestigkeiten der Basalt-SIC-Proben

Serie	Höchst- last	Biegezugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	kN	N/mm ²			%
B-SIC-20-0d	3,594	8,42	8,45	0,31	3,67
	3,746	8,78			
	3,482	8,16			
B-SIC-80-4d	3,964	9,29	8,85	0,80	9,08
	3,986	9,34			
	3,381	7,92			
B-SIC-40-7d B-SIC-60-7d	3,28	7,69	7,68	0,33	4,24
	3,138	7,35			
	3,416	8,01			
B-SIC-40-28d B-SIC-60-28d	2,503	5,87	6,06	0,35	5,78
	2,757	6,46			
	2,494	5,85			
B-SIC-20-28d B-SIC-80-28d	1,992	4,67	5,26	0,55	10,48
	2,457	5,76			
	2,287	5,36			
B-SIC-20-90d B-SIC-80-90d	3,568	8,36	7,84	1,52	19,40
	3,849	9,02			
	2,612	6,12			

Tabelle A61: Mörteldruckfestigkeiten der PP-SIC-Proben (Fortsetzung)

Serie	Höchst -last	Biegezugfestigkeit			
		Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
	kN	N/mm ²			%
PP-SIC-80-4d	97,21	60,8	59,7	1,9	3,26
	94,89	59,3			
	92,06	57,5			
	99,45	62,2			
	97,45	60,9			
	91,76	57,4			
PP-SIC-40-7d PP-SIC-40-90d	91,29	57,1	55,9	3,5	6,27
	91,89	57,4			
	89,22	55,8			
	82,89	51,8			
	97,99	61,2			
	83,77	52,4			
PP-SIC-40-14d PP-SIC-60-14d PP-SIC-80-14d PP-SIC-60-28d	93,82	58,6	58,7	2,4	4,16
	93,26	58,3			
	91,89	57,4			
	90,17	56,4			
	92,66	57,9			
	101,40	63,4			
PP-SIC-20-90d PP-SIC-80-90d	92,77	58,0	57,9	1,3	2,21
	94,69	59,2			
	95,35	59,6			
	89,97	56,2			
	91,10	56,9			
	92,42	57,8			
PP-SIC-60-90d	95,83	59,9	58,9	3,6	6,03
	102,2	63,9			
	86,29	53,9			
	95,52	59,7			
	89,15	55,7			
	96,5	60,3			

Tabelle A62: Beschleunigungsfaktoren nach /Pro82/

Temperatur	Lagerungsdauer im Labor	entsprechende Freibewitterungszeit in England		
°C	Tage	Tage	Monate	Jahre
20	0	0	0	0
	28	84	2,8	0,2
	90	270	9,0	0,7
40	7	196	6,5	0,5
	28	784	26,1	2,1
60	7	1.904	63,5	5,2
	28	7.616	253,9	20,9
80	4	6.688	222,9	18,3
	28	46.816	1.560,5	128,3
	90	150.480	5016	412,3

Tabelle A63: Ergebnisse der 4-Punkt-Biegezugprüfung des PET-Faserbetons

Serie	Balken	F_U	δ_0	$f_{ct,fl}^I$	$F_{\delta 0+0,65}$	$F_{\delta 0+3,15}$	$D_{fl,I}^I$	$D_{fl,II}^I$	$F_{\delta 0+3,15}/F_U$
		kN	mm	N/mm ²	kN		Nmm		-
PET-20-28d*	1	31,038	0,096	5,52	8,809	6,807	5.483	26.559	0,219
	2	32,585	0,101	5,79	10,535	10,700	7.129	35.395	0,328
	3	33,033	0,098	5,87	11,568	11,156	6.619	36.639	0,338
	4	34,076	0,107	6,06	10,073	9,659	6.771	33.362	0,283
	5	32,337	0,102	5,75	10,531	8,493	8.364	31.294	0,263
	6	31,799	0,094	5,65	11,246	12,452	6.801	38.740	0,392
	MW	32,478	0,100	5,77	10,460	9,878	6.861	33.665	0,304
	s	1,042	0,004	0,19	0,973	2,017	927	4.331	0,061
	v [%]	3,208	4,50	3,21	9,30	20,414	13,52	12,87	20,131
PET-20-28d-neu	1	29,826	0,090	5,30	8,254	7,173	6.866	25.768	0,240
	2	32,607	0,073	5,80	8,072	6,426	-1.333	17.890	0,197
	3	31,416	0,084	5,59	8,277	7,820	4.603	26.048	0,249
	4	30,610	0,093	5,44	7,779	8,767	5.905	26.938	0,286
	5	30,549	0,102	5,43	10,473	10,874	6.365	34.908	0,356
	6	30,855	0,078	5,49	11,679	11,522	7.037	36.868	0,373
	MW	30,857	0,089	5,51	9,552	9,746	5.978	31.191	0,316
	s	0,395	0,011	0,17	1,839	1,741	1.027	5.495	0,059
	v [%]	1,28	11,87	3,07	19,25	17,87	17,19	17,62	18,51

* nicht bei der Auswertung berücksichtigte Proben in grau gekennzeichnet

Tabelle A64: Ergebnisse der 4-Punkt-Biegezugprüfung des PET-Faserbetons (Fortsetzung 1)

Serie	Balken	F_U	δ_0	$f_{ct,fl}^I$	$F_{\delta 0+0,65}$	$F_{\delta 0+3,15}$	$D_{fl,I}^I$	$D_{fl,II}^I$	$F_{\delta 0+3,15}/F_U$
		kN	mm	N/mm ²	kN		Nmm		-
PET-20-180d*	1	34,750	0,086	6,18	6,477	6,343	5.452	21.102	0,183
	2	37,159	0,097	6,61	5,391	4,805	3.606	16.494	0,129
	3	33,524	0,089	5,96	6,111	6,157	3.307	19.274	0,184
	4	35,540	0,081	6,32	6,176	6,678	4.618	21.131	0,188
	5	35,481	0,077	6,31	6,644	6,040	5.302	22.558	0,170
	6	33,747	0,095	6,00	7,274	6,515	3.836	21.971	0,193
	MW	35,034	0,087	6,23	6,346	6,090	4.354	20.422	0,174
	s	1,340	0,008	0,24	0,627	0,671	905	2.222	0,023
	v [%]	3,83	9,16	3,83	9,88	11,01	20,79	10,88	13,40
PET-50-28d*	1	22,112	0,070	3,93	7,595	7,203	4.061	23.556	0,326
	2	23,081	0,084	4,10	8,743	7,628	5.436	26.894	0,330
	3	20,074	0,058	3,57	7,964	6,048	4.673	22.326	0,301
	4	20,830	0,075	3,70	6,951	5,556	3.741	19.754	0,267
	5	20,700	0,074	3,68	8,146	7,199	4.449	24.033	0,348
	6	19,358	0,066	3,44	9,935	9,986	5.525	32.083	0,516
	MW	21,026	0,071	3,74	8,222	7,270	4.647	24.774	0,348
	s	1,359	0,009	0,24	1,028	1,545	721	4.270	0,087
	v [%]	6,47	12,37	6,47	12,51	21,26	15,51	17,23	24,97

Tabelle A65: Ergebnisse der 4-Punkt-Biegezugprüfung des PET-Faserbetons (Fortsetzung 2)

Serie	Balken	F_U	δ_0	$f_{ct,fl}^I$	$F_{\delta 0+0,65}$	$F_{\delta 0+3,15}$	$D_{fl,I}^I$	$D_{fl,II}^I$	$F_{\delta 0+3,15}/F_U$
		kN	mm	N/mm ²	kN		Nmm		kN
PET-50-28d-neu	1	24,910	0,094	4,43	9,463	6,983	5.165	26.951	0,280
	2	26,146	0,095	4,65	9,877	10,669	6.533	32.496	0,408
	3	26,303	0,102	4,68	8,941	7,917	5.838	27.486	0,301
	4	24,487	0,083	4,35	9,580	9,562	5.303	30.070	0,390
	5	23,350	0,085	4,15	7,663	5,851	4.445	24.707	0,251
	6	25,478	0,086	4,53	9,771	9,254	5.157	30.657	0,363
	MW	25,112	0,091	4,46	9,216	8,372	5.407	28.728	0,332
	s	1,110	0,007	0,20	0,828	1,787	709	2.849	0,064
	v [%]	4,42	8,17	4,42	8,98	21,34	13,11	9,92	19,24
PET-50-180d*	1	26,199	0,108	4,66	5,882	3,170	5.138	14.978	0,121
	2	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	25,651	0,097	4,56	5,906	3,819	3.991	16.664	0,149
	4	23,996	0,086	4,27	8,589	2,648	5.476	18.417	0,110
	5	24,058	0,080	4,28	6,635	3,481	4.432	17.237	0,145
	6	28,002	0,096	4,98	7,509	5,277	6.027	21.649	0,188
	MW	25,977	0,095	4,62	6,483	3,937	4.897	17.632	0,151
	s	1,627	0,012	0,29	0,768	0,932	889	2.845	0,028
	v [%]	6,262	12,22	6,26	11,85	23,683	18,16	16,13	18,56

* nicht bei der Auswertung berücksichtigte Proben in grau gekennzeichnet

Tabelle A66: Ergebnisse der 4-Punkt-Biegezugprüfung des PA-Faserbetons

Serie	Balken	F_U	δ_0	$f_{ct,fl}^I$	$F_{\delta 0+0,65}$	$F_{\delta 0+3,15}$	$D_{fl,I}^I$	$D_{fl,II}^I$	$F_{\delta 0+3,15}/F_U$
		kN	mm	N/mm ²	kN		Nmm		-
PA-20-28d	1	33,872	0,098	6,02	4,476	5,884	3.062	16.284	0,174
	2	35,896	0,092	6,38	7,024	11,214	3.811	27.226	0,312
	3	35,544	0,099	6,32	4,697	4,483	3.989	14.385	0,126
	4	30,708	0,065	5,46	4,802	7,085	2.990	18.228	0,231
	5	30,950	0,090	5,50	5,618	7,061	3.806	19.472	0,228
	6	33,909	0,098	6,03	7,175	9,778	5.240	26.224	0,288
	MW	33,480	0,090	5,95	5,632	7,584	3.817	20.303	0,227
	s	2,215	0,013	0,39	1,202	2,491	813	5.276	0,069
	v [%]	6,62	14,35	6,61	21,338	32,84	21,31	25,98	30,636
PA-20-90d*	1	38,009	0,056	6,76	4,351	5,666	10.995	23.880	0,149
	2	35,854	0,098	6,37	4,272	6,008	2.874	16.038	0,168
	3	32,617	0,086	5,80	6,029	10,088	3.522	25.188	0,309
	4	36,700	0,093	6,52	6,450	9,154	4.039	23.870	0,249
	5	35,908	0,100	6,38	6,034	8,113	4.376	22.837	0,226
	6	35,759	0,093	6,36	7,868	11,766	5.004	31.954	0,329
	MW	35,368	0,094	6,29	6,131	9,026	3.963	23.978	0,256
	s	1,583	0,005	0,28	1,284	2,156	813	5.689	0,065
	v [%]	4,48	5,81	4,48	20,95	23,89	20,50	23,72	25,40

* nicht bei der Auswertung berücksichtigte Proben in grau gekennzeichnet

Tabelle A67: Ergebnisse der 4-Punkt-Biegezugprüfung des PA-Faserbetons (Fortsetzung)

Serie	Balken	F_U	δ_0	$f_{ct,fl}^I$	$F_{\delta 0+0,65}$	$F_{\delta 0+3,15}$	$D_{fl,I}^I$	$D_{fl,II}^I$	$F_{\delta 0+3,15}/F_U$
		kN	mm	N/mm ²	kN		Nmm		-
PA-20-180d	1	32,011	0,088	5,69	6,486	9,252	4.430	25.236	0,289
	2	34,724	0,103	6,17	7,562	11,207	5.278	29.120	0,323
	3	34,388	0,092	6,11	7,191	9,851	6.385	27.625	0,286
	4	33,090	0,091	5,88	6,183	9,874	5.528	26.395	0,298
	5	33,561	0,079	5,97	8,781	12,904	6.025	32.571	0,385
	6	36,340	0,094	6,46	7,733	10,911	6.470	29.570	0,300
	MW	34,019	0,091	6,05	7,323	10,666	5.686	28.419	0,314
	s	1,492	0,008	0,27	0,934	1,316	773	2.605	0,037
	v [%]	4,39	8,49	4,38	12,76	12,334	13,59	9,16	11,81
PA-50-180d	1	27,553	0,097	4,90	5,891	8,801	5.002	26.991	0,319
	2	25,909	0,133	4,61	7,976	7,042	7.194	23.597	0,272
	3	25,916	0,100	4,61	5,621	7,404	3.676	19.679	0,286
	4	28,374	0,093	5,04	6,220	7,610	3.194	20.820	0,268
	5	29,851	0,107	5,31	9,736	12,883	7.202	34.932	0,432
	6	26,174	0,090	4,65	7,740	11,985	4.809	30.317	0,458
	MW	27,245	0,105	4,84	7,459	9,385	5.215	25.869	0,343
	s	1,786	0,017	0,32	1,616	2,809	1.903	6.536	0,094
	v [%]	6,56	16,39	6,56	21,67	29,93	36,49	25,27	27,27

* nicht bei der Auswertung berücksichtigte Proben in grau gekennzeichnet

Tabelle A68: Ergebnisse der 4-Punkt-Biegezugprüfung des Basaltfaserbetons

Serie	Balken	F_U	δ_0	$f_{ct,fl}^I$	$F_{\delta 0+0,65}$	$F_{\delta 0+3,15}$	$D_{fl,I}^I$	$D_{fl,II}^I$	$F_{\delta 0+3,15}/F_U$
		kN	mm	N/mm ²	kN		Nmm		-
B-20-28d	1	32,637	0,101	5,80	24,193	26,576	14.186	81.282	0,814
	2	32,978	0,095	5,86	24,164	23,811	14.257	76.818	0,722
	3	34,005	0,104	6,05	29,509	21,122	17.599	81.739	0,621
	4	34,564	0,107	6,14	27,197	23,252	16.068	84.812	0,673
	5	31,898	0,095	5,67	22,492	18,509	12.664	69.209	0,580
	6	35,839	0,116	6,37	29,671	28,075	18.155	93.482	0,783
	MW	33,583	0,103	5,97	25,543	24,044	15.066	81.121	0,715
	s	1,593	0,009	0,28	2,864	3,673	2.106	9.040	0,093
	v [%]	4,74	8,92	4,74	11,21	15,28	13,98	11,14	13,00
B-20-180d	1	-		-	-	-	-	-	-
	2	34,435	0,096	6,12	24,485	15,554	15.414	67.844	0,452
	3	35,287	0,104	6,27	29,948	17,450	18.036	80.477	0,495
	4	34,559	0,110	6,14	25,447	13,099	16.263	74.465	0,379
	5	34,310	0,100	6,10	26,975	12,494	16.336	70.300	0,364
	6	30,078	0,105	5,35	31,940	19,344	18.808	91.011	0,643
	MW	34,647	0,102	6,00	26,714	14,649	16.971	76.819	0,467
	s	0,438	0,006	0,37	3,387	2,288	1.400	9.265	0,112
	v [%]	1,27	5,87	6,16	8,94	15,62	8,25	12,06	24,04

* nicht bei der Auswertung berücksichtigte Proben in grau gekennzeichnet

Tabelle A69: Ergebnisse der 4-Punkt-Biegezugprüfung des Basaltfaserbetons (Fortsetzung 1)

Serie	Balken	F_U	δ_0	$f_{ct,fl}^I$	$F_{\delta 0+0,65}$	$F_{\delta 0+3,15}$	$D_{fl,I}^I$	$D_{fl,II}^I$	$F_{\delta 0+3,15}/F_U$
		kN	mm	N/mm ²	kN		Nmm		-
B-50-28d	1	29,203	0,106	5,19	22,597	17,995	13.096	71.263	0,616
	2	30,415	0,101	5,41	20,134	19,429	12.807	63.745	0,639
	3	27,999	0,093	4,98	17,103	15,498	10.121	52.690	0,554
	4	27,202	0,085	4,84	22,548	23,432	13.166	72.606	0,861
	5	28,006	0,101	4,98	18,235	16,242	10.696	60.408	0,580
	6	27,181	0,098	4,83	21,807	19,955	12.783	69.899	0,734
	MW	28,334	0,097	5,04	20,404	18,759	12.111	65.102	0,664
	s	1,258	0,007	0,22	2,326	2,873	1.340	7.684	0,115
	v [%]	4,44	7,33	4,44	11,40	15,315	11,07	11,80	17,31
B-50-90d	1	26,932	0,133	4,79	26,270	21,897	15.796	75.847	0,813
	2	30,168	0,111	5,36	29,663	23,870	17.743	85.263	0,791
	3	26,592	0,146	4,73	18,925	14,269	12.357	56.543	0,537
	4	28,881	0,091	5,13	26,807	18,371	15.630	74.709	0,636
	5	23,288	0,136	4,14	21,053	18,798	12.743	64.634	0,807
	6	31,699	0,133	5,64	30,562	23,754	19.678	88.527	0,749
	MW	27,927	0,125	4,96	25,547	20,160	15.658	74.254	0,722
	s	2,982	0,020	0,53	4,653	3,727	2.825	12.115	0,112
	v [%]	10,68	16,06	10,68	18,21	18,49	18,05	16,32	15,52

Tabelle A70: Ergebnisse der 4-Punkt-Biegezugprüfung des Basaltfaserbetons (Fortsetzung 2)

Serie	Balken	F_U	δ_0	$f_{ct,fl}^I$	$F_{\delta 0+0,65}$	$F_{\delta 0+3,15}$	$D_{fl,I}^I$	$D_{fl,II}^I$	$F_{\delta 0+3,15}/F_U$
		kN	mm	N/mm ²	kN		Nmm		-
B-50-180d	1	29,105	0,093	5,17	19,584	12,801	11.902	54.802	0,440
	2	30,468	0,112	5,42	24,180	15,032	15.359	66.926	0,493
	3	37,273	0,031	6,63	28,244	15,329	25.363	80.301	0,411
	4	34,029	0,109	6,05	27,295	19,453	16.989	78.701	0,572
	5	33,963	0,133	6,04	29,800	21,959	19.473	87.759	0,647
	6	30,738	0,096	5,46	28,944	20,797	17.234	80.792	0,677
	MW	31,661	0,109	5,63	25,961	18,008	16.191	73.796	0,566
	s	2,220	0,016	0,39	4,161	3,919	2.810	12.999	0,100
	v [%]	7,01	14,59	7,01	16,028	21,76	17,36	17,62	17,70

* nicht bei der Auswertung berücksichtigte Proben in grau gekennzeichnet

Anhang B – Bilder

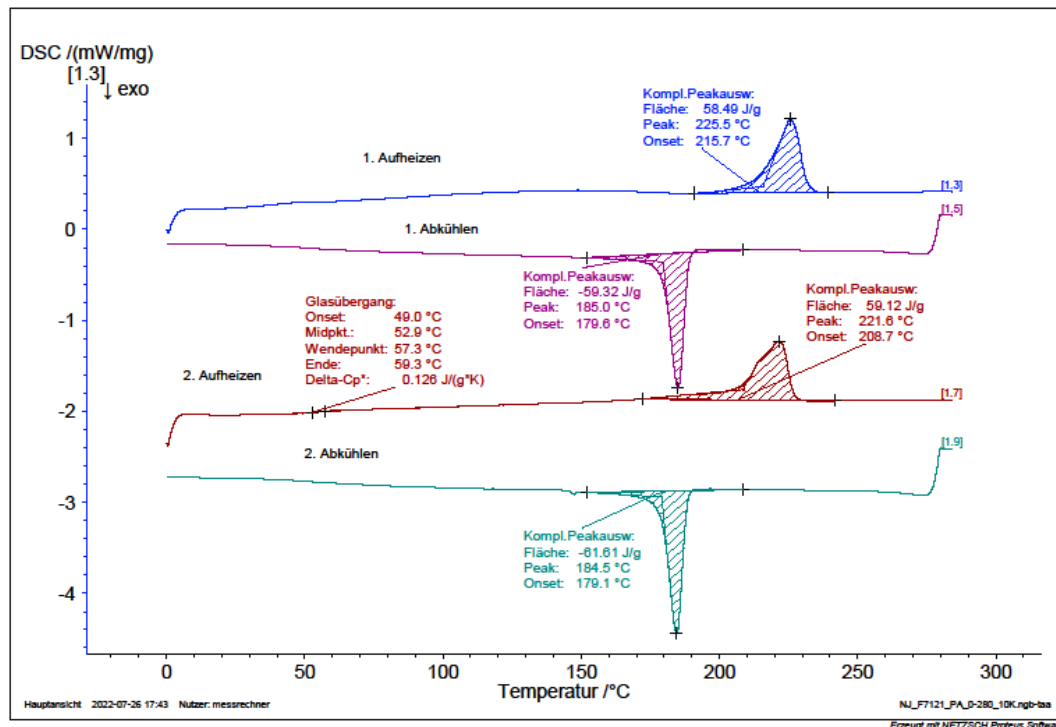


Bild B1: Ergebnis der DSC-Analyse der PA-Fasern

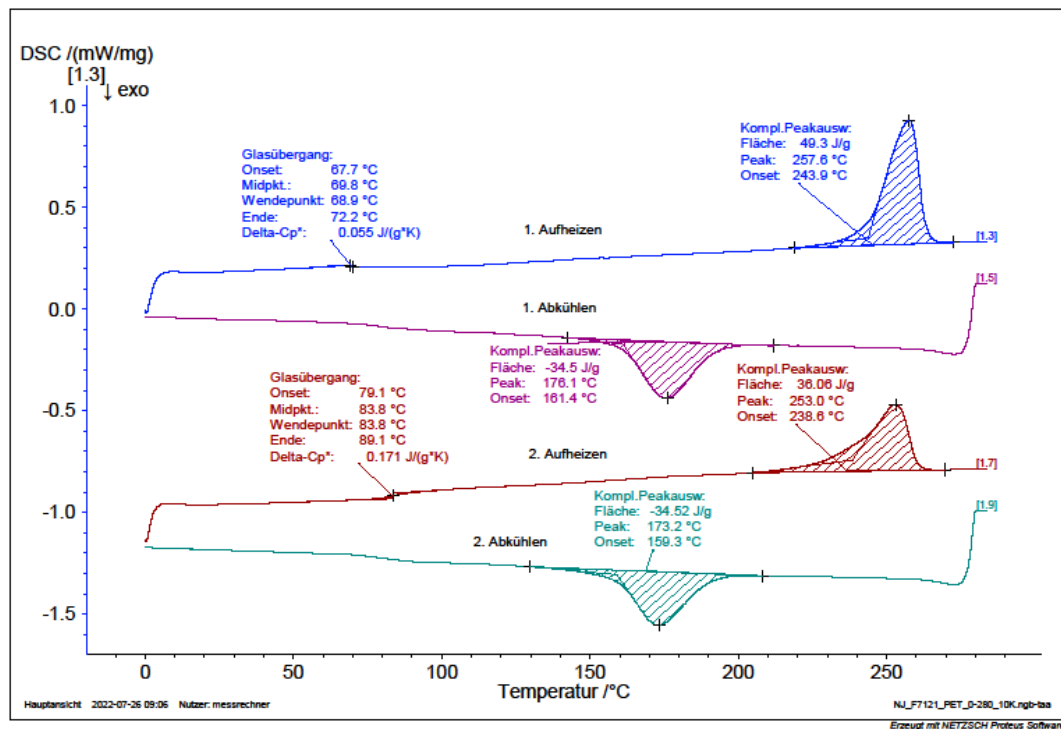


Bild B2: Ergebnis der DSC-Analyse der PET-Fasern

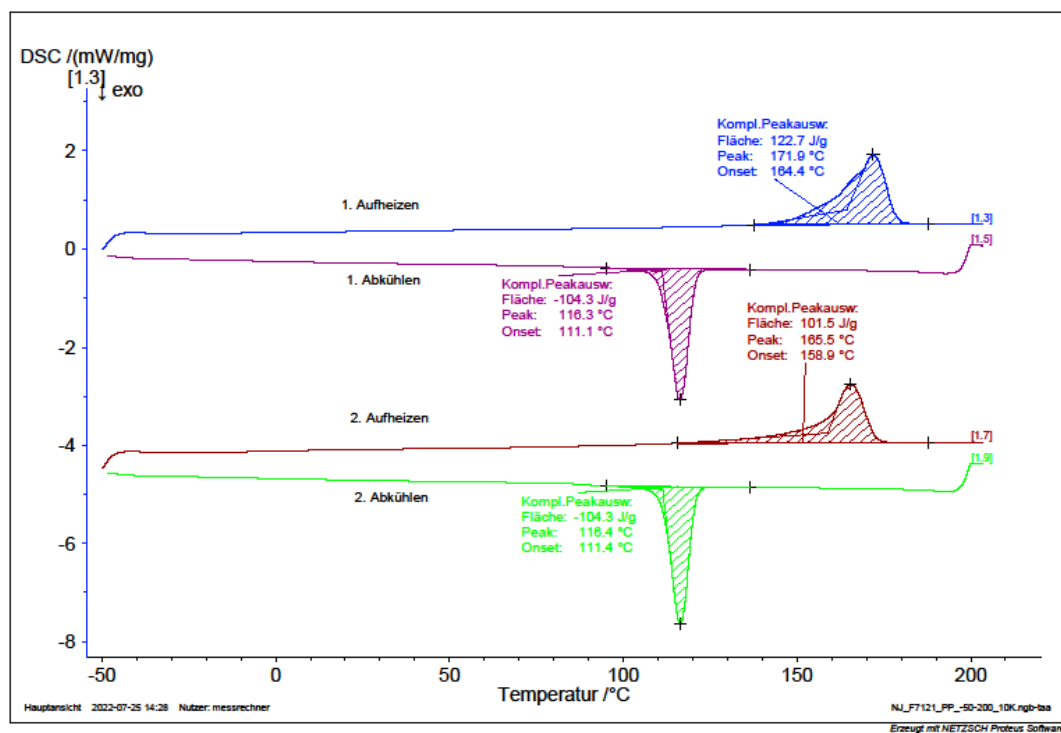


Bild B3: Ergebnis der DSC-Analyse der PP-Fasern

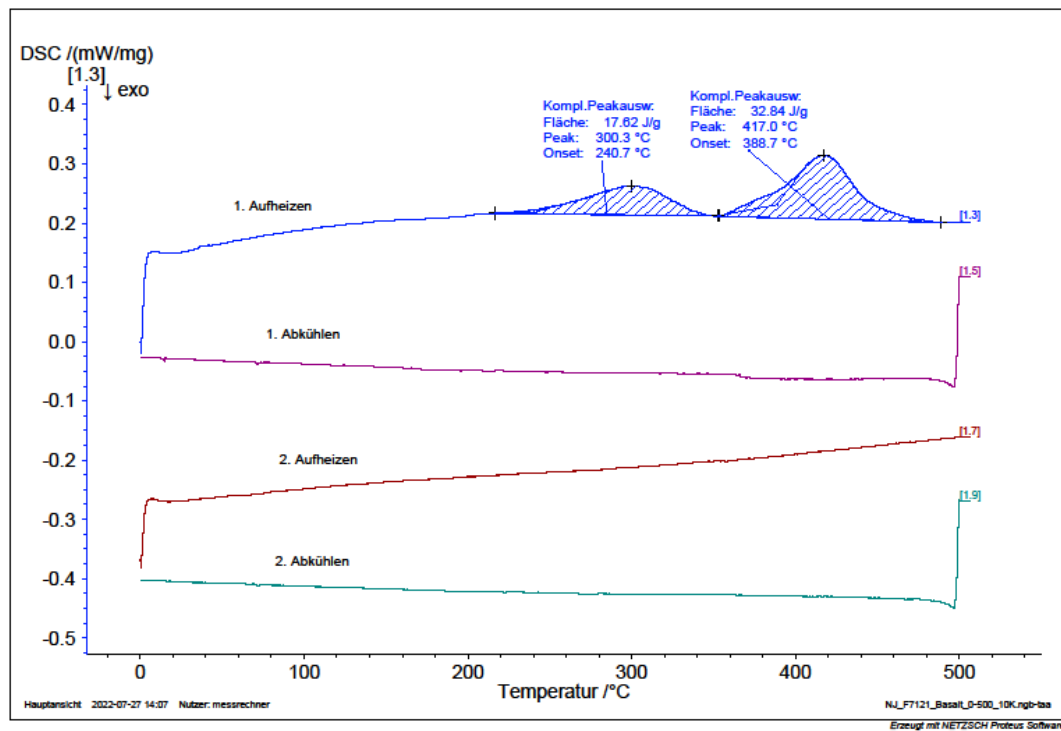


Bild B4: Ergebnis der DSC-Analyse der Basalt-Fasern

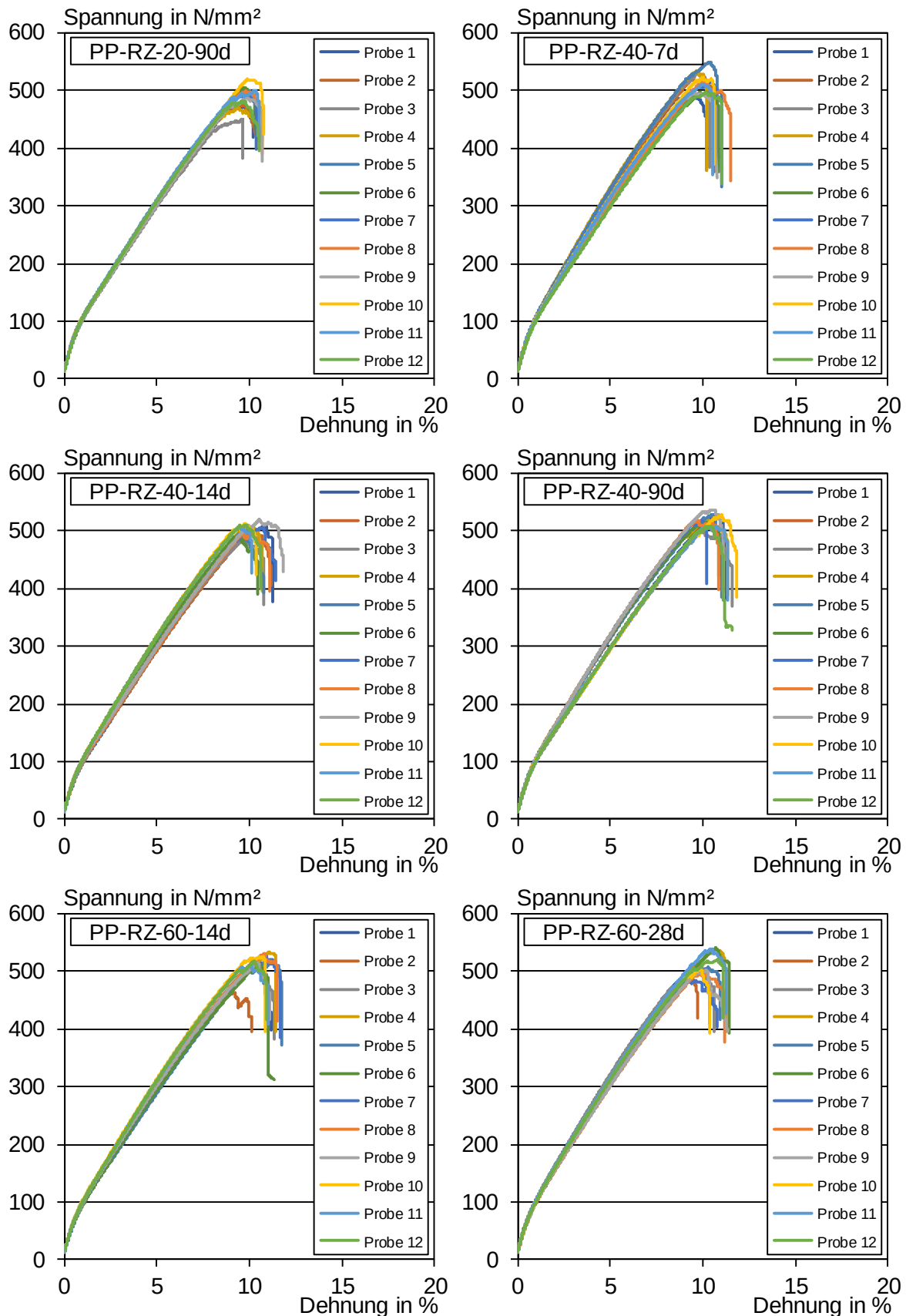


Bild B5: Ergebnisse der Restzugproben der Prüfserien der PP-Fasern, 90d bei 20 °C (oben links); 7d bei 40 °C (oben rechts); 14d bei 40 °C (mittig links); 90d bei 40 °C (mittig rechts); 14d bei 60 °C (unten links); 28d bei 60 °C (unten rechts)

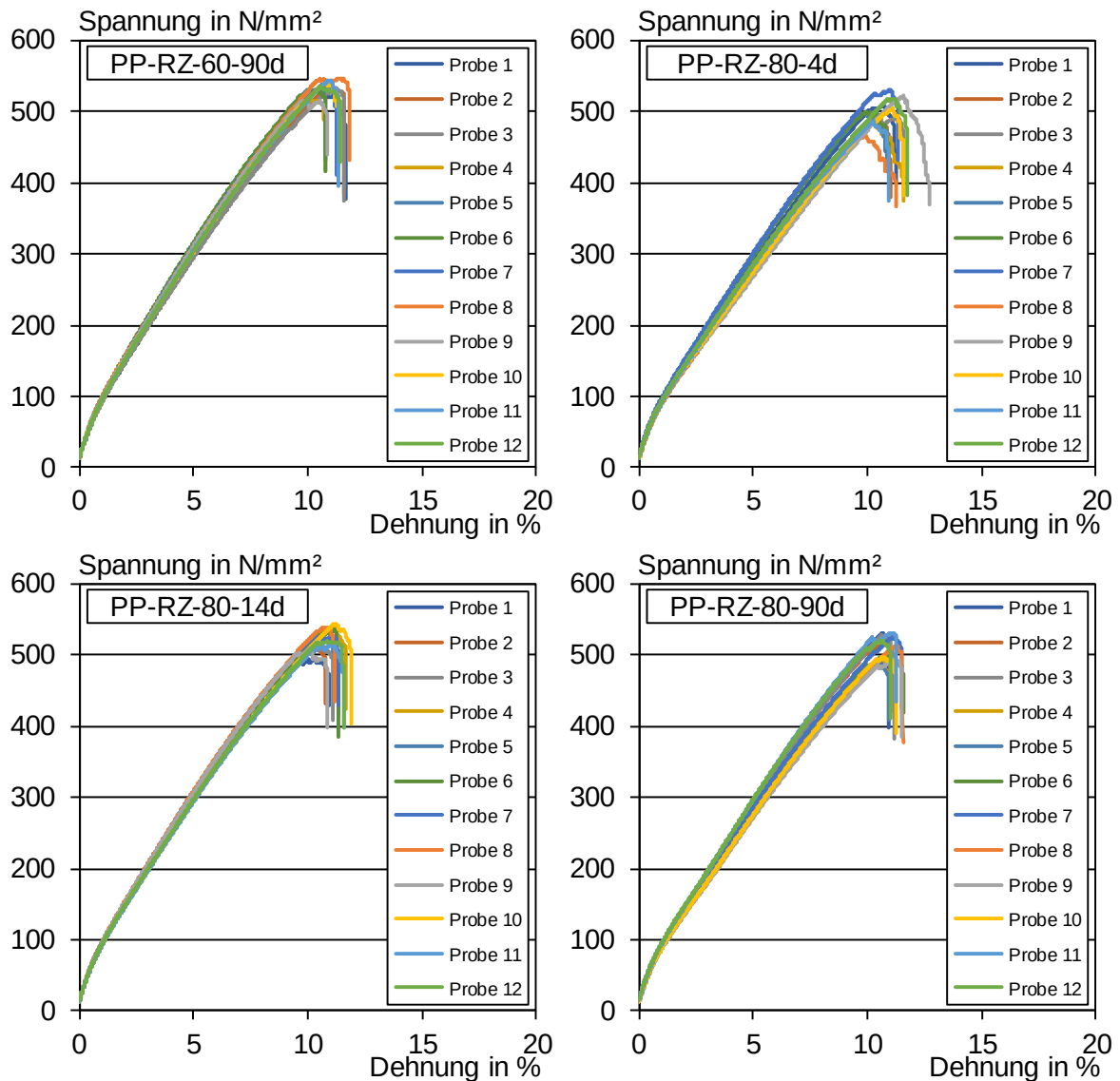


Bild B6: Ergebnisse der Restzugproben der Prüfserien der PP-Fasern, 90d bei 60 °C (oben links); 4d bei 80 °C (oben rechts); 14d bei 80 °C (unten links); 90d bei 80 °C (unten rechts)

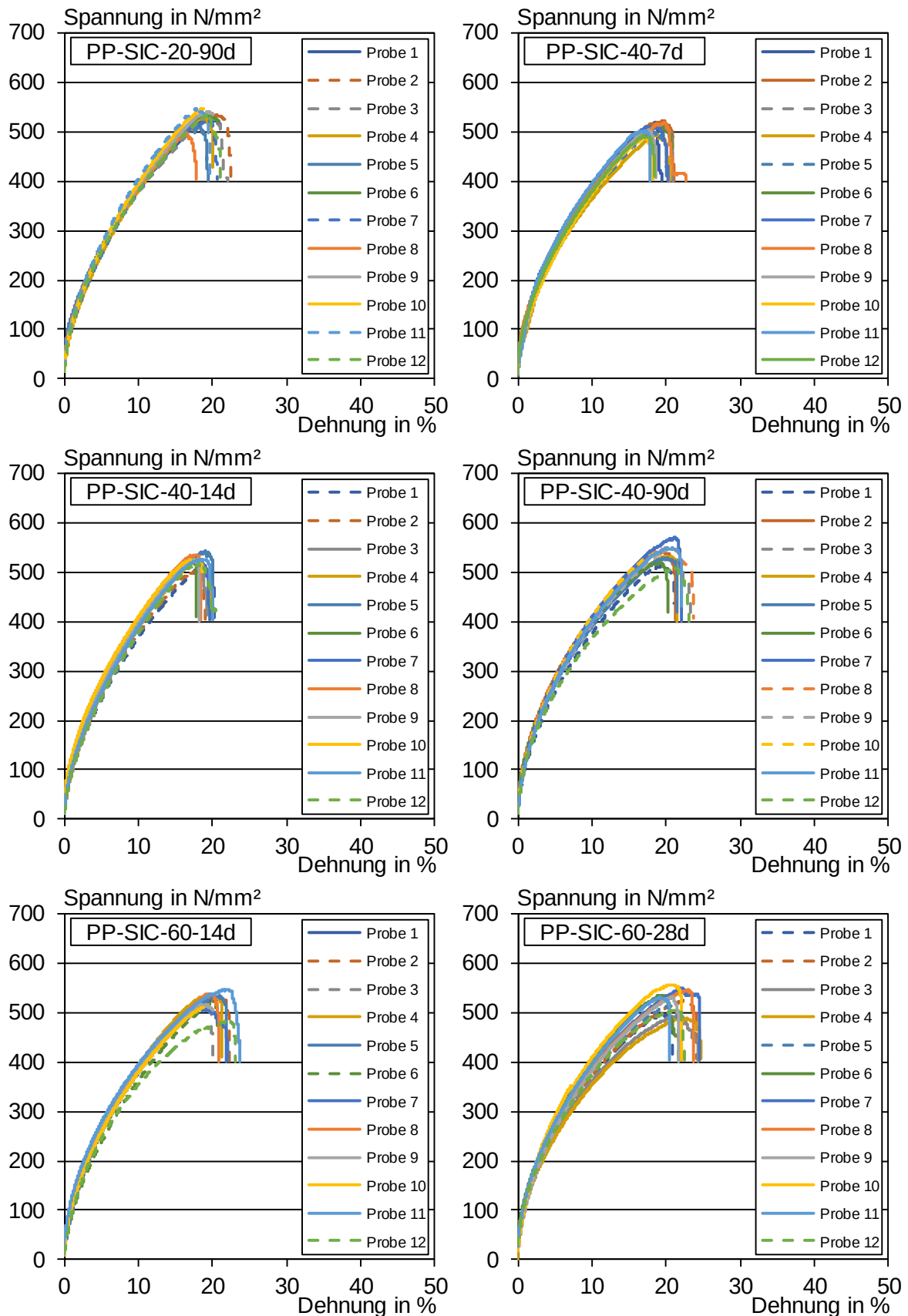


Bild B7: Ergebnisse der SIC-Proben der Prüfserien der PP-Fasern, 90d bei 20 °C (oben links); 7d bei 40 °C (oben rechts); 14d bei 40 °C (mittig links); 90d bei 40 °C (mittig rechts); 14d bei 60 °C (unten links); 28d bei 60 °C (unten rechts)

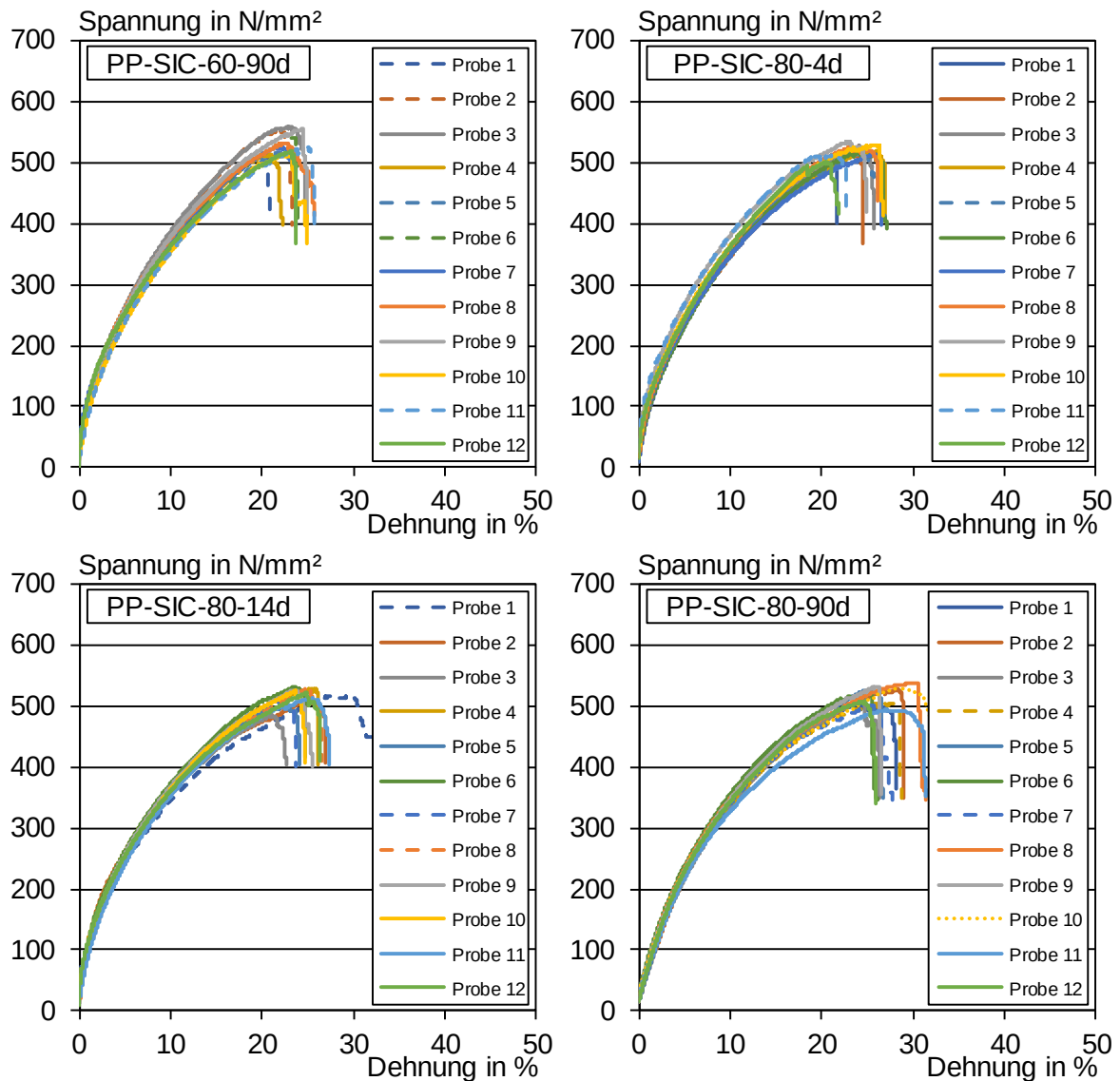


Bild B8: Ergebnisse der SIC-Proben der Prüfserien der PP-Fasern, 90 d bei 60 °C (oben links); 4d bei 80 °C (oben rechts); 14d bei 80 °C (unten links); 90d bei 80 °C (unten rechts)

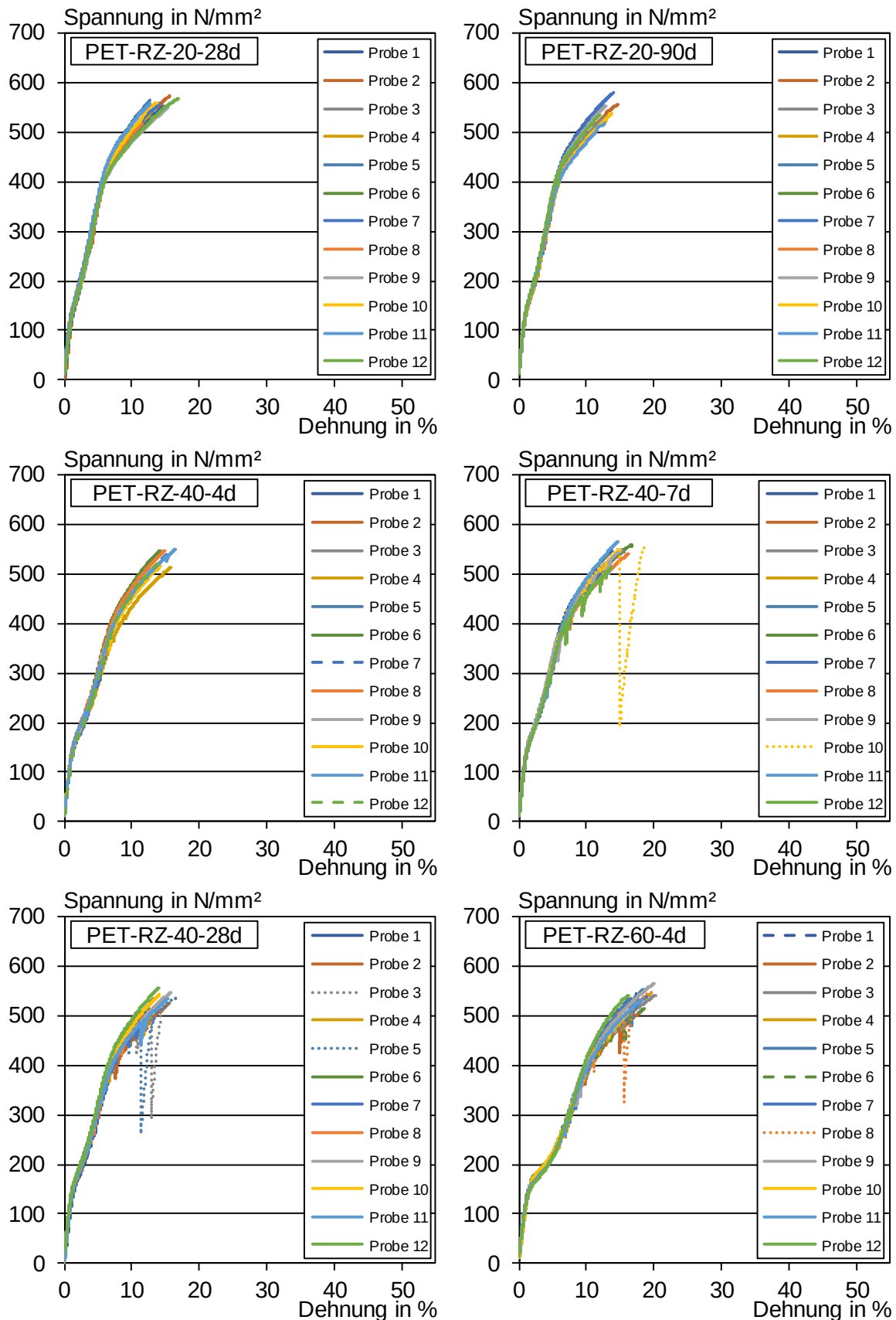


Bild B9: Ergebnisse der Restzugproben der Prüfserien der PET-Fasern, 28d bei 20 °C (oben links); 90d bei 20 °C (oben rechts); 4d bei 40 °C (mittig links); 7d bei 40 °C (mittig rechts); 28d bei 40 °C (unten links); 4d bei 60 °C (unten rechts)

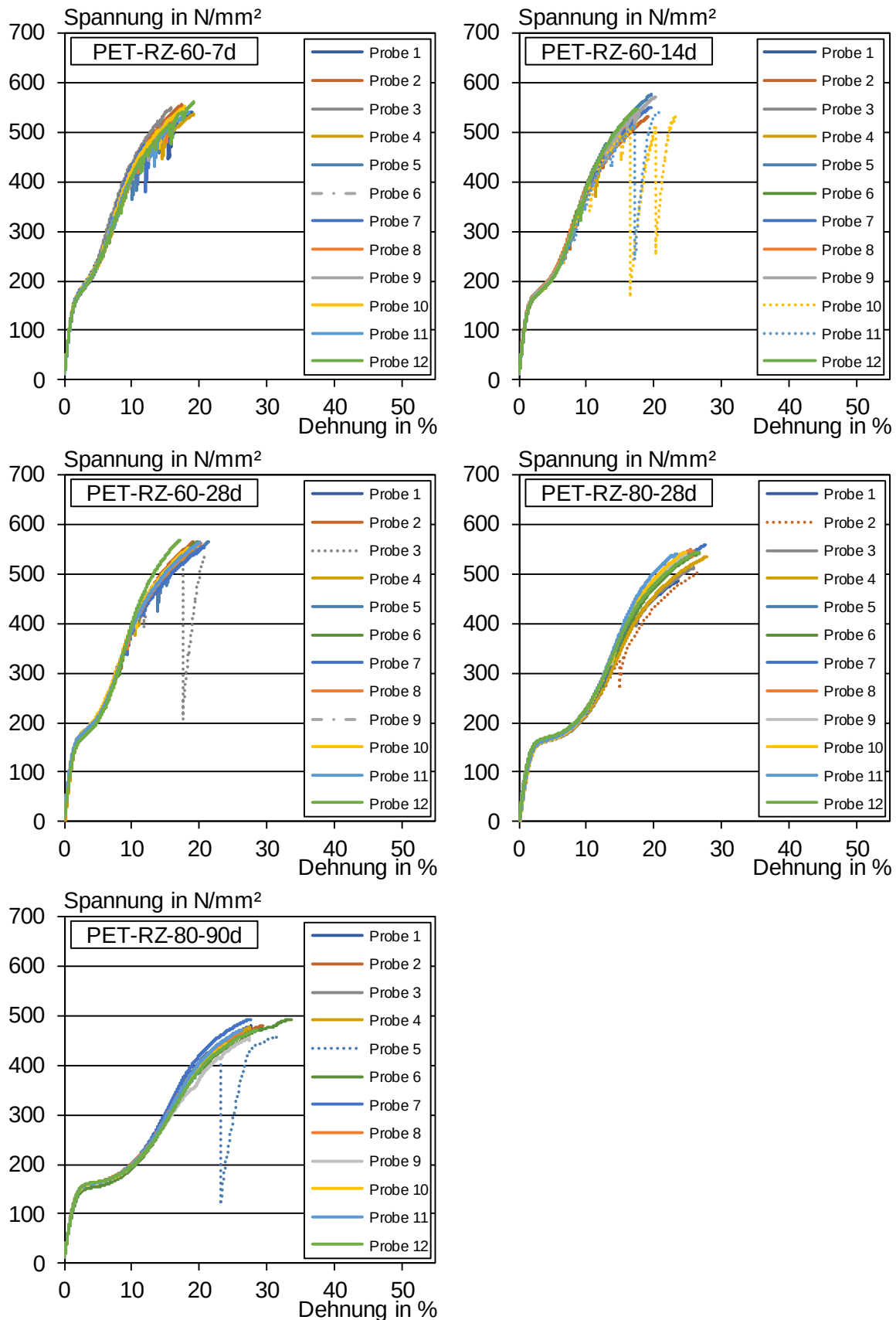


Bild B10: Ergebnisse der Restzugproben der Prüfserien der PET-Fasern, 7d bei 60 °C (oben links); 14d bei 60 °C (oben rechts); 28d bei 60 °C (mittig links); 28d bei 80 °C (mittig rechts); 90d bei 80 °C (unten)

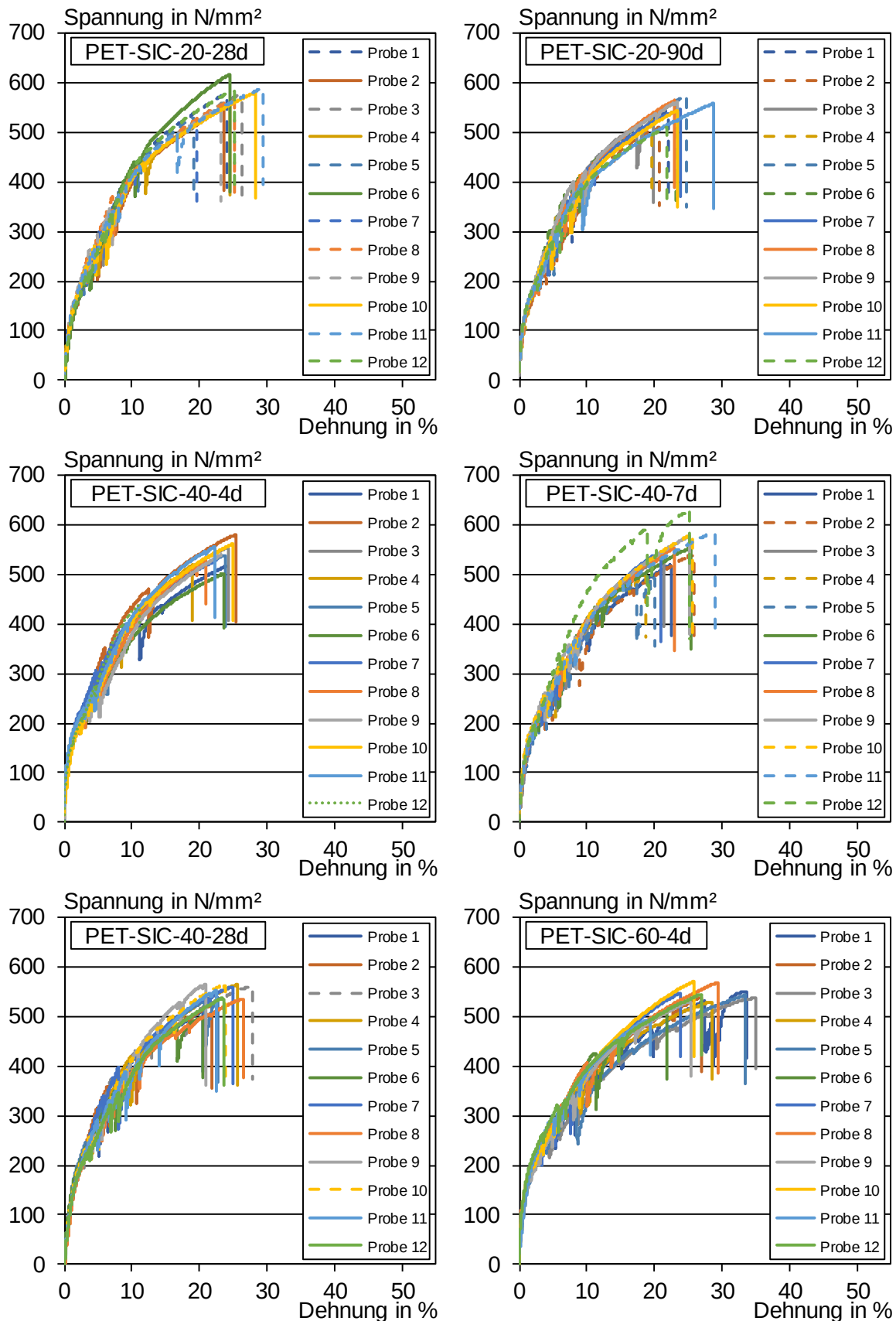


Bild B11: Ergebnisse der SIC-Proben der Prüfserien der PET-Fasern, 28d bei 20 °C (oben links); 90d bei 20 °C (oben rechts); 4d bei 40 °C (mittig links); 7d bei 40 °C (mittig rechts); 28d bei 40 °C (unten links); 4d bei 60 °C (unten rechts)

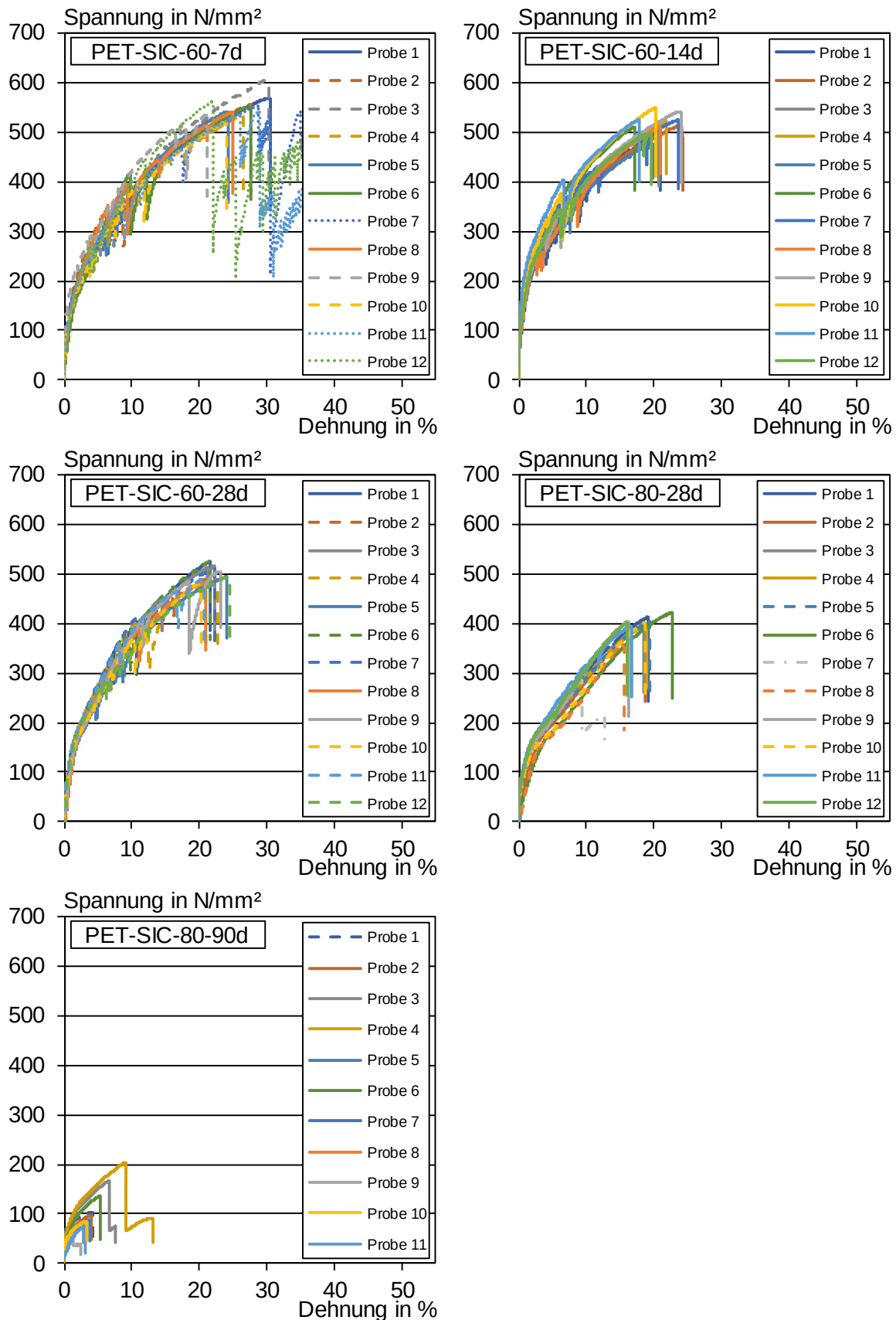


Bild B12: Ergebnisse der SIC-Proben der Prüfserien der PET-Fasern, 7d bei 60 °C (oben links); 14d bei 60 °C (oben rechts); 28d bei 60 °C (mittig links); 28d bei 80 °C (mittig rechts); 90d bei 80 °C (unten)

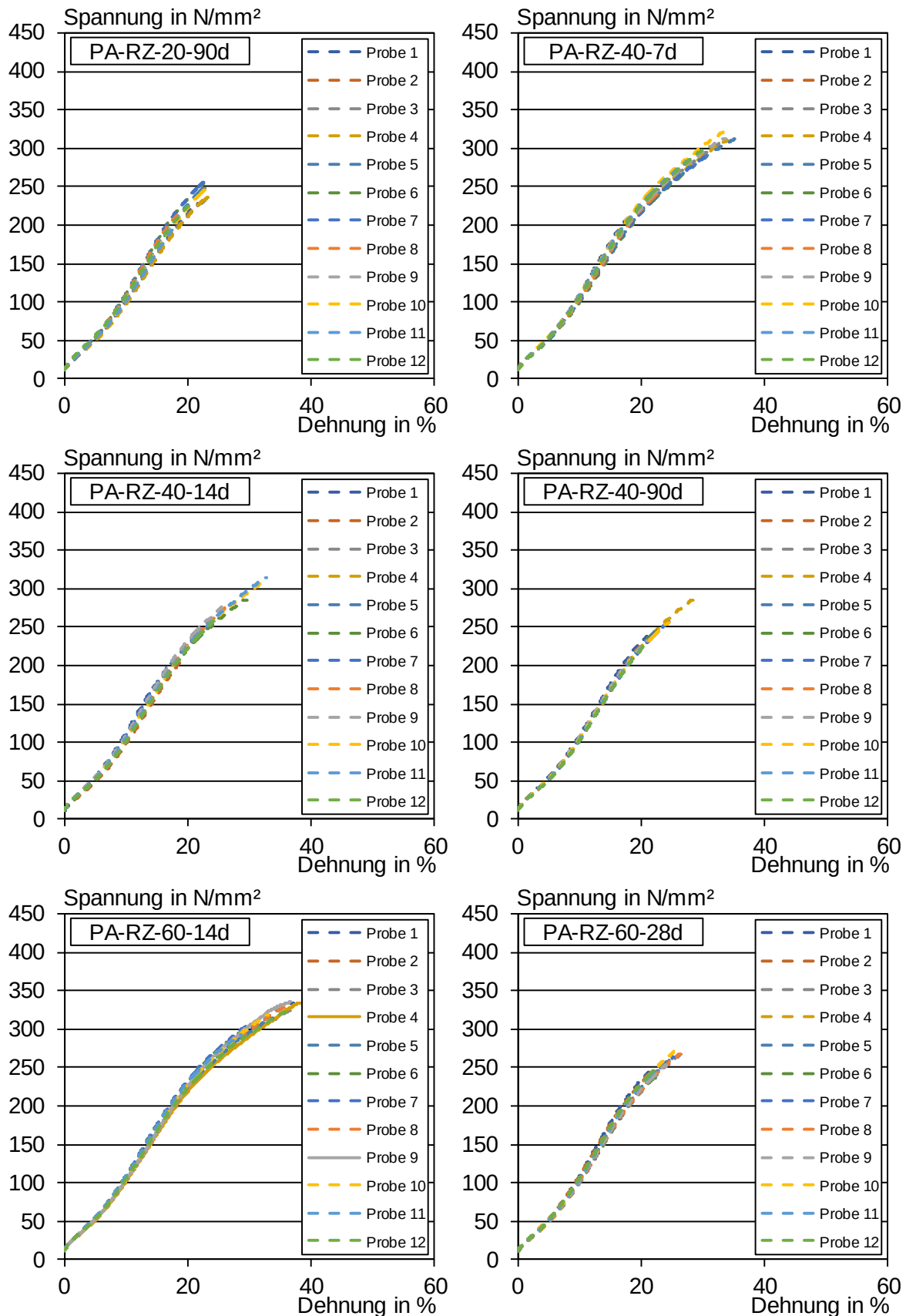


Bild B13: Ergebnisse der Restzugproben der Prüfserien der PA-Fasern, 90d bei 20 °C (oben links); 7d bei 40 °C (oben rechts); 14d bei 40 °C (mittig links); 90d bei 40 °C (mittig rechts); 14d bei 60 °C (unten links); 28d bei 60 °C (unten rechts)

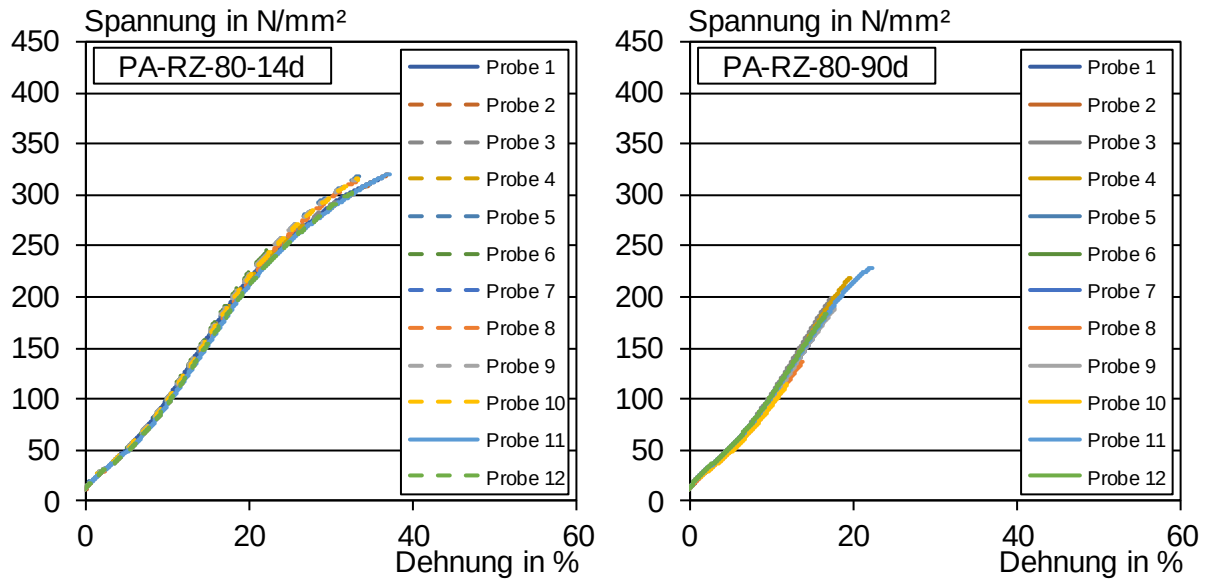


Bild B14: Ergebnisse der Restzugproben der Prüfserien der PA-Fasern, 14d bei 80 °C (links); 90d bei 80 °C (rechts)

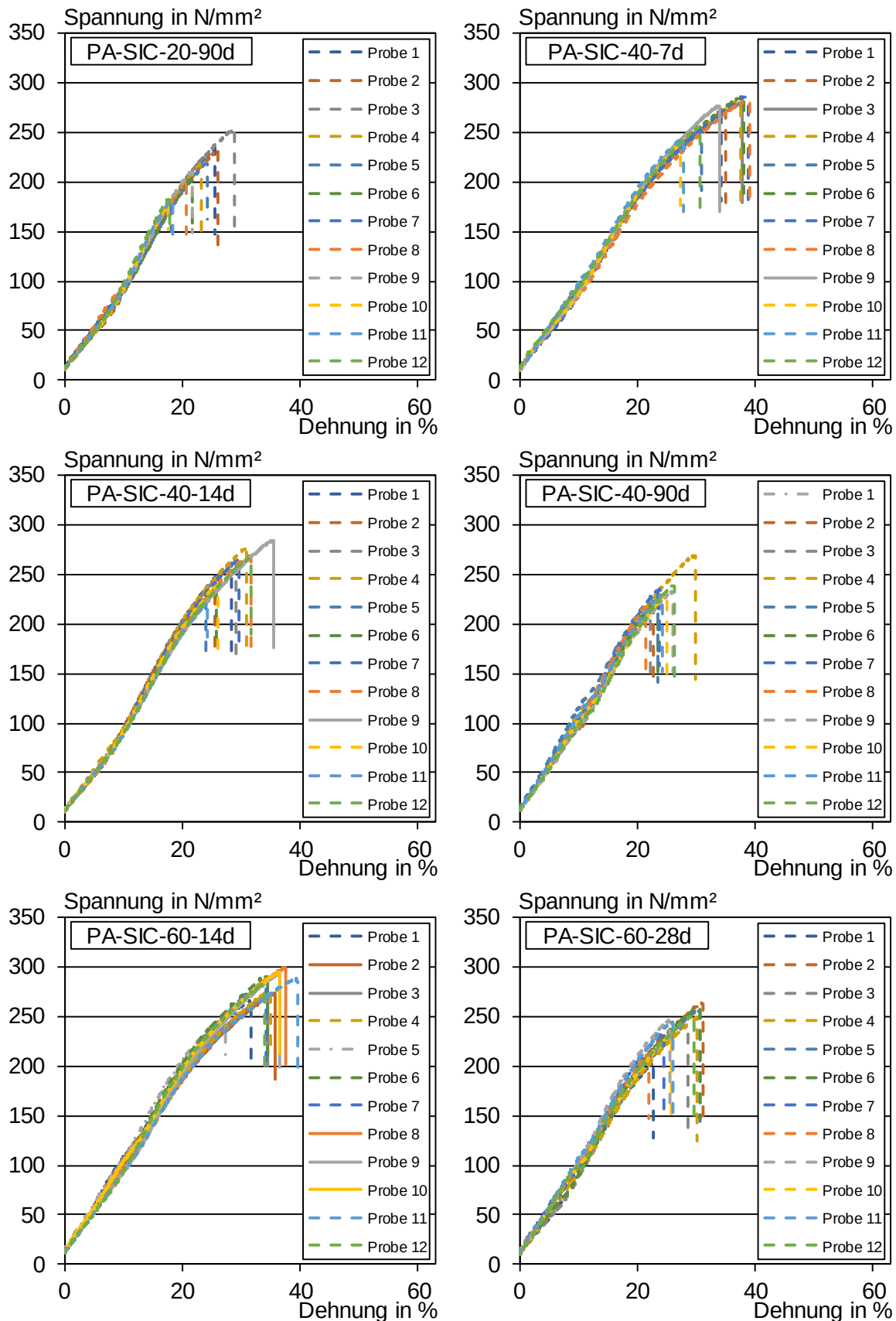


Bild B15: Ergebnisse der SIC-Proben der Prüfserien der PA-Fasern, 90d bei 20 °C (oben links); 7d bei 40 °C (oben rechts); 14d bei 40 °C (mittig links); 90d bei 40 °C (mittig rechts); 14d bei 60 °C (unten links); 28d bei 60 °C (unten rechts)

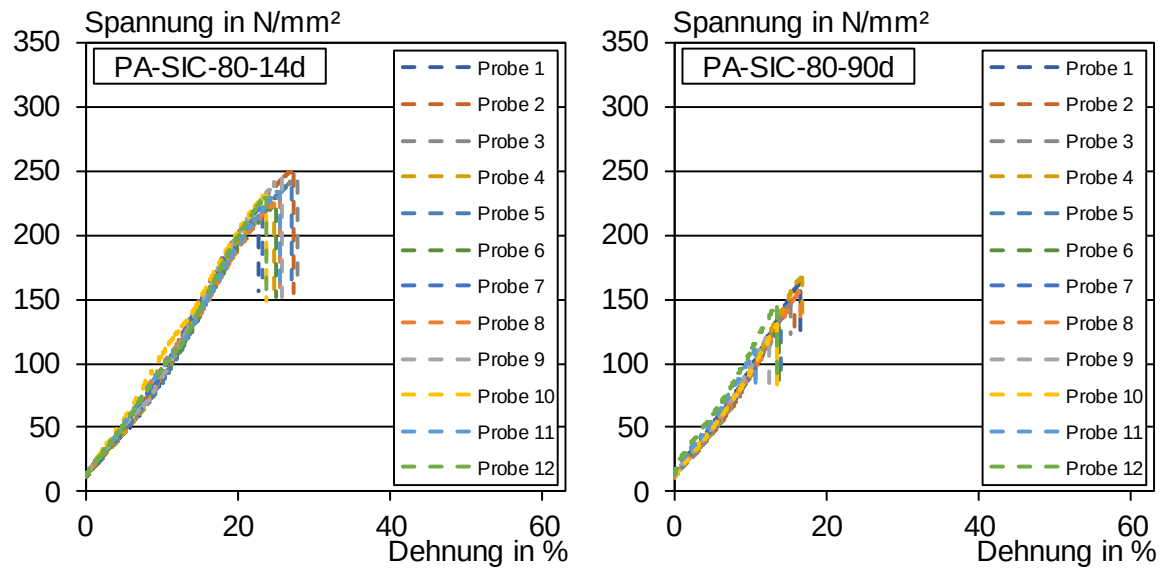


Bild B16: Ergebnisse der SIC-Proben der Prüfserien der PA-Fasern, 14d bei 80 °C (links); 90d bei 80 °C (rechts)

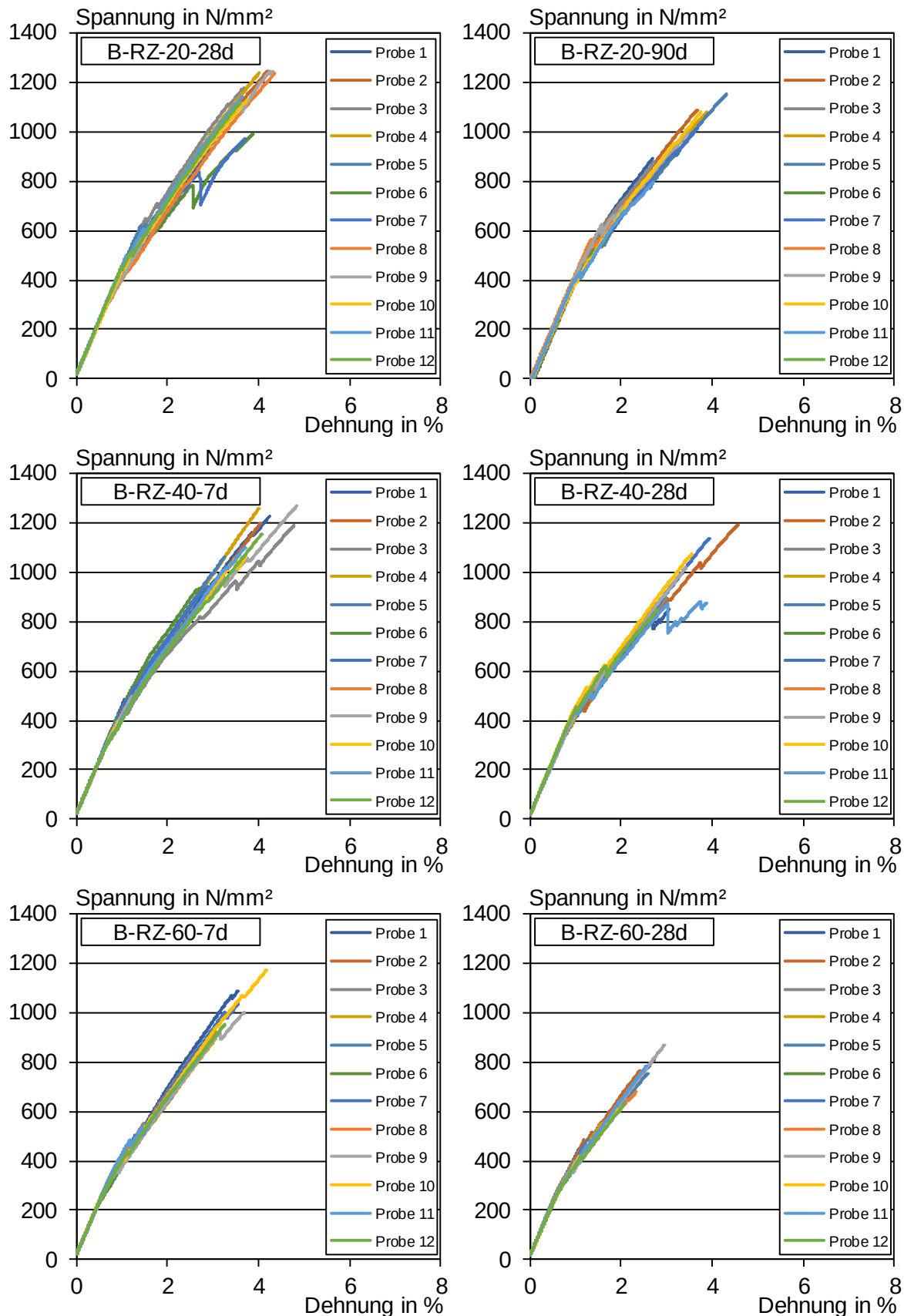


Bild B17: Ergebnisse der Restzugproben der Prüferien der Basaltfasern, 28d bei 20 °C (oben links); 90d bei 80 °C (oben rechts); 7d bei 40 °C (mittig links); 28d bei 40 °C (mittig rechts); 7d bei 60 °C (unten links); 28d bei 60 °C (unten rechts)

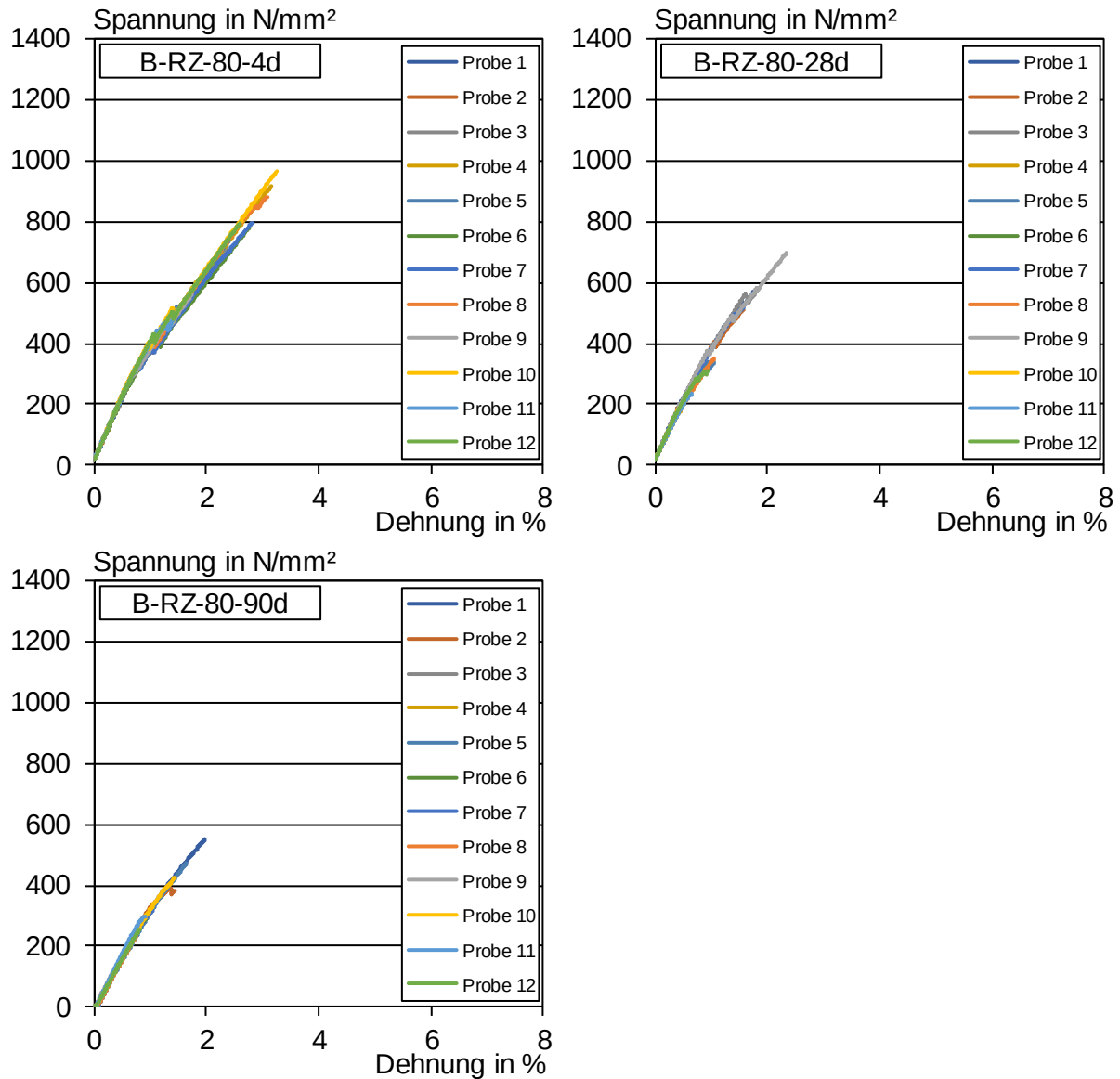


Bild B18: Ergebnisse der Restzugproben der Prüfserien der Basaltfasern, 4d bei 80 °C (oben links); 28d bei 80 °C (oben rechts); 90d bei 80 °C (unten)

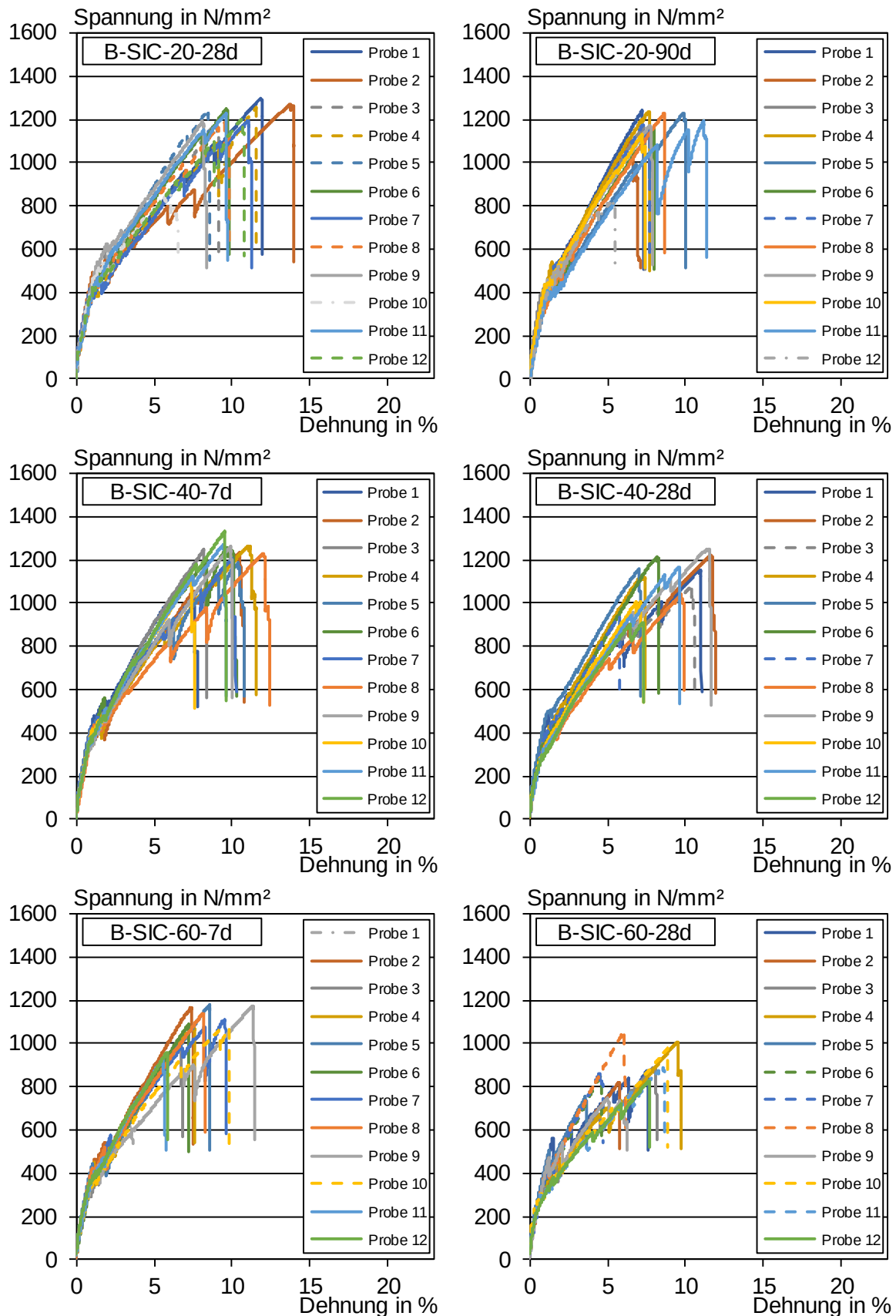


Bild B19: Ergebnisse der SIC-Proben der Prüferien der Basaltfasern, 28d bei 20 °C (oben links); 90d bei 20 °C (oben rechts); 7d bei 40 °C (mittig links); 28d bei 40 °C (mittig rechts); 7d bei 60 °C (unten links); 28d bei 60 °C (unten rechts)

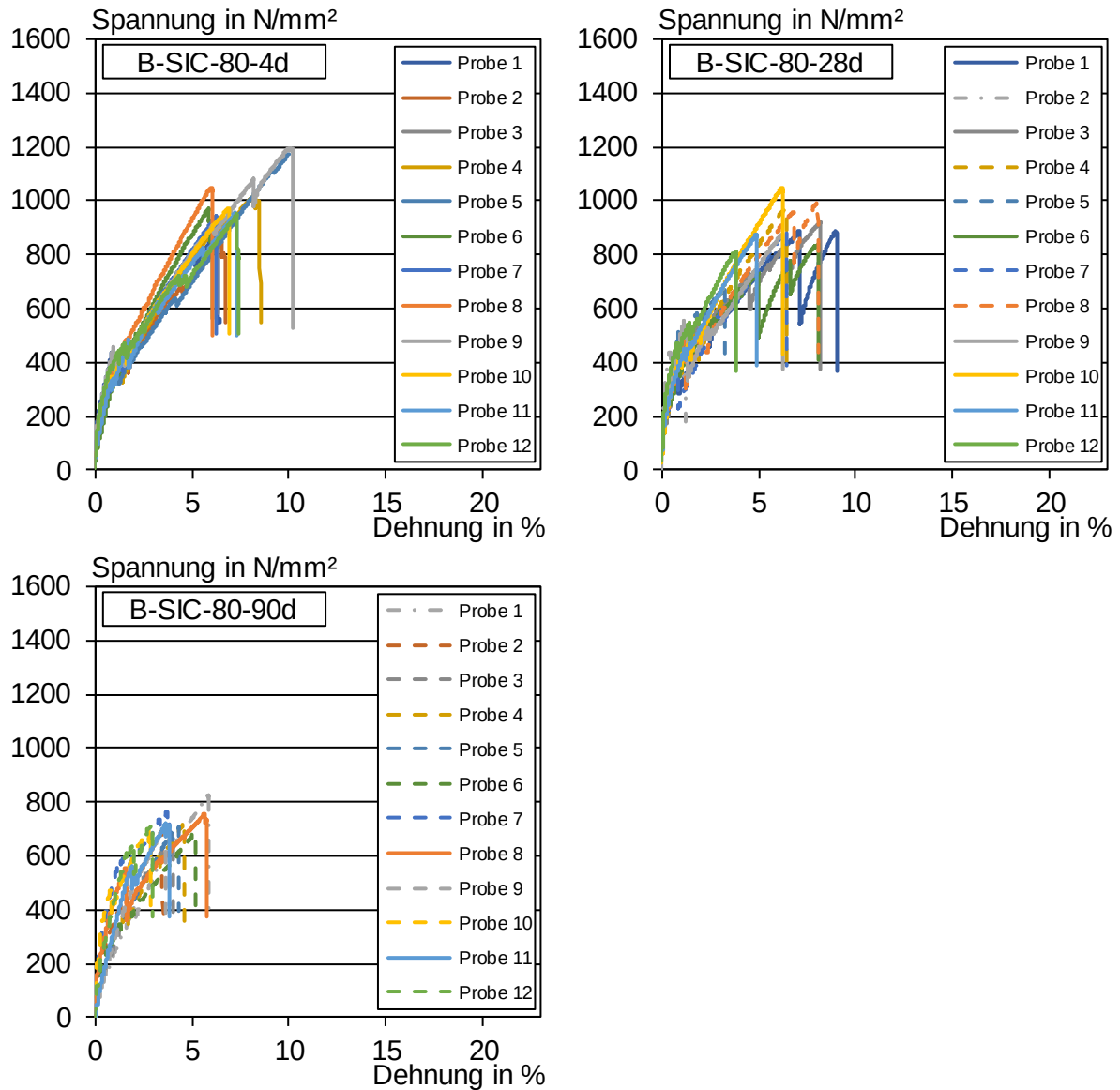


Bild B20: Ergebnisse der SIC-Proben der Prüfserien der Basaltfasern, 4d bei 80 °C (oben links); 28d bei 80 °C (oben rechts); 90d bei 80 °C (unten)