

Verbesserte Dehnungsmessung im Betonbau durch verteilte faseroptische Sensorik

Der Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik
der Technischen Universität Bergakademie Freiberg

genehmigte

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing)

vorgelegt

von M.Sc. Martin Weisbrich
geboren am 02.06.1987 in Karl-Marx-Stadt

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Thomas A. Bier, Freiberg
Prof. Dr.-Ing. Klaus Holschemacher, Leipzig

Tag der Verleihung: Freiberg, den 16.12.2020



Europäische Union



Europäischer Sozialfonds



Diese Maßnahme wird mitfinanziert
durch Steuermittel auf der Grundlage des
vom Sächsischen Landtag beschlossenen
Haushaltes.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als Promovend und wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Betonbau (IfB) an der Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig (HTWK Leipzig). Die Arbeit basiert auf einem kooperativen Promotionsverfahren mit der Technischen Universität Bergakademie Freiberg.

Diese Maßnahme wurde mitfinanziert durch Steuermittel auf Grundlage des von den Abgeordneten des Sächsischen Landtags beschlossenen Haushaltes, der HTWK Leipzig und des SMWK. Einige Inhalte und Ergebnisse dieser Arbeit wurden vorab veröffentlicht [130–132].

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Holschemacher, der die Forschungen an dieser Thematik überhaupt ermöglichte. Neben seiner Förderung und seinem Vertrauen möchte ich ihm für Rat, Diskussionsbereitschaft und konstruktive Kritik herzlich danken; vor allem auch für die Gelegenheit der persönlichen Weiterbildung.

Gleichermaßen danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas A. Bier für die Betreuung der Dissertation. Besonders für die Konsultationen, in denen er Unterstützung, Lob und Kritik an der Arbeit zum Ausdruck brachte.

Den Kollegen des Instituts für Betonbau und den Mitarbeitern des Labors und der Versuchshalle möchte ich für die großartige Hilfeleistung und Unterstützung danken. Insbesondere danke ich Herrn Dr.-Ing. Stefan Käseberg für seine unermüdliche Hilfsbereitschaft und die Initiierung des Dissertationsprojekts. Herrn Dennis Meßerer danke ich für seine Hilfe, Kameradschaft und Freundschaft.

Abschließend möchte ich meinen Eltern und meiner Familie danken, ohne deren Unterstützung ich diese Arbeit nicht hätte verwirklichen können. Vor allem meiner Frau Karoline danke ich für Vertrauen, Kritik und Rat.

Martin Weisbrich
Leipzig, 03.11.2020

Kurzfassung

Die verteilte faseroptische Sensorik (VFOS) auf Basis von Rayleighstreuung stellt ein besonderes und vielversprechendes Verfahren zur Dehnungsmessung im Betonbau und im Structural Health Monitoring (SHM) dar. Neben einer hohen Ortsauflösung und Messempfindlichkeit kann sie geringste Dehnungsänderungen an jedem Punkt der Messfaser erfassen. Für einen zuverlässigen Einsatz fehlen aktuell Material- und Handlungsempfehlungen; in der Literatur finden sich widersprüchliche Aussagen zu den Dehnungsübertragungsverlusten zwischen Substrat und Messfaser. Diesbezüglich beschäftigt sich die vorliegende Arbeit mit der Validierung des Messverfahrens für Szenarien im Betonbau. Neben der Applikation auf Stahl- und Betonoberflächen wurde die Integration in der Matrix untersucht. Im Zuge dessen sollten die Dehnungsübertragungsverluste verschiedener Fasercoatings bzw. Fasercoating-Klebstoff-Kombinationen überprüft werden. Darüber hinaus wurde ein Auswerteverfahren mithilfe der Programmiersprache PYTHON entwickelt, das eine automatisierte Datenaufbereitung und Substituierung der Messabweichungen der enormen Datenmengen ermöglicht.

Im Zuge der Validierung auf der Stahloberfläche wurden die Dehnungswerte der verschiedenen Coating-Klebstoff-Kombinationen an Präzisionsflachstählen im 4-Punkt-Biegeversuch mit einer photogrammetrischen Dehnungsmessung verglichen. Im Rahmen der Validierung auf der Betonoberfläche kamen Betondruckzylinder zum Einsatz, an denen zusätzlich zu den Coating-Klebstoff-Kombinationen der Einfluss einer Grundierung untersucht wurde. Induktive Wegaufnehmer dienten im Verlauf der Druckversuche als Vergleichsmesstechnik. Die Validierung verschiedener Coatingmaterialien in der Matrix fand anhand von Schwindversuchen an Betonprismen statt; als Vergleichsmessmethode dienten digitale Messuhren. Zur Bewertung der aus den Validierungsversuchen abgeleiteten Material- und Handlungsempfehlungen wurden Bauteilversuche an Betonbalken durchgeführt.

Die Auswertung der Validierungsversuche zeigte, dass vor allem mit einem ORMOCER®-Coating gute Ergebnisse hinsichtlich der Dehnungsübertragung erzielt werden konnten. Im Falle einer Applikation empfiehlt sich die Verwendung eines Cyanacrylatklebstoffs – besonders der M-BOND 200 überzeugte durch geringe Dehnungsverluste. Betonoberflächen sollten vorher geschliffen und mit Epoxidharz grundiert werden. Im Falle einer Integration in die Betonmatrix zeigten auch die ORMOCER®-Fasern minimale Unterschie-

de zur Vergleichsmessung. Die Ergebnisse der Bauteilversuche verifizieren die Handlungs- und Materialempfehlungen: Die Dehnungswerte der Fasern decken sich mit denen der analytischen Bemessung der Betonbalken. Lediglich an den Lasteinleitungsstellen konnten Oszillationen des Dehnungsverlaufs durch Gefügestörungen festgestellt werden.

Forschungsbedarf besteht v.a. hinsichtlich der Validierung weiterer Komponenten (Klebstoff, Coating, Grundierungsmittel) und deren Langzeitstabilität, insbesondere bei chemischen und dynamischen Beanspruchungen. Im Rahmen dieser Arbeit konnte ein Überblick über verschiedene Materialien geschaffen werden, jedoch ist das Repertoire an verfügbaren Komponenten immens, gerade bei den Klebstoffen. Bei der Validierung auf der Betonoberfläche und in der Matrix kam eine Feinkornbetonmischung zum Einsatz. Diesbezüglich sollten in weiteren Forschungen unterschiedliche Matrices und Korngrößen Untersuchungsgegenstand sein.

Abstract

Distributed fiber optic sensor (DFOS) technology based on Rayleigh scattering is a unique and promising method for strain measurement in concrete structures as well as structural health monitoring (SHM). It can detect the smallest strain changes at any point in the measuring fiber with a high spatial resolution and sensitivity. Currently, there exist no material and handling recommendations for a reliable application, and the literature contains contradictory statements on strain transfer losses between substrate and fiber. The present study deals with the validation of this measuring method for scenarios in concrete structures. Besides applications on steel and concrete surfaces, the integration in a concrete matrix was investigated. The validation yields results for strain transfer losses for different fiber coatings or fiber coating/adhesive combinations. Furthermore, the development of an evaluation method using the computer language PYTHON provides automated data preparation and measurement error substitution of the enormous data volumes.

For the validation on steel surfaces, the strain values of different coating-adhesive combinations on precision flat steels were compared in a 4-point bending test with a photogrammetric strain measurement. For the validation on concrete surfaces, concrete pressure cylinders were used to investigate the influence of a primer and different coating-adhesive combinations. Inductive displacement transducers served as a comparative measuring technique during the compression tests. Shrinkage tests allowed the validation of different coating materials in a matrix on concrete prisms. Digital dial gauges were used as a comparative measuring method. For evaluation purposes, the material and handling recommendations derived from the validation were tested on concrete beams.

The results of the validation tests indicate good results regarding strain transfer with an ORMOCER[®] coating. For application as tested, the use of a cyanoacrylate adhesive is recommended – especially M-BOND 200 was convincing due to its low strain losses. Concrete surfaces should be sanded and primed with epoxy resin. If integrated into a concrete matrix, the ORMOCER[®] fibers also showed minor differences from the comparative measurement. The results of the evaluation tests verify the handling and material recommendations: the strain values of the fibers correspond to the values obtained in concrete-beam analysis. Oscillations of the strain profile due to microstructural disturbances could only be detected at the load application points.

Further research regarding the validation of additional components (adhesives, coating, primer) and their long-term stability, especially chemical and dynamic loads, is necessary. This study provides an overview of different coating and adhesives. However, the repertoire of available components is immense – especially for adhesives. During the validation on concrete surfaces and in matrix, a fine-grained concrete mixture was used. In this respect, different matrices and grain sizes should be the subject of further research.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	2
1.2	Zielsetzung und Anwendungsszenarien	3
1.3	Abgrenzung	4
1.4	Aufbau und Gliederung	5
2	Grundlagen	7
2.1	Verfahren zur Dehnungsmessung	7
2.1.1	FOS zur Dehnungsmessung	9
2.1.2	Verteilte Dehnungsmessung mithilfe der Rayleighstreuung	12
2.2	Dehnungsübertragung auf FOS	16
2.2.1	Dehnungsübertragungsmodelle	16
2.2.2	Einflüsse auf die Dehnungsübertragung	19
2.3	Klebstoffe	22
2.3.1	Funktionsweise der Klebeverbindung	22
2.3.2	Einflüsse auf die Klebeverbindung	25
2.3.3	Vorbereitung der Klebestelle	28
2.3.4	Klebstoffarten	33
3	Stand der Forschung	37
3.1	Optische Fasern auf Stahloberflächen	37
3.2	Optische Fasern auf Betonoberflächen	39
3.3	Optische Fasern in Betonmatrices	41
3.4	Zusammenfassung und Forschungslücken	42
4	Methodik der Validierung	43
4.1	Applikation auf der Stahloberfläche	45
4.1.1	Prüfkörper, Prüfmaterialien	46
4.1.2	Vorbereitung der Probekörper, Applizierung der Messfaser	46
4.1.3	Versuchsaufbau und -ablauf	49
4.1.4	Vergleichsmesstechnik	52

4.2	Applikation auf der Betonoberfläche	52
4.2.1	Prüfkörper, Prüfmaterialien	52
4.2.2	Vorbereitung der Probekörper, Applizierung der Messfaser	52
4.2.3	Versuchsaufbau und -ablauf	54
4.2.4	Vergleichsmesstechnik	57
4.3	Integration in die Betonmatrix	57
4.3.1	Prüfkörper, Prüfmaterialien	58
4.3.2	Vorbereitung der Probekörper und Integration der Messfaser	58
4.3.3	Versuchsaufbau und -ablauf	58
4.3.4	Vergleichsmesstechnik	61
5	Auswertung und Ergebnisse	63
5.1	Aufbereitung der Rohdaten	64
5.2	Kongruenzanalyse	72
5.2.1	Applikation auf der Stahloberfläche	75
5.2.2	Applikation auf der Betonoberfläche	78
5.2.3	Integration in die Betonmatrix	85
5.3	Zusammenfassung der Ergebnisse	91
6	Diskussion der Versuchsergebnisse	93
6.1	Rohdatenaufbereitung	93
6.2	Applikation auf der Stahloberfläche	94
6.3	Applikation auf der Betonoberfläche	96
6.4	Integration in die Betonmatrix	99
6.5	Methodenkritik	101
6.5.1	Versuchsaufbau und Versuchsdesign	102
6.5.2	Stellenwert der Vergleichsmesstechnik	105
6.6	Forschungsbedarf	106
6.7	Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen	107
7	Bauteilversuche	111
7.1	Prüfkörper, Prüfaufbau und -ablauf	111
7.2	Versuchsnachrechnung, analytische Berechnung	113
7.3	Auswertung und Ergebnisse	116
7.4	Zusammenfassung Bauteilversuche	122
8	Zusammenfassung und Ausblick	123
8.1	Zusammenfassung	123

8.2 Ausblick	124
9 Literatur	127
A Applikation auf der Stahloberfläche	140
B Applikation auf der Betonoberfläche	148
C Integration in die Betonmatrix	155

Abbildungsverzeichnis

1.1	Schlupfbeziehung bei applizierten Fasersensoren nach [23]	2
1.2	Schlupfbeziehung bei integrierten Fasersensoren nach [134]	3
2.1	Methoden der Dehnungsmessung	9
2.2	Markttrend faseroptischer Sensoren nach [128]	10
2.3	Aufbau einer optischen Faser	11
2.4	Übersicht faseroptischer Technologien zur Dehnungsmessung nach [57] . .	11
2.5	Streuintensitäten der Rayleigh- und Brillouinstreuung in einer optischen Faser nach [4]	14
2.6	Prinzip des Mach-Zehnder-Interferometers bei der Frequenzbereichsreflektometrie nach [116]	15
2.7	Dehnungsübertragungsmodell nach [134]	18
2.8	Dehnungsübertragungsmodell nach [127]	19
2.9	Vergleich verschiedener Faser-Coating-Kombinationen in Abhängigkeit von der Bettungslänge L nach dem Dehnungsübertragungsmodell von [134] .	20
2.10	Vergleich verschiedener Faser-Klebstoff-Kombinationen in Abhängigkeit von der Bettungslänge L nach dem Dehnungsübertragungsmodell von [127]	21
2.11	Aufbau einer Klebeschicht	23
2.12	Prinzip der mechanischen Verklammerung	24
2.13	Erweitertes Modell zum Klebstoffaufbau nach [77]	25
2.14	Benetzungsrandwinkel nach [16]	26
2.15	Bereiche, die durch Alterung infolge äußerer Einflüsse geschädigt werden können	27
2.16	Schematischer Aufbau einer metallischen Oberfläche nach [107]	29
2.17	Schematischer Aufbau einer Betonoberfläche nach [98]	30
2.18	Schematischer Aufbau einer Betonoberfläche nach mechanischer Vorbehandlung und anschließender Grundierung	33
2.19	Kategorisierung von Klebstoffarten nach dem Abbindeverhalten gemäß [112]	34
4.1	Nomenklatur der Faserstränge und Probekörper	45
4.2	Aufbaumuster der Probekörperoberfläche im Bereich der Klebefuge	47

4.3	Probekörper der VSt mit applizierter Faser und Vergleichsmesstechnik . .	48
4.4	Optimale (links) und mangelhafte (rechts) Ausführung der Klebefuge nach [123]	49
4.5	(a) Biegemomenten- und Dehnungsverlauf des 4-Punkt-Biegeversuchs (VSt); (b) VSt mit photogrammetrischer Vergleichsmessung	50
4.6	Präzisionsflachstahl, Versuchsaufbau und Messtechnik (VSt)	50
4.7	Lasteinleitungsbereich, Validierungsbereich und Ausbauchen des Prüflinders (VBe)	55
4.8	Druckzylinder, Versuchsaufbau und Messtechnik (VBe)	56
4.9	Versuchsaufbau zur VBe mit induktiver Vergleichsmessung	57
4.10	(a) Schalung für die VMa mit vorgespannter Messfaser; (b) Fixierung mittels Teflonstreifen (VMa)	59
4.11	Versuchsaufbau und Messtechnik (VMa)	60
5.1	Gesamte Ergebnismatrix des Probekörpers VBe-A-2 ohne Rohdatenaufbereitung	65
5.2	Interpolationsintervall eines exemplarischen Validierungsversuchs für positive und negative Dehnungswerte	66
5.3	Vergleich verschiedener Interpolationsverfahren am Beispiel einer exemplarischen Dehnungskurve mit konstantem Verlauf	68
5.4	Vergleich verschiedener Interpolationsverfahren am Beispiel einer exemplarischen Dehnungskurve mit ansteigendem Verlauf	69
5.5	Interpolierte Ergebnismatrix des Probekörpers VBe-A-2 ohne Einteilung in relevante Bereiche (vereinfachte Darstellung mit reduzierter Anzahl an Dehnungswerten)	71
5.6	Interpolierte Ergebnismatrix des Probekörpers VBe-A2-MB-2 (Lastschritt 2, Klebstoff M-BOND 200)	72
5.7	Schematische Darstellung eines relevanten Ausschnittes der Ergebnismatrix eines Validierungsversuchs	74
5.8	Ausschnitte der Ergebnismatrix der VSt; a) Dehnungsverlauf eines Zeitpunkts im dritten Lastschritt VSt-O3-3; b) Lastverlauf Messpunkt 384 (VSt-O3-MB-3)	75
5.9	Gemittelte Vergleichswerte der VSt, getrennt nach Coating, Klebstoff und Lastschritt	76
5.10	Detaillierter Dehnungsverlauf der gemittelten Zeilenvektoren aller Probekörper je Coatingmaterial der Klebeverbindung M-BOND 200 im dritten Lastschritt (VSt-A _i -MB-3, VSt-P _i -MB-3, VSt-O _i -MB-3)	78

5.11	Ausschnitte der Ergebnismatrix der VBe; a) Dehnungsverlauf eines Zeitpunkts im dritten Lastschritt VBe-E-O1; b) Lastverlauf Messpunkt 480 (VBe-E-O1-MB-3)	80
5.12	Mittelwerte der Dehnungsquotienten q_{VBe} für alle Fasercoatings, getrennt nach Klebstoff, Lastschritt und Grundierungsmethode	84
5.13	Vergleich detaillierter Dehnungsverläufe ausgewählter Kombinationen im Zuge der VBe	85
5.14	Dehnungsverlauf der drei Versuchsreihen der VMa zum Zeitpunkt t_1 . . .	89
5.15	Dehnungsverlauf der drei Versuchsreihen der VMa zum Zeitpunkt t_2 . . .	90
6.1	Links: Verlauf der gemittelten Zeilenvektoren VSt-A-MB-3 und VSt-P-MB-3; rechts: Darstellung der näherungsweisen Bettungslängen der mittleren Dehnungsverläufe der Proben VSt-A-MB-3 und VSt-P-MB-3	96
6.2	Links: Verlauf der Zeilenvektoren VBe-A1-MB-2 und VBe-P2-MB-3; rechts: Darstellung der näherungsweisen Bettungslängen der Proben VBe-A1-MB-2 und VBe-P2-MB-3	99
6.3	Links: Verlauf der Zeilenvektoren VMa-A1 $_{t_1}$ und VMa-P1 $_{t_1}$; rechts: Darstellung der näherungsweisen Bettungslängen von der Zeilenvektoren VMa-A1 $_{t_1}$ und VMa-P1 $_{t_1}$	101
7.1	Probekörper für Bauteilversuche, Bewehrungsanordnung und Lage der Fasersensoren	112
7.2	Versuchsaufbau 3-Punkt-Biegeversuch, Lagerungsbedingungen und Lasteinleitung	113
7.3	Dehnungsverläufe der Messungen auf der Bewehrung im Vergleich zur maximalen Dehnung der analytischen Bemessung für die Lastschritte 1-6	118
7.4	Abplatzungen im Bereich der Lasteinleitung bei EBt-1	119
7.5	Dehnungsverläufe der Messungen auf der Betonoberfläche im Vergleich zur maximalen Dehnung der analytischen Bemessung für die Lastschritte 1-5	120
7.6	Dehnungsverläufe der Messungen in der Betonmatrix im Vergleich zur maximalen Dehnung der analytischen Bemessung für die Lastschritte 1-5	121
A.1	Vergleich der mittleren Dehnungskurven der einzelnen Klebstoffe und der dazugehörigen Vergleichsmessung im Lastschritt 1 (VSt)	142
A.2	Vergleich der mittleren Dehnungskurven der einzelnen Klebstoffe und der dazugehörigen Vergleichsmessung im Lastschritt 2 (VSt)	143
A.3	Vergleich der mittleren Dehnungskurven der einzelnen Klebstoffe und der dazugehörigen Vergleichsmessung im Lastschritt 3 (VSt)	144

Tabellenverzeichnis

2.1	Vergleich der Dehnungsmessmethoden nach [40, 85, 128]	13
2.2	Übersicht der Schädigungsmechanismen nach [112]	28
2.3	Eigenschaften ausgewählter Klebstoffarten nach [22, 60, 112]	36
4.1	Eigenschaften und Nomenklatur der verwendeten Fasermaterialien der Validierungsversuche	43
4.2	Übersicht der verwendeten Klebstoffe zur Applizierung der Fasersensoren (VSt,VBe)	44
4.3	Zusammensetzung der Betonmatrix innerhalb der VBe und VMa	45
4.4	Mechanische und physikalische Eigenschaften des Abdeckmittels (VSt)	48
4.5	Lastschritte der VSt sowie analytische Dehnung und Spannung im Probekörper	51
4.6	Probekörperbezeichnung und dazugehörige Coatingmaterialien (VSt)	51
4.7	Eigenschaften der beiden Grundierungssysteme nach [111, 122] (VBe)	54
4.8	Lastschritte der VBe sowie die dazugehörige Kraft	55
4.9	Probekörper für die VBe	56
4.10	Messzeitpunkte (VMa)	59
4.11	Probekörperbezeichnungen innerhalb der VMa	60
5.1	Vergleich der verschiedenen Interpolationsmethoden anhand der Mittelwerte und der Standardabweichungen in $\mu\epsilon$	70
5.2	Länge und Zeitabschnitte der Validierungsversuche	74
5.3	Gegenüberstellung der mittleren Vergleichswerte der VSt hinsichtlich photogrammetrischer und faseroptischer Dehnung, aufgeteilt nach Coating, Klebstoff und Lastschritt	77
5.4	Mittlere Quotienten q_{VSt} zu den Lastschritten 1-3	77
5.5	Mittlere Standardabweichung der Fasermessung im Validierungsbereich zu den Lastschritten 1-3 innerhalb der VSt	79
5.6	Gemittelter Vergleichswert der Fasermessung und Vergleichsmessmethode der VBe, getrennt nach Klebstoff und Lastschritt	81

5.7	Mittelwerte der Dehnungsquotienten q_{VBe} für alle Fasercoatings, getrennt nach Klebstoff, Lastschritt und Grundierungsmethode	83
5.8	Mittelwerte der Standardabweichung im Validierungsbereich der VBe für alle Fasercoatings, getrennt nach Klebstoff und Lastschritt	86
5.9	Mittelwerte der Dehnung und Standardabweichung im Validierungsbereich für alle Fasercoatings zu den Zeitpunkten t_1 und t_2 in $[\mu\epsilon]$	87
5.10	Mittelwerte der Dehnungsquotienten im Validierungsbereich für alle Fasercoatings zu den Zeitpunkten t_1 , t_2 und gemittelt.	88
6.1	Anzahl der Dehnungswerte vor und nach der Aufbereitung	94
6.2	Vorzugskombinationen aus Fasercoating, Klebstoff, Grundierung und die zugehörigen mittlere Dehnungsquotienten (q_{VSt} , q_{VBe} , q_{VMa}) für den jeweiligen Einsatzort der Bauteilversuche	109
7.1	Kraft- und Spannungswerte aus dem Druckversuch	114
7.2	Lastschritte, zugehöriges Moment in der Feldmitte und ermittelte Dehnung nach [83]	116
A.1	Mittelwerte der Zeilenvektoren der Acrylatfasern, getrennt nach Klebstoff und Lastschritt (VSt)	140
A.2	Mittelwerte der Zeilenvektoren der Polyimidfasern, getrennt nach Klebstoff und Lastschritt (VSt)	141
A.3	Mittelwerte der Zeilenvektoren der Ormocer [®] -Fasern, getrennt nach Klebstoff und Lastschritt (VSt)	141
A.4	Einzelwerte der Dehnungsquotienten der Acrylatfasern, getrennt nach Klebstoff und Lastschritt (VSt)	145
A.5	Einzelwerte der Dehnungsquotienten der Polyimidfasern, getrennt nach Klebstoff und Lastschritt (VSt)	145
A.6	Einzelwerte der Dehnungsquotienten der Ormocer [®] -Fasern, getrennt nach Klebstoff und Lastschritt (VSt)	146
A.7	Standardabweichung der Zeilenvektoren der Acrylatfasern, getrennt nach Klebstoff und Lastschritt (VSt)	146
A.8	Standardabweichung der Zeilenvektoren der Polyimidfasern, getrennt nach Klebstoff und Lastschritt (VSt)	147
A.9	Standardabweichung der Zeilenvektoren der Ormocer [®] -Fasern, getrennt nach Klebstoff und Lastschritt (VSt)	147
B.1	Nulllängen der Vergleichsmesstechnik in [mm] (VBe)	148

B.2	Einzelwerte der Dehnungsquotienten der Acrylatfasern, getrennt nach Klebstoff, Grundierung und Lastschritt (VBe)	149
B.3	Einzelwerte der Dehnungsquotienten der Polyimidfasern, getrennt nach Klebstoff, Grundierung und Lastschritt (VBe)	150
B.4	Einzelwerte der Dehnungsquotienten derOrmocer®-Fasern, getrennt nach Klebstoff, Grundierung und Lastschritt (VBe)	151
B.5	Standardabweichung der Zeilenvektoren der Acrylatfasern, getrennt nach Klebstoff, Grundierung und Lastschritt (VBe)	152
B.6	Standardabweichung der Zeilenvektoren der Polyimidfasern, getrennt nach Klebstoff, Grundierung und Lastschritt(VBe)	153
B.7	Standardabweichung der Zeilenvektoren derOrmocer®-Fasern, getrennt nach Klebstoff, Grundierung und Lastschritt (VBe)	154
C.1	Einzelwerte der mittleren Dehnungen und Standardabweichungen aller Probekörper, getrennt nach Fasertyp und Messzeitpunkt (VMa)	155

Bezeichnungen

Abkürzungen

2-K	Zwei-Komponenten
A	Acrylat-Coating
BOTDR	Brillouin Optical Time Domain Reflectometry
c-OFDR	coherent Optical Frequency Domain Reflectometry
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMS	Dehnungsmessstreifen
E	EPOXIDHARZ L/CL
E-Modul	Elastizitätsmodul
EA	LOCTITE EA 3420
EBt	Evaluiierung am Bauteil
FBG	Faser-Bragg-Gitter
FE	Finite-Elemente
FFT	Fast Fourier Transformation
FOS	Faseroptische Sensorik
HY	LOCTITE HY 4090
IFFT	Inverse Fast Fourier Transformation
IWA	Induktive Wegaufnehmer
L	LOCTITE 4902
LS	Lastschritt
LWL	Lichtwellenleiter
MB	M-BOND 200
MD	MD-MEGABOND 2000
MEMS	Mikro-elektronische-mechanische Systeme
MMA	Methylmethacrylat
O	Ormocer®-Coating
ODFR	Optical Frequency Domain Reflectometry
P	Polyimid-Coating
PEEK	Polyetheretherketon
ref	reference, Vergleichsmesstechnik
S	SIKADUR 330

SHM	Structural Health Monitoring
UV	Ultraviolett
VBe	Validierung auf Betonoberflächen
VFOS	Verteilte faseroptische Sensorik
VMa	Validierung in der Betonmatrix
VSt	Validierung auf Stahloberflächen

Große lateinische Buchstaben

C	Kalibrierungskonstante
E	Elastizitätsmodul, E-Modul
G	Schubmodul
K	Sensitivitätskoeffizient, Dehnungsübertragungskoeffizient
L	Bettungslänge
R	Interpolationssegmente
T	Temperatur
X	Datenmatrix

Kleine lateinische Buchstaben

$\vec{e}$	Vektoren innerhalb der Datenmatrix
a	Absolute Auflösung
b	Breite
c	Lichtgeschwindigkeit
d	Dicke
e	Elemente der Datenmatrix
h	Höhe
k^2	Spannungsübertragungsparameter
l	Länge
m	Steigung der Interpolationssegmente
p	Interpolationskoeffizienten
r	Radius
s	Standardabweichung
t	Zeit, Zeitpunkt, Zeitstempel
v	Frequenz, Poisson-Konstante, Querdehnzahl
w	Steigung eines Kurvenabschnittes innerhalb der Akimainterpolation
x	Messpunkteabstand

Griechische Buchstaben

Δ	Differenz einer physikalischen Größe
λ	Wellenlänge
$\bar{\lambda}$	Mittlere Wellenlänge
σ	Spannung
Θ	Benetzungsrandwinkel
ε	Dehnung

Indizes

a	Acrylat-Coating
co	Coating
c	engl. Concrete, Beton
f	Faser
int	Intervall
i	Laufindex
k	Klebstoff
m	Laufindex entlang der Faser
n	Laufindex des Zeitstempels
p	Polyimid-Coating
sub	Substrat
T	Temperatur
VBe	Validierung auf Betonoberflächen
VMa	Validierung in der Betonmatrix
VSt	Validierung auf Stahloberflächen
V	Validierung
v	Vergleichsmesstechnik
W	Werkstoff, Substrat
e	Dehnung

Große lateinische Buchstaben mit Indizes

C_T	Konstante der Temperaturkalibrierung
C_ε	Konstante der Dehnungskalibrierung
$E_{co,a}$	Elastizitätsmodul Acrylat-Coating
$E_{co,p}$	Elastizitätsmodul Polyimid-Coating
E_c	Elastizitätsmodul Beton
E_f	Elastizitätsmodul Faser

Bezeichnungen

G_{co}	Schubmodul Coating
X_{f}	Datenmatrix einer Fasermessung
X_{V}	Validierungsmatrix

Kleine lateinische Buchstaben mit Indizes

d_{k}	Klebstoffschichtdicke
r_{co}	Radius Coating
r_{f}	Äußerer Radius Glasfaser (Cladding und Kern)
s_{V}	Standardabweichung eines Validierungsbereichs im jeweiligen Lastschritt
v_{co}	Querdehnzahl Coating

Griechische Buchstaben mit Indizes

Δl_{min}	geringste Auflösung der Messuhren
$\Delta l_{\text{v,Vbe}}$	Längenänderung der Vergleichsmessung innerhalb der Validierung auf Betonoberflächen
σ_{c}	Spannung Beton
σ_{k}	Oberflächenspannung Klebstoff
σ_{Wk}	Spannung zwischen Werkstoff und Klebstoff
σ_{W}	Oberflächenspannung Werkstoff, Substrat
ε_{c}	Dehnung Beton
ε_{f}	Dehnung Faser
$\varepsilon_{\text{int,i}}$	Grenzen des Interpolationsintervalls
ε_{sub}	Dehnung Substrat
$a_{\text{v,VMa}}$	Absolute Auflösung der Vergleichsmessung innerhalb der Validierung in der Betonmatrix
$l_{\text{v,VBe}}$	Nulllänge der Vergleichsmessung innerhalb der Validierung auf Betonoberflächen

1 Einleitung

Die bauliche Infrastruktur im Gebäude- und Verkehrsbereich hat eine enorme gesellschaftliche Relevanz, und zwar sowohl im Hinblick auf die Funktionsfähigkeit des öffentlichen Lebens als auch den Ressourceneinsatz und die damit verbundenen ökonomischen und ökologischen Effekte. Vor diesem Hintergrund und auch angesichts aktueller Schadensereignisse (z.B. Brücken- und Dacheinstürze) kommt der Struktur- und Zustandsüberwachung von Bauwerken (engl. Structural Health Monitoring, SHM) seit einigen Jahren eine stetig wachsende Bedeutung zu [71]. Schlankere und flexible Bauweisen zur Ressourcenschonung, höhere Auslastungen mit unterschiedlicher zeitlicher Charakteristik verbunden mit angestrebten langen Lebensdauern und dem Einsatz moderner Baustoffe erfordern eine kontinuierliche Untersuchung und Überwachung des aktuellen Zustands. Das SHM findet nicht ausschließlich bei Neubauten Anwendung, sondern soll zukünftig auch bei der Bestandsüberwachung sanierter und unsanierter Bauwerke eingesetzt werden [12], woraus sich ein immenser Anwendungsbereich ergibt. Die Überwachung von Brücken, Boden, Wasser- oder Abwasserbauten, Straßen, Industriebauwerken und Hochbauten muss dabei nicht allein im kontinuierlichen Regelbetrieb erfolgen. Speziell im Zusammenhang mit Akutereignissen wie Sturm, Erdbeben oder Havarien ist eine adäquate und zuverlässige Überwachung essentiell notwendig. Aktuelle Entwicklungen im Zusammenhang mit dem Klimawandel und neu auftretende Sicherheitsrisiken mit bewusster Bauwerksschädigung verstärken diese Tendenz und lassen für die Zukunft wachsende Herausforderungen in der Breite erwarten. Innovative Messverfahren können zudem von umfangreichen Entwicklungen in der Informatik, der künstlichen Intelligenz, der Sensorik und Datenübertragung profitieren, die in den letzten Jahren zu verzeichnen waren und neue Optionen bieten.

Im Zusammenhang mit den Möglichkeiten von Fernüberwachung und Vernetzung werden Sensoren benötigt, die während der gesamten Nutzungsdauer im zu überwachenden Bauwerk verbleiben können und demzufolge möglichst kostengünstig sind. Die Datenabfrage erfolgt dabei nicht notwendigerweise kontinuierlich, was den Einsatz hochwertiger Messtechnik im Zusammenwirken mit preiswerten Sensoren erlaubt. Charakteristisch sind auch ausgedehnte zu überwachende Anordnungen bis in den Bereich von einigen hundert Metern oder Kilometern, wobei gleichzeitig eine hohe Ortsauflösung an kritischen Punkten bis in den Millimeterbereich möglich ist. All diese Anforderungen werden durch

die verteilte faseroptische Sensorik (VFOS) adressiert.

1.1 Problemstellung

Die Entwicklung der faseroptischen Sensorik (FOS) brachte in den letzten Jahren vielfältige Anwendungen hervor [128]. Darunter finden sich auch Messaufgaben im SHM des Bauwesens [9, 71, 84]. Vor allem die Methoden der VFOS, die auf Brillouin- und Rayleighstreuung basieren, sind dafür geeignet (Abschnitt 2.1.1).

Die VFOS bietet entscheidende Vorteile gegenüber etablierter Messtechnik. Jeder Bereich der Messfaser kann dabei zur Dehnungsmessung herangezogen werden [116]. Darüber hinaus lässt sich die optische Faser entweder auf das Bauteil aufkleben oder in diesem integrieren.

Die als Sensor nutzbaren optischen Faser sind ähnlich aufgebaut: Ein Fasermantel (Coating) schützt den empfindlichen Glaskern, der aus einem Cladding und einem Faserkern besteht (Abschnitt 2.1.1). Als Coating können verschiedene Materialien genutzt werden. Oftmals handelt es sich um Polymere wie Polyimid oder Acrylat [92]. Darüber hinaus existieren Kabelsensoren, die um das Coating mit einem zusätzlichen Schutzmantel ausgestattet sind [29]. Das Licht wird hauptsächlich durch den Kern geleitet, weshalb die Verformung im Faserkern der angezeigten Dehnung entspricht [23, 134]. Für eine adäquate Dehnungsübertragung vom Substrat auf den Faserkern sind dabei folgende Mechanismen entscheidend (Abbildung 1.1 und 1.2):

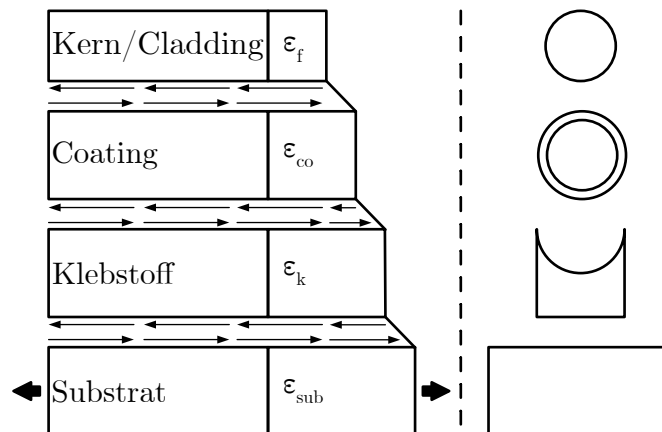


Abbildung 1.1: Schrupf Beziehung bei applizierten Fasersensoren nach [23]

- Schubverzerrungen zwischen Fasercoating und Fasercladding

- Schubverzerrungen zwischen Klebstoff/Matrix und Fasercoating (integrierte Sensoren: Abbildung 1.2)
- Schubverzerrungen zwischen Substrat und Klebstoff (applizierte Sensoren: Abbildung 1.1)

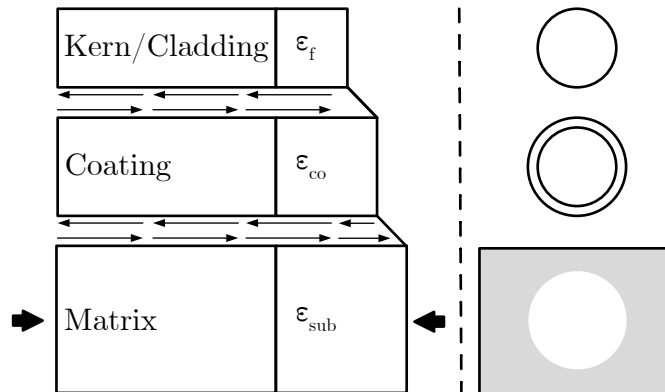


Abbildung 1.2: Schupf Beziehung bei integrierten Fasersensoren nach [134]

Die Mechanismen werden zum einen durch das Coating und dessen Dicke beeinflusst [23], zum anderen durch Art und Dicke des Klebstoffs, die Art und Weise der Vorbehandlung der Klebefuge, aber auch durch den Klebeprozess (Abschnitt 2.2.2). Bei einer Integration in die Betonmatrix ist zusätzlich zum Coatingmaterial die Betonzusammensetzung für die Dehnungsübertragung ausschlaggebend [134].

In der Literatur existieren widersprüchliche Angaben zu den Dehnungsübertragungsraten verschiedener Coatingmaterialien. Die Bandbreite der möglichen Abweichung von der Vergleichsmessung ist immens und liegt bei $\pm 40\%$ (vgl. Kapitel 3). Zur Anwendung auf druckbelastete Betonoberflächen liegen nur wenige Vergleichsmessungen vor; oftmals fehlen Informationen zum verwendeten Coating oder Klebstoff komplett.

1.2 Zielsetzung und Anwendungsszenarien

Für den Einsatz im SHM des Bauwesens, in großformatigen Versuchen oder zur Anwendung in der Forschung ist das Wissen über die Dehnungsübertragungsraten ausschlaggebend. Zusätzlich sind genaue Kenntnisse zu den Vor- und Nachteilen eines Messverfahrens entscheidend für dessen korrekte Anwendung. Ziel dieser Arbeit ist es daher, die VFOS auf

Basis der Rayleighstreuung für den Einsatz im Betonbau zu validieren. Die Dehnungswerte von drei verschiedenen Coatingmaterialien sollen mit einem Vergleichsmessverfahren in drei Anwendungsszenarien validiert werden:

- Applikation auf Stahloberflächen für den Fall einer Dehnungsmessung auf zugbeanspruchten Betonstahlbewehrung (VSt)
- Applikation auf druckbelasteten Betonoberflächen (VBe)
- Integration in druckbelastete Betonmatrices (VMa)

Für die beiden Szenarien mit auf Stahl- oder Betonoberflächen applizierten Sensoren sollen sechs unterschiedliche Klebstoffe zum Einsatz kommen, um ihre Dehnungsübertragungseigenschaften zu überprüfen. Für Fasersensoren, die auf der Betonoberfläche appliziert werden, umfasst die Validierung zusätzlich eine Analyse unterschiedlicher Vorbehandlungsmaßnahmen. Die Versuche zur Integration in der Betonmatrix werden mithilfe einer hochfesten Feinkornbetonmatrix durchgeführt.

1.3 Abgrenzung

Diese Arbeit bezieht sich allgemein auf die Dehnungsübertragungseigenschaften von Singlemode-Glasfaser mit einem einlagigen Coating unter statischer Belastung. Darüber hinaus werden die Versuche bei konstanten klimatischen Bedingungen durchgeführt; eine temperaturabhängige Analyse der Dehnungsübertragung ist nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchungen. Die Auswahl an Epoxidharzen und Klebstoffen ist enorm, weshalb sich auf einige für Messtechnik spezialisierte Produkte beschränkt wurde.

Die vorliegenden Versuche bieten einen Ausgangspunkt für weitere Untersuchungen mit der VFOS auf Basis der Rayleighstreuung. Diesbezüglich sind Abgrenzungen hinsichtlich der Validierung notwendig, die sich auf folgende Punkte beziehen:

- Innerhalb der VSt führte die Belastung nicht zum Überschreiten der Streckgrenze.
- Die Höchstlast im Zuge der VBe beträgt ca. 60 % der maximalen Druckfestigkeit.
- In Bezug auf die VMa und VBe wurde die Betonmatrix nicht variiert.
- Zur Sicherstellung eines ausreichenden Verbunds zwischen Betonmatrix und Faser begann die Messung innerhalb der VMa nach 24 Stunden Aushärtung.

1.4 Aufbau und Gliederung

Die vorliegende Arbeit bietet in Kapitel 2 eine Einordnung faseroptischer Dehnungsmessung in bisher etablierten Dehnungsmessverfahren. Neben einer kurzen Einführung in die VFOS mittels Rayleighstreuung wird die Dehnungsübertragung FOS detaillierter dargestellt und die relevanten Modelle erläutert. Daraus ergeben sich die Einflüsse auf die Dehnungsübertragung und die aus Sicht des Autors besonders relevanten Ausführungen zu den Klebstoffen, die für zwei der drei Anwendungsszenarien immanent sind.

Während Kapitel 3 den Stand der Forschung zu den drei erwähnten Anwendungsszenarien und die daraus resultierenden Forschungslücken darstellt, vermittelt Kapitel 4 den Aufbau und Ablauf der Validierungsversuche.

In Kapitel 5 und 6 wird die Aufbereitung der Versuchsdaten und deren Auswertung vorgestellt sowie die Ergebnisse kritisch hinterfragt. Neben einer Gegenüberstellung mit dem Forschungsstand finden sich Erläuterungen zu einzelnen Messergebnissen.

Auf Basis der Ergebnisse und Diskussion der Validierungsversuche werden Handlungsempfehlungen für eine Evaluierung durch Versuche an Betonbalken festgelegt und in Kapitel 7 vorgestellt. Die wesentlichen Erkenntnisse und Schlussfolgerungen aus allen Versuchen und Auswertungen finden sich in Kapitel 8.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Grundlagen für die nachfolgend angewandten Untersuchungsmethoden dargestellt. Dabei geht es insbesondere um allgemeine Informationen zur Dehnungsmessung und deren Messmethoden, Grundlagen in Bezug auf die FOS und speziell zur verteilten Messung mittels Rayleighstreuung. Ausgehend von zwei analytischen Modellen werden die Parameter beschrieben, die die Dehnungsübertragung vom Messobjekt auf die Faser beeinflussen. Da die Klebefuge von oberflächenapplizierten Fasersensoren essentiell für die Dehnungsübertragung ist, behandelt ein dritter Abschnitt die Grundlagen von Klebstoffen und die Vorbehandlung der in dieser Arbeit genutzten Werkstoffoberflächen. Schlussendlich werden die Eigenschaften der für die Messtechnik infrage kommenden Klebstoffe näher dargestellt.

2.1 Verfahren zur Dehnungsmessung

Die Eingliederung der FOS in die Liste der gebräuchlichsten Dehnungsmessverfahren im Bauwesen zeigt Abbildung 2.1. Diesbezüglich finden sich im anschließenden Abschnitt allgemeine Informationen zur Dehnungsmessung und den wichtigsten Messmethoden. Darauf aufbauend wird explizit auf die FOS eingegangen. Nach der allgemeinen Beschreibung und dem Funktionsprinzip wird der Aufbau der verwendeten Lichtwellenleiter (LWL) dargestellt, die beiden Messprinzipien erläutert und die Hauptvertreter vorgestellt. Im anschließenden Abschnitt 2.1.2 geht es um die verteilt messenden Sensoren und eine detaillierte Beschreibung der VFOS auf Basis der Rayleighstreuung.

Heutzutage gibt es eine Vielzahl von unterschiedlichen Messmethoden, um Dehnungen an Werkstoffen und Bauteilen zu bestimmen. Die dafür eingesetzten Sensoren sollen die durch Belastung auftretenden Verformungen messen und können grob in zwei Hauptkategorien eingeteilt werden: indirekt und direkt messende Sensoren (Abbildung 2.1). Während die indirekten Messverfahren die Verformungen des Versuchskörpers beispielsweise über dessen Durchbiegung oder Längenänderung ermitteln, erfassen die direkten Messverfahren die Dehnungen unmittelbar an Ort und Stelle ihrer Applikation.

Indirekte Messverfahren

- **Induktive Wegaufnehmer** (IWA) zählen zu den robusten und weit verbreiteten Hauptvertretern der indirekten elektrischen Messverfahren. Dabei misst ein induktiver Sensor die Veränderung der Induktivität einer Spule. Ein metallischer Kern bewegt sich mittels eines Tauchankers in dieser Spule, was zur Änderung des elektrischen Signals und damit zu einer angezeigten Längenänderung führt.
- Bei der **Photogrammetrie** nehmen Hochleistungskameras die Oberfläche des Untersuchungsgegenstands optisch auf [7, 121]. Der nachgelagerte Postprozess ermittelt die Längenänderung bezogen auf vorher aufgebrachte Muster oder Messpunkte. Je nach Anzahl der verwendeten Kameras lassen sich Verschiebungen in alle Ebenen messen.
- Verformungen lassen sich mechanisch mithilfe von **Messuhren** bestimmen. Hierbei wird die Längendifferenz über einen Taster gemessen, der die Messbewegungen auf eine Zahnstange und Zahnräder überträgt [102]. Die Längenänderungen lassen sich digital oder analog anzeigen.

Direkte Messverfahren

- Hauptvertreter der direkten Messmethoden sind die **Dehnungsmessstreifen** (DMS), die zu den elektrischen Messverfahren zählen [57]. Das auf einer Trägerfolie befestigte Messgitter dient als Widerstand, dessen Spannungsänderung mithilfe einer Wheatstone'schen Brückenschaltung an einen Messverstärker weitergegeben wird [74]. DMS werden direkt auf die Oberfläche des Bauteils geklebt und messen dort die auftretenden Dehnungsänderungen.
- **Schwingsaitenaufnehmer** werden vermehrt in der Bauwerksüberwachung als direktes elektrisches Messverfahren eingesetzt [67]. Die Dehnungsmessung mittels Schwingsaiten beruht auf einer Eigenfrequenzänderung durch Ausdehnung oder Stauchung einer eingespannten, transversal schwingenden Saite [90]. Die Aufnehmer werden dabei auf Stahloberflächen geschweißt oder in die Betonmatrix integriert.
- Bei den **Mikroelektronischen-mechanischen Systemen** (MEMS) handelt es sich um kleine Bauteile, die elektrische Informationen verarbeiten. Neben der Dehnung lassen sich noch weitere Messgrößen wie beispielsweise Beschleunigung oder Druck erfassen [85]. Die Dehnungsmessung mittels MEMS beruht auf piezoresistiven Effekten von Kristallen wie Silizium [113]. Ähnlich wie bei den DMS werden MEMS auf die Bauteiloberfläche appliziert.

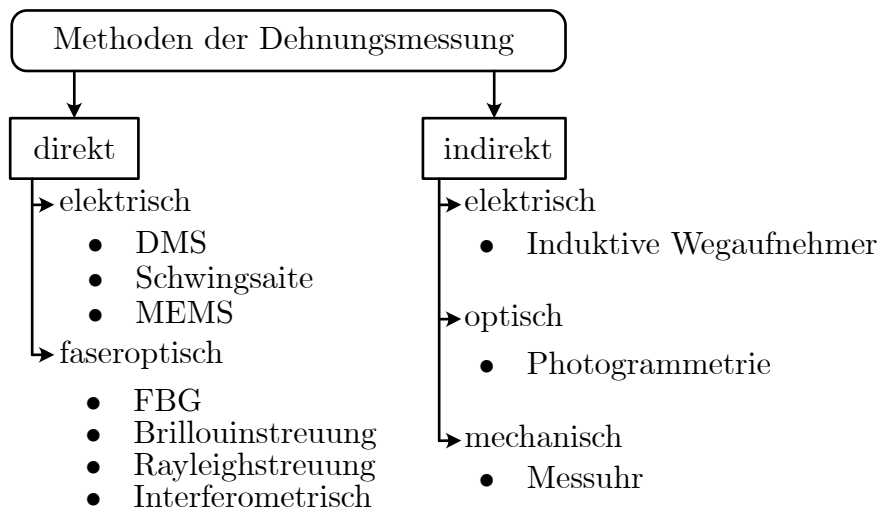


Abbildung 2.1: Methoden der Dehnungsmessung

In Hinblick auf FOS beschränkt sich diese Arbeit auf eine Auswahl der für die Dehnungsmessung wichtigsten Verfahren, die im nachfolgenden Abschnitt gesondert dargestellt werden.

2.1.1 FOS zur Dehnungsmessung

Bei FOS handelt es sich um Lichtwellenleiter, oftmals Glasfasern, in denen optische Signale übertragen oder gemessen werden. Eine Lichtquelle sendet dabei ein Lichtsignal in die Glasfaser, das durch verschiedene äußere Einflüsse seine Parameter verändert. Die Messung der Veränderung der Parameter des eingesetzten Lichts führt zum gewünschten Messwert. Bei den veränderten Lichteigenschaften handelt es sich oftmals um die Wellenlänge, deren Änderung mithilfe eines Spektrometers gemessen wird. Daneben können die Polarisation, die Intensität oder die Laufzeit als Messsignale dienen [97].

Die FOS hat ihren Ursprung in der Entwicklung der Telekommunikation auf Basis optischer Fasern in den 1970er Jahren [9]. Mit der Bereitstellung von verlustfreien optischen Fasern in den frühen 1980er Jahren wurde der Grundstein für die Forschung an FOS gelegt [48, 128]. Dennoch verlief die Marktetablierung faseroptischer Sensorsysteme sehr langsam [9]. Der Grund dafür waren die hohen Kosten bei gleichzeitiger geringer Leistungsfähigkeit der Komponenten [128]. Abbildung 2.2 zeigt Gründe für den Entwicklungsschub in der faseroptischen Messtechnik der letzten 10 Jahre: Marktetablierung durch die Verbesserung der Qualität der einzelnen Komponenten, Verfügbarkeit sowie erweiterte Produktpalette bei simultaner Kostenreduktion.

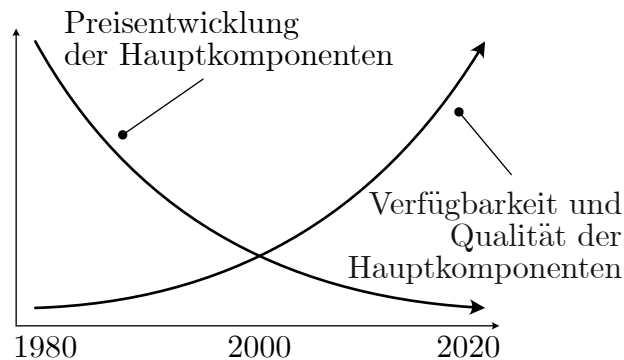


Abbildung 2.2: Markttrend faseroptischer Sensoren nach [128]

In diesem Zusammenhang haben sich zwei Messprinzipien etabliert: extrinsische und intrinsische Sensoren [117]. Im Kontext von extrinsischen Sensoren dient der LWL als Überträger des Sensorsignals, das außerhalb des Lichtwellenleiters beeinflusst wird. Eine faseroptische Lichtschranke ist ein einfaches Beispiel eines extrinsischen FOS. Bei intrinsischen Sensoren dient der Lichtwellenleiter dagegen gleichzeitig als Sensor: Durch die Manipulation des Lichtwellenleiters treten veränderte Lichteigenschaften hervor, die als Sensorsignale interpretierbar sind. Alle in Abbildung 2.1 dargestellten FOS sind intrinsische Sensoren, auf die im Folgenden näher eingegangen wird.

Viele FOS, die zur Dehnungsmessung verwendet werden, nutzen die Wellenlänge des Lichts als Messsignal. Hierfür schleust ein durchstimmbarer Laser oder eine Breitbandquelle ein optisches Lichtsignal in den LWL [116]. Der LWL besteht grundsätzlich aus Faserkern, Fasercladding und Fasercoating (Abbildung 2.3). Das Licht kann sich in dem aus Glas bestehenden Faserkern nahezu ungehindert ausbreiten, der somit zur Übertragung des Lichtsignals dient. Mithilfe des ebenfalls aus Glas bestehenden Fasercladdings, der einen niedrigeren Brechungsindex besitzt, wird das Lichtsignal den Faserkern entlang geführt [128]. Ein umliegendes Fasercoating aus Metall oder Kunststoff schützt die Glasfaser vor ungewollter Beschädigung [92]. Bei einer typischen für Fasersensoren verwendeten Singlemode-Glasfaser kann der Durchmesser des Faserkerns zwischen $4\text{ }\mu\text{m}$ und $9\text{ }\mu\text{m}$ variieren. Fasercladding und Fasercoating umschließen den Faserkern mit einem Durchmesser von beispielsweise $155\text{ }\mu\text{m}$ bzw. $242\text{ }\mu\text{m}$. Auch hierbei sind Variationen möglich.

Abbildung 2.4 zeigt eine Auswahl der wichtigsten faseroptischen Sensoren, die vorwiegend zur Messung von Dehnungen im Bauwesen angewendet werden [57]. Je nach Messmethode lassen sie sich in drei Hauptkategorien einteilen:

- Gitterbasierte Methoden

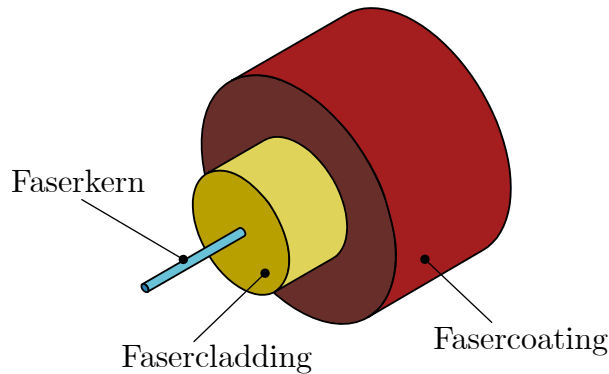


Abbildung 2.3: Aufbau einer optischen Faser

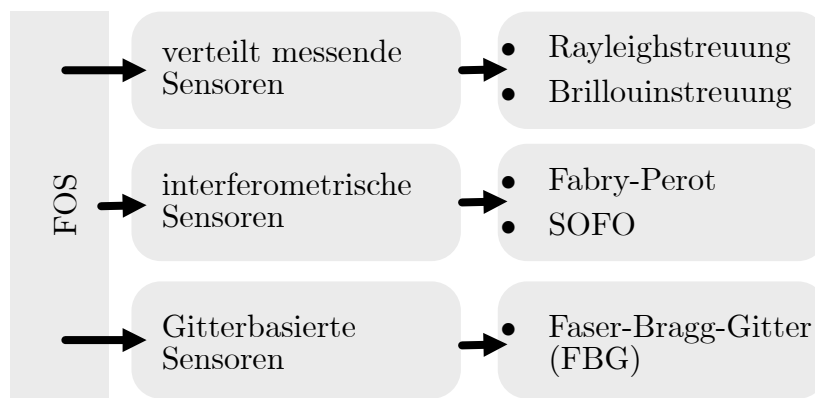


Abbildung 2.4: Übersicht faseroptischer Technologien zur Dehnungsmessung nach [57]

- Interferometrische Sensoren
- Verteilt messende Sensoren

Die bisher wohl am häufigsten eingesetzten FOS sind Faser-Bragg-Gitter-Sensoren (FBG), die zu der gitterbasierten Klasse zählen [43, 89]. FBG nutzen durch UV-Licht eingeschriebene optische Interferenzfilter, die Wellenlängen innerhalb einer spezifischen Filterbandbreite reflektieren [73]. Ein Spektrometer misst die zurückgeworfene Wellenlängenänderung $\Delta\lambda$, die durch eine Verformung der Faser entsteht, deren Ursprung mechanisch und/oder temperaturabhängig sein kann. In eine Faser können mittlerweile mehrere Bragg-Gitter eingeschrieben werden, sodass eine quasi verteilte Messung entlang der Faser möglich ist [43].

FOS haben einige herausstechende Vorteile gegenüber den in Abbildung 2.1 aufgeführ-

ten Messverfahren, v.a. gegenüber den etablierten DMS. So sind sie dielektrisch und somit resistent gegenüber elektromagnetischer Strahlung [116]. Aufgrund ihrer Beständigkeit in aggressiven chemischen Umgebungsbedingungen können sie in Baustoffmatrizen eingebunden werden [59, 116, 128]. Je nach Coatingmaterial lassen sich FOS bei Temperaturen bis zu 600 °C verwenden [50]. Da optische Fasern kein Licht nach außen abstrahlen, ist es nicht möglich Informationen abzufangen. Besonders in Bezug auf Cybersicherheit spielt dieser Aspekt eine wichtige Rolle. Verteilte Messmethoden, wie die zur Brillouin- und die Rayleighstreuung, können Dehnungen entlang der gesamten Faser wiedergeben. Mithilfe der Rayleighstreuung lassen sich Faserlängen bis zu 70 m erreichen, bei einer Ortsauflösung von 1 mm [116]. Mittels Brillouinstreuung sind dagegen Messlängen von mehreren Kilometern möglich mit einer Ortsauflösung im Zentimeterbereich [79, 106, 125].

Nachteilig sind v.a. die hohen technologischen Anforderungen und die damit einhergehenden Kosten der messtechnischen Komponenten – selbst wenn die Kosten für den Fasersensor niedrig sind [40, 85]. Weitere Nachteile sind die Verbindungstechniken und -verfahren: Der Spleißprozess ist aufwändig, fehleranfällig und kann das Messergebnis beeinflussen [40]. Gleiches gilt für alle Aspekte hinsichtlich der Faserapplikation und -integration. Die optischen Fasern selbst sind für den Einsatz im Bauwesen angesichts von LWL, die nur durch ein Coating geschützt sind, empfindlich gegenüber mechanischer Einwirkung und können schnell brechen. Die anfallende Datenmenge ist bei verteilt messenden Verfahren enorm und benötigt eine entsprechende Aufbereitung und in der Folge eine hohe Expertise des Anwenders.

Tabelle 2.1 vergleicht die jeweiligen Spezifikationen der gängigsten Dehnungsmessmethoden. Auf eine Darstellung von Unterarten oder Weiterentwicklungen wird an dieser Stelle verzichtet.

2.1.2 Verteilte Dehnungsmessung mithilfe der Rayleighstreuung

Wie bereits erwähnt, besteht die Besonderheit der verteilt messenden Systemen gegenüber den anderen in Abbildung 2.1 aufgeführten Systemen, dass sie die Dehnungen entlang der gesamten Faser messen können. Eine vorherige Präparation des Fasersensors ist nicht notwendig, anders als beispielsweise bei FBG-Sensoren, bei denen ein Interferenzfilter an einer festgelegten Stelle der Faser eingeschrieben wird.

Die erwähnten verteilten Verfahren, die sich die Brillouin- bzw. Rayleighstreuung zunutze machen, unterscheiden sich nicht nur durch ihre Rückstreuenspektren, sondern auch durch deren Streuintensität (Abbildung 2.5). Zur Ortsbestimmung der zurückgeworfenen Lichtspektren existieren ebenfalls Unterschiede: Viele Brillouinsysteme verwenden die Zeitbereichsreflektometrie (engl. Brillouin Optical Time Domain Reflectometry, BOTDR),

Tabelle 2.1: Vergleich der Dehnungsmessmethoden nach [40, 85, 128]

	direkte Messmethoden		
	DMS	MEMS	Schwingsaiten
E/M Einfluss	–	–	–
Ortsauflösung in [mm]	je nach Sensorabmessung		
Max. Dehnung in [$\mu\epsilon$]	$\sim 50\,000$	$\sim 10\,000$ bis 15 000	~ 2000
Preis Sensor	o	o	–
Preis Technik	+	+	+
Übertragungszeit	Echtzeit	Echtzeit	Echtzeit
Datenmenge	+	+	+
Sensorapplikation	–	–	o
	FOS		
	FBG	Brillouin	Rayleigh
E/M Einfluss	+	+	+
Ortsauflösung in [mm]		~ 10	~ 1
Max. Dehnung in [$\mu\epsilon$]	$\sim 10\,000$ bis 15 000	$\sim 10\,000$ bis 15 000	$\sim 10\,000$
Preis Sensor	–	+	+
Preis Technik	o	–	–
Übertragungszeit	Echtzeit	Echtzeit	Echtzeit
Datenmenge	o	–	–
Sensorapplikation	–	–	–
	indirekte Messmethoden		
	IWA	Photogrammetrie	Messuhr
E/M Einfluss	–	+	+
Ortsauflösung in [mm]	/	je nach Kamera	/
Max. Dehnung in [$\mu\epsilon$]	je nach Ausführung	∞	je nach Ausführung
Preis Sensor	–	–	–
Preis Technik	+	–	/
Übertragungszeit	Echtzeit	Postprozess	Echtzeit
Datenmenge	+	–	+
Sensorapplikation	+	+	+
Bewertungskriterien	+ positiv/günstig	– negativ/teuer	o neutral

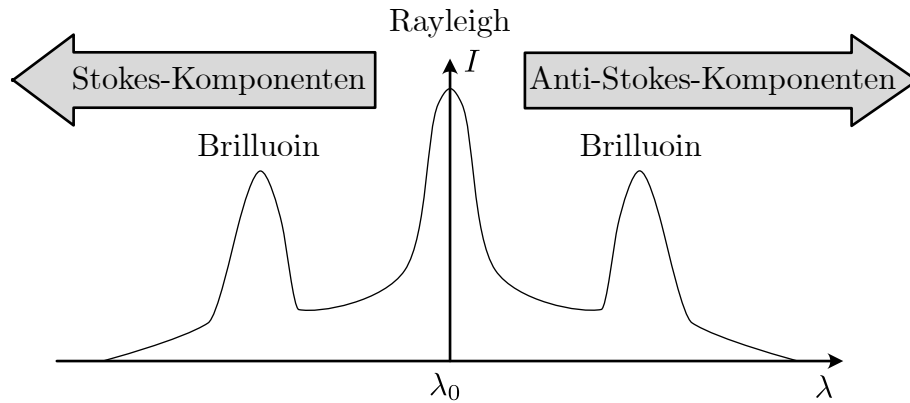


Abbildung 2.5: Streuintensitäten der Rayleigh- und Brillouinstreuung in einer optischen Faser nach [4]

bei der die Laufzeit des Lichtspektrums zur Ortsbestimmung herangezogen wird [9, 116].

Für eine verteilte faseroptische Messung mit einer Ortsauflösung im Millimeterbereich kommt die Frequenzbereichsreflektometrie zum Einsatz, insbesondere die kohärente Frequenzbereichsreflektometrie (engl. Coherent Optical Frequency Domain Reflectometry, c-OFDR) [41, 100, 116]. Diese benötigt jedoch einen größeren Anteil im Rückstreusignal, weshalb dafür die Rayleighstreuung Verwendung findet (vgl. Abbildung 2.5) [47]. Hierbei wird das Licht eines Lasers in ein Mach-Zehnder-Interferometer eingeschleust und aufgeteilt (Abbildung 2.6). Ein Teil stellt die Referenz mit fester Wellenlänge dar, der zweite wird durch den Fasersensor gebildet [116]. Das Rückstreusignal aus der Faser überlagert sich mit dem aus dem Referenzanteil und wird dadurch konstruktiv interferiert [70]. Dadurch entsteht ein periodisches Signal, dessen Frequenz die Ortsbestimmung entlang der Faser ermöglicht: Je geringer die Entfernung vom Laserlicht ist, desto niedriger ist die Frequenz des Interferenzsignals [116]. Der Detektor empfängt alle Rückstreusignale, die sich durch eine Umkehrfunktion der schnellen Fourier-Transformation (engl. Inverse Fast Fourier Transformation, IFFT) in Frequenzanteile und Amplitude aufspalten lassen [79]. Damit lassen sich der Ort und die Stärke des Signals ermitteln. Die Ortsauflösung ist abhängig vom Wellenlängenbereich des Lasers: Bei dem für diese Arbeit eingesetzten kommerziellen System von LUNA TECHNOLOGIES, welches mit einer Mittenwellenlänge von 1550 nm arbeitet, sind Auflösungen bis zu 1,3 mm möglich [88].

Zur Ermittlung der Dehnungsänderungen entlang der Faser wird der Intensitätsverlauf der Rayleighstreuung im unbelasteten Zustand gemessen. Dieser ist über den gesamten Faserverlauf stabil und unterscheidet sich geringfügig in jedem Fasersegment. Die Ursache dafür sind lokale Brechzahlvariationen oder Imperfektionen der LWL-Geometrie, die

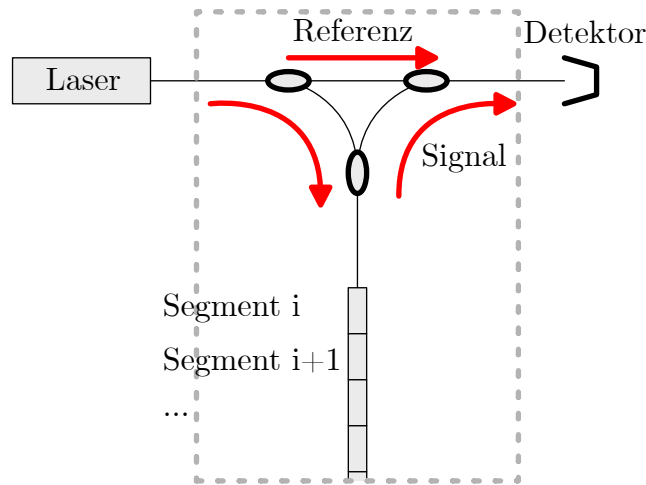


Abbildung 2.6: Prinzip des Mach-Zehnder-Interferometers bei der Frequenzbereichsreflektometrie nach [116]

durch den Herstellungsprozess entstehen [54, 65]. Für die Analyse des Vergleichs zwischen dem unbelasteten und dem belasteten Zustand wird die Faser in kleine Auswertefenster zerlegt, in denen das Rückstreusignal in den Frequenzbereich transformiert wird [47]. Durch eine Belastung der Faser streckt oder dehnt sich der Intensitätsverlauf und es resultiert eine Frequenzverschiebung. Eine solche Frequenzverschiebung, die durch eine einwirkende Dehnung ε oder auch eine Temperatureinwirkung T entsteht, ist analog zur Verschiebung in der Resonanzwellenlänge $\Delta\lambda$ oder ähnlich zur Spektralverschiebung Δv von FBG.

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta v}{v} = C_T T + C_\varepsilon \varepsilon \quad (2.1)$$

- λ ... mittlere optische Wellenlänge
- v ... mittlere optische Frequenz
- $\Delta\lambda$... Wellenlängenverschiebung
- Δv ... Frequenzverschiebung
- C_T ... Konstante der Temperaturkalibrierung
- C_ε ... Konstante der Dehnungskalibrierung

Für die gängigsten Glasfasern unter Raumtemperatur ergeben sich die beiden Konstanten zu:

- $C_T \approx 6,45 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

- $C_\epsilon \approx 0,780 \cdot 10^{-6} \mu\epsilon^{-1}$

Die Temperaturänderung ΔT lässt sich nach Gleichung 2.1 nur ermitteln, wenn eine Dehnungseinwirkung ausgeschlossen werden kann. Mithilfe der Lichtgeschwindigkeit c und der Mittenwellenlänge $\bar{\lambda}$ ergibt sich ΔT folgendermaßen:

$$\Delta T = -\frac{\bar{\lambda}}{cK_T} \Delta v \quad (2.2)$$

Für konstante Temperaturverhältnisse während der Messung des unbelasteten und belasteten Zustandes lässt sich die Dehnung ϵ aus Gleichung 2.1 berechnen.

$$\epsilon = -\frac{\bar{\lambda}}{cK_\epsilon} \Delta v \quad (2.3)$$

Die Kombination von c-OFDR und Rayleighstreuung ist die Basis des Messverfahrens, mit dem sich Temperatur und Dehnung entlang einer Singlemode-Glasfaser messen lassen. Die dabei erreichbaren Eigenschaften können Tabelle 2.1 entnommen werden. Weitere Informationen zum Messverfahren finden sich in der Literatur [47, 49, 124].

2.2 Dehnungsübertragung auf FOS

Die Analyse der Dehnungsübertragung vom Substrat oder Werkstoff auf die Fasersensoren ist essentiell für die Einschätzung der Qualität der Dehnungsmessung. Denn ausschließlich der Faserkern ist in der Lage, die Dehnungen an den Interrogator zu übermitteln (Abbildung 2.3). Das oftmals aus einem Polymer bestehende Coating (und ggf. die Klebstoffschicht) weist eine geringere Steifigkeit auf als der Faserkern. Daraus folgt eine Schubverzerrung und ein Dehnungsgradient, wobei die angezeigten Dehnungen niedriger als die des Substrats sein können. In den folgenden Abschnitten wird diesbezüglich die Dehnungsübertragung genauer betrachtet, die bestehenden analytischen Modelle vorgestellt und daraufhin die wesentlichsten Einflüsse benannt.

2.2.1 Dehnungsübertragungsmodelle

In der Literatur sind mehrere Modelle zu finden, die die Dehnungsübertragung vom Substrat auf die FOS beschreiben [2, 101, 105, 119]. Im Folgenden wird das Modell von Yuan et al. und das darauf beruhende Modell von Stelter und Cheng näher beschrieben [23, 127, 134]. Das erste Modell bezieht sich auf Sensoren, die in die Matrix eingebettet sind. Die anderen Autoren modifizierten diese Theorien für Fasern, die auf der Oberfläche mittels Klebstoff appliziert werden. Primär beschreiben alle erwähnten Modelle

gewisse Dehnungsübertragungsverluste, die durch eine Schubverzerrung zwischen den unterschiedlichen Grenzschichten auftreten können.

Yuan et al. nehmen an, dass Schubspannungen im Übergangsbereich zwischen Substrat und Coating sowie Coating und Fasercladding auftreten (Abbildung 2.7) [134]. Mittels eines Schubspannungsübertragungsparameters k^2 versuchen die Autoren die Elastizitätsmoduln von Glasfaser und Coating sowie ihre Radien zu berücksichtigen.

$$k^2 = \frac{2 \cdot G_{\text{co}}}{r_{\text{f}}^2 \cdot E_{\text{f}} \cdot \ln\left(\frac{r_{\text{co}}}{r_{\text{f}}}\right)} \quad (2.4)$$

mit:

- G_{co} ... Schubmodul Coating
- r_{co} ... äußerer Radius Coating
- E_{f} ... E-Modul Glasfaser
- r_{f} ... äußerer Radius Glasfaser (Cladding und Kern)

Über den Zusammenhang zwischen dem Elastizitätsmodul E_{co} und der Poisson-Konstante v_{co} lässt sich der Schubmodul G_{co} des Coatings wie folgt berechnen:

$$G_{\text{co}} = \frac{E_{\text{co}}}{2 \cdot (1 + v_{\text{co}})} \quad (2.5)$$

Mithilfe der Verteilungsfunktion $\varepsilon_{\text{f}}(x)$ und der darin enthaltenen Dehnung des Substrates ε_{sub} kann die Dehnungsübertragung in Abhängigkeit von der Position der Faser ermittelt werden. Die Ergebnisse beziehen sich aufgrund von Symmetriebedingungen auf die halbe Bettungslänge L der Faser.

$$\varepsilon_{\text{f}}(x) = \varepsilon_{\text{sub}} \left(1 - \frac{\sinh(kx)}{\sinh(kL)} \right) \quad (2.6)$$

Der mittlere Übertragungsfaktor der Faserdehnung in Abhängigkeit von der Bettungslänge L und dem Schubspannungsübertragungsparameter k^2 ergibt sich aus den Sensitivitätskoeffizienten $K(k, L)$.

$$\bar{\varepsilon}_{\text{f}} = K(k, L) = \varepsilon_{\text{sub}} \cdot \left[1 - \left(\frac{\cosh(kL) - 1}{kL \cdot \sinh(kL)} \right) \right] \quad (2.7)$$

Voraussetzung für das Dehnungsübertragungsmodell von Yuan et al. ist, dass sämtliche Materialien sich linear-elastisch verhalten und ideale Stoffverbindungen herrschen. Da Fasercladding und Faserkern aus Glas bestehen, gehen die Autoren von einer festen Verbindung beider Bestandteile aus.

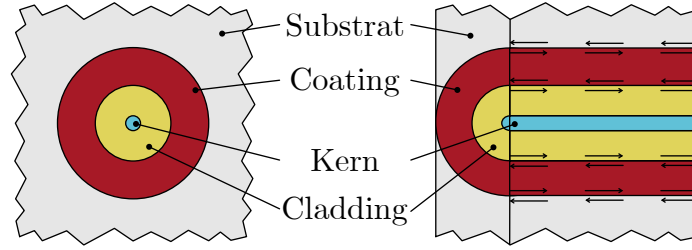


Abbildung 2.7: Dehnungsübertragungsmodell nach [134]

Im Folgenden wird Stelters Dehnungsübertragungsmodell für geklebte Sensoren vorgestellt [127]. Der Autor modifizierte das Modell von Yuan et al. mit einer Klebstoffschicht, die über die Schichtdicke h_k und die effektive Schichtdicke d_k berücksichtigt wird (Abbildung 2.10). Damit beachtet Stelter näherungsweise die gekrümmte Faseroberfläche, die einer geraden Substratoberfläche gegenübersteht.

$$d_k = r_f \cdot \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) + h_k \quad (2.8)$$

Mithilfe des angepassten Schubspannungsübertragungsparameters k^2 werden der Schubmodul des Klebstoffes, die effektive Klebstoffschichtdicke sowie der Radius und der Elastizitätsmodul der Faser einbezogen.

$$k^2 = \frac{2 \cdot G_k}{\pi \cdot d_k \cdot r_f \cdot E_f} \quad (2.9)$$

mit:

- G_k ... Schubmodul Klebstoff
- d_k ... mittlere Klebstoffschichtdicke
- E_f ... E-Modul Glasfaser
- r_f ... äußerer Radius Glasfaser (Cladding und Kern)

Über den Zusammenhang zwischen Elastizitätsmodul E_k und Poisson-Konstante v_k lässt sich der Schubmodul G_k des Klebstoffes wie folgt berechnen:

$$G_k = \frac{E_k}{2 \cdot (1 + v_k)} \quad (2.10)$$

Die Verteilungsfunktion $\varepsilon_f(x)$ und der Sensitivitätskoeffizient $K(L, k)$ sind identisch mit denen von Yuan et al. und lassen sich mithilfe von Gleichung 2.6 und 2.7 berechnen.

Zu den Annahmen von Yuan et al. fügt Stelter folgende hinzu:

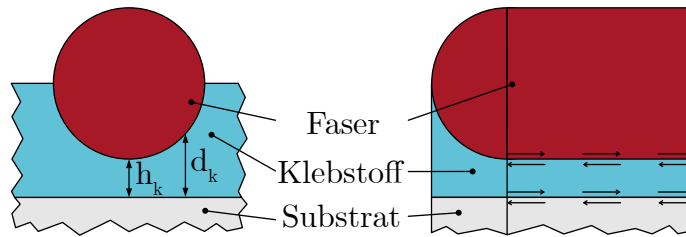


Abbildung 2.8: Dehnungsübertragungsmodell nach [127]

- Coating, Cladding und Faserkern werden zusammengefasst betrachtet.
- Die Klebstoffschicht erfährt ausschließlich Schubbelastungen.
- Die Faser ist bis $0,5r_f$ im Klebstoff eingebettet (Abbildung 2.8).
- Die Klebeverbindung ist ideal; es wird ausschließlich eine Klebezone angenommen (vgl. Abschnitt 2.3.1).

Schlüters Modell soll an dieser Stelle kurz erwähnt werden. Die Autorin erweitert die Klebstoffschichtdicke d_k um einen Klebstoffüberhang, um damit eine wirklichkeitsnähere Klebeverbindung darzustellen [119]. Ihre Berechnungen lassen sich jedoch nicht nachvollziehen, weshalb hier keine detaillierte Vorstellung erfolgt.

2.2.2 Einflüsse auf die Dehnungsübertragung

Mithilfe der Kenntnisse der Einflüsse auf die Dehnungsübertragung lassen sich elementare Parameter zur Ausbildung der Verbindung zwischen Faser und Substrat sowie die zu verwendenden Materialien ableiten, aber auch die Glaubwürdigkeit der gemessenen Verformungen einschätzen. Im Folgenden werden zuerst die Einflüsse dargestellt, die sich aus den oben genannten Modellen ableiten lassen. Im Nachgang folgen die Einflüsse, die keine Beachtung in den Modellen finden.

Für eingebettete Sensoren wurde das Modell von Yuan et al. herangezogen [134]. Die Materialkennwerte für die Fasersensoren schwanken – bis auf die Radien – beträchtlich [94]. Der E-Modul und die Querdehnzahl der Coatingmaterialien, die für die Dehnungsübertragungsmodelle notwendig sind, lassen sich darüber hinaus nur aufwändig ermitteln. Abbildung 2.9 zeigt die Kurven von vier Faserparametern, die die mittlere Dehnungsübertragung K in Abhängigkeit von der Einbettungslänge L darstellen (Gleichung 2.7). Für den E-Modul des Faserkerns und des Claddings wurde ein Wert von $E_f = 72\,000\text{ N/mm}^2$ angenommen; die E-Moduln für das Polyimidcoating $E_{co,p} = 4861\text{ N/mm}^2$ und für das

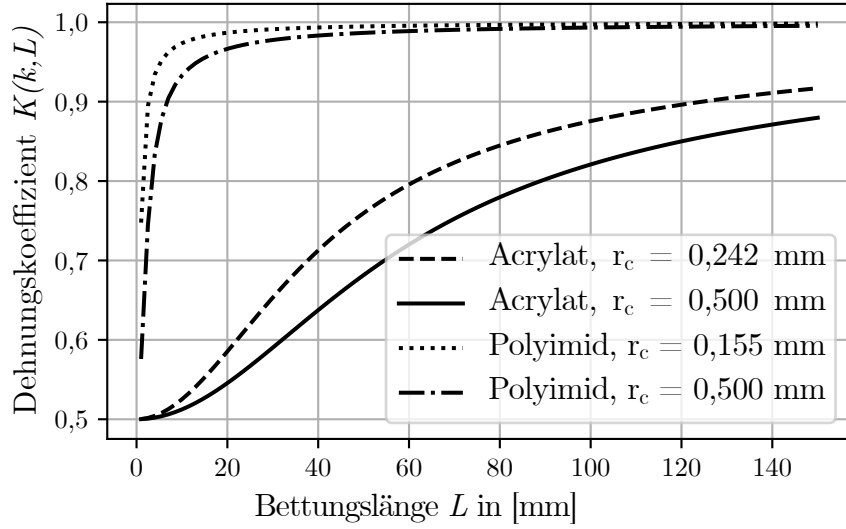
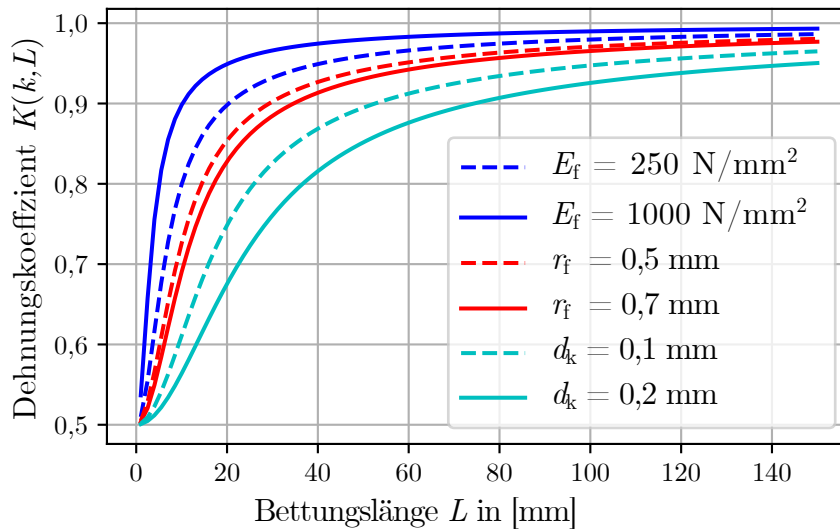


Abbildung 2.9: Vergleich verschiedener Faser-Coating-Kombinationen in Abhängigkeit von der Bettungslänge L nach dem Dehnungsübertragungsmodell von [134]

Acrylatcoating $E_{\text{co,a}} = 6,7 \text{ N/mm}^2$ beruhen auf den Ergebnissen der Untersuchung von Michel et al. [94]. Als Querdehnzahl kam ein allgemeiner Wert von $\nu_{\text{co}} = 0,4$ zum Einsatz. Die Coatingdicke – und damit der Radius des Coatings – wurde als variabler Parameter bei der Berechnung herangezogen (Abbildung 2.9).

Die Kurven zeigen eindeutig, dass neben der Einbettungslänge der E-Modul der Polymercoatings essentiell für die Dehnungsübertragung sind. Das Polyimidcoating mit einem Radius von $r_{\text{co}} = 155 \mu\text{m}$ erreicht nach ca. 40 mm halber Einbettungslänge nahezu 99 % der Dehnung des Substrats, während das Acrylatcoating mit $r_{\text{co}} = 242 \mu\text{m}$ 71 % auf den Kern überträgt. Weiterhin zeigt sich eine Verschlechterung der Übertragungswerte durch eine Vergrößerung des Coatingradius auf $r_{\text{co}} = 500 \mu\text{m}$. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich ein hoher E-Modul, eine lange Einbettungslänge und ein geringer Coatingradius positiv auf die Dehnungsübertragung auswirken.

Für Sensoren, die auf die Substratoberfläche geklebt werden, kam Stelters Modell aus Abschnitt 2.2.1 zum Einsatz. Im Modell wird keine Unterscheidung zwischen Coating und Kernwerkstoff angenommen, weshalb ein allgemeiner E-Modul von $E_f = 72\,000 \text{ N/mm}^2$ für die Berechnung verwendet wurde. Die Querdehnzahl bezieht sich auf $\nu_f = 0,4$. Für die Modifikation des E-Moduls des Klebstoffs (blaue Kurven, Abbildung 2.10) und des Faserradius (rote Kurven, Abbildung 2.10) diente eine Klebstoffschichtdicke von $d_k = 15 \mu\text{m}$. Für die Fälle, in denen der Radius nicht anders angegeben



Abbildungung 2.10: Vergleich verschiedener Faser-Klebstoff-Kombinationen in Abhängigkeit von der Bettungslänge L nach dem Dehnungsübertragungsmodell von [127]

ist, kam ein Wert von $r_f = 242 \mu\text{m}$ zum Einsatz (vgl. Tabelle 4.1). Für die Variationen des Radius und der Klebstoffschichtdicke wurde ein E-Modul des Klebstoffs von $E_k = 250 \text{ N/mm}^2$ angewandt.

Abbildungung 2.10 zeigt den Dehnungsübertragungskoeffizienten K in Abhängigkeit von der Bettungslänge L . Im Vergleich mit L hat die Klebstoffschichtdicke d_k einen entscheidenden Einfluss auf die Dehnungsübertragung. Bei einem Wert von $L = 40 \text{ mm}$ stehen einer Schichtdicke $d_k = 15 \mu\text{m}$ im Vergleich zu $d_k = 200 \mu\text{m}$ 13 % höhere Dehnungsübertragungswerte gegenüber (Abbildungung 2.10). Sowohl bei der Modulation des Elastizitätsmoduls des Klebstoffs als auch des Faserradius zeigen sich deutliche Veränderungen im Dehnungsübertragungskoeffizienten. Zusammenfassend wirken sich folgende Parametervariationen positiv auf den Dehnungsübertragungskoeffizienten K aus:

- Verlängerung der Bettungslänge L
- Reduktion der Klebstoffschichtdicke d_k
- Erhöhung des Elastizitätsmoduls des Klebstoffs E_k
- Verringerung des Faserradius r_f

Weiterhin gibt es eine Reihe zusätzlicher Einflüsse auf die Dehnungsübertragung, die durch die oben erörterten Modelle nicht berücksichtigt werden. Neben der Umgebungstemperatur, der Belastungsgeschwindigkeit und der Belastungsrichtung stellt die Größe der aufgetragenen Dehnung einen bedeutsamen Einflussparameter dar. Während sich die Umgebungstemperatur kompensieren lässt, ist die Belastungsgeschwindigkeit weitaus schwieriger zu beeinflussen. Bei vielen Anwendungen im Bauwesen wird davon ausgegangen, dass die Geschwindigkeit der Einwirkung moderat ist und damit als vernachlässigbar angenommen wird.

Alle dargestellten Einflüsse stehen in direktem Zusammenhang zum Verbund zwischen Fasersensor und dem Substrat oder Klebstoff. Vor allem die Klebefuge bei oberflächenapplizierten Fasern ist essentiell für eine optimale Übertragung der Dehnungswerte. Aus diesem Grund wird die Klebefuge in den folgenden Abschnitten detailliert betrachtet und ihre Einflussfaktoren diskutiert.

2.3 Klebstoffe

Klebstoffe sind für zwei der drei Anwendungsszenarien dieser Arbeit essentiell. Durch sie werden die Dehnungen des Werkstoffs auf die Sensoren übertragen. Im Folgenden geht es um die generelle Funktionsweise von Klebstoffen sowie Einflüsse auf die Haftfestigkeit.

2.3.1 Funktionsweise der Klebeverbindung

Klebeverbindungen beruhen auf zwei übergeordneten Mechanismen, die grundsätzlich gemeinsam auftreten: Adhäsion und Kohäsion. Zwischen den jeweiligen Werkstoffoberflächen bauen sich unterschiedliche Zonen aus. Abbildung 2.11 zeigt den schematischen Aufbau einer Klebeverbindung zwischen zwei Werkstoffen, wobei die Adhäsion und Kohäsion als getrennt wirkende Mechanismen dargestellt werden. Kötting beschreibt den Aufbau detaillierter, indem er dem Modell weitere „Zonen“ hinzufügt (Abbildung 2.13) und Adhäsion und Kohäsion verschmiert [77].

Die Adhäsion bei Klebeverbindungen beschreibt die Fähigkeit einer Werkstoffoberfläche, andere Oberflächen an sich zu binden [112]. Sie entsteht durch eine Vielzahl von gemeinsam auftretenden Mechanismen, die chemisch, physisch oder mechanisch wirken können. Die Hauptmechanismen sind nachfolgend aufgeführt:

- Hauptvalenzbindungen (Primärbindungen)
- Nebenvalezenbindungen (Sekundärbindungen)



Abbildung 2.11: Aufbau einer Klebeschicht

- Mechanische Verklammerung
- Diffusionsvorgänge
- Elektrochemische Doppelschichten

Hauptvalenzbindungen sind ein Oberbegriff für ionische, kovalente und metallische Bindungen, die Bindungen mit hohen Bindungsenergien fester Werkstoffe beschreiben [112]. In der Literatur herrscht Uneinigkeit, ob sich in Klebeverbindungen überhaupt Hauptvalenzbindungen bilden können. Michel und Gleich in [93] und [51] gehen lediglich von thermodynamischen Vorgängen in Klebeverbindungen aus. Auch Habenicht bezweifelt die Bildung von primären Bindungen [61], während Brockmann und Matz die Bildung von Hauptvalenzbindungen nachweisen konnten [20, 75].

Nebervalenzbindungen, darunter Van-der-Waals-Kräfte, Dipol-, Induktions- und Dispersionskräfte sowie Wasserstoffbrückenbindungen, haben vergleichsweise geringere Bindungsenergien. Viele Wissenschaftler sehen Nebervalenzbindungen als Grund für die Ausbildung der Adhäsion [112]. Durch das Vorhandensein von elektrischen Polaritäten kann Adhäsion zwischen Werkstoffoberflächen und Klebstoffen entstehen. Zudem konnte nachgewiesen werden, dass polare Kunststoffe zum Kleben geeignet sind [86]. Das Vorliegen von Wasserstoffbrückenbindungen erklärt einerseits adhäsive Vorgänge bei Klebeverbindungen, andererseits die Anfälligkeit gegenüber Wassereinflüssen [112].

Mechanische Verklammerung beschreibt eine verklammernde Verbindung zwischen dem Klebstoff und der Werkstoffoberfläche. In Abbildung 2.12 wird dieser Effekt schematisch dargestellt, der v.a. bei porösen Stoffen auftreten kann, indem der Klebstoff in die Strukturen sickert, sie umschließt, aushärtet und sich somit verklammert [112]. Es gibt einige Untersuchungen, laut denen die Haftung nach einer mechanischen Vorbehandlung, wie z.B. Schmirgeln (Abschnitt 2.3.3), erhöht ist [112]. Brockmann beschreibt jedoch in

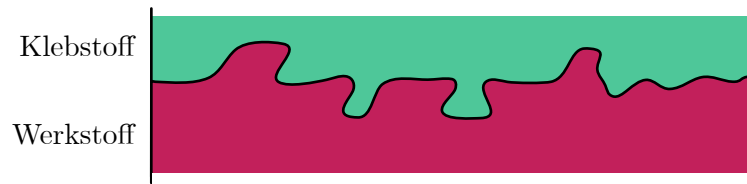


Abbildung 2.12: Prinzip der mechanischen Verklammerung

[19], dass die Topographie von chemisch gleichen Stahloberflächen keinen nennenswerten Einfluss auf die Festigkeit und Alterungsbeständigkeit besitzt. Dennoch gibt es Adhäsionseffekte, die auf Verklammerung beruhen. Die mechanische Vorbehandlung bewirkt vielmehr eher eine Veränderung der Werkstoffoberflächen zugunsten der Klebefestigkeit, als dass eine mechanische Verklammerung einen messbaren Effekt besitzt [60].

Bei Diffusionsvorgängen handelt es sich um die Vermischung zweier Stoffe, die in Kontakt zueinanderstehen [112]. Ein einfaches Beispiel ist das Spleißen einer Glasfaser: Dabei werden die Enden zweier Fasern angeschmolzen und zu einer Faser zusammengefasst. Einige Klebstoffarten können Stoffoberflächen lösen und darin diffundieren. So lösen z.B. Cyanacrylate oder Methacrylsäuremethylester Polymere auf [112]. Bjorgum et. al. konnten umgekehrt feststellen, dass Werkstoffoberflächen in Klebstoffe diffundieren [17].

An den Kontaktflächen zweier Phasen können Haftungen auftreten, die durch elektrochemische Doppelschichten entstehen: Bedingt durch den Übergang von Ladungsträgern können Anziehungskräfte zur Haftung beitragen [112]. Nachgewiesen sind elektrochemische Anziehungskräfte zwischen Metallen und Polymeren [112].

Der Wirkungsbereich der Adhäsion ist oftmals eine vergleichsweise dünne Schicht, die sogenannte Adhäsionszone (Abbildungen 2.11 und 2.13) [112]. In diesem Wirkungsbereich treten die oben erwähnten fünf Hauptmechanismen unterschiedlich auf – in Abhängigkeit von äußeren Begebenheiten (z. B. der Beschaffenheit der Werkstoffoberflächen). In der Praxis existiert keine ideale Adhäsion, sondern immer eine Konkurrenz zwischen der auftretenden Belastung und dem Vermögen der oben beschriebenen anteiligen Adhäsionsmechanismen, ihr entgegenzuwirken [112].

Während Adhäsion die Mechanismen beschreibt, die zwischen Klebstoff und Werkstoff stattfinden, bezieht sich Kohäsion auf den inneren Zusammenhalt eines Stoffes – in diesem Fall des ausgehärteten Klebstoffs [60]. Vereinfacht bedeutet das, dass die Kohäsion die Festigkeit des ausgehärteten Klebstoffs darstellt. Die Klebstoffe werden in der Regel im flüssigen oder fließfähigen Zustand aufgebracht und entwickeln durch die Polymerisation ihre entsprechende Festigkeit. Die Festigkeitswerte der Hersteller beziehen sich ausschließlich auf den ausgehärteten Bereich der Kohäsionszone (vgl. Abbildung 2.11). Die Festigkeit der Adhäsionszone ist höchstens so hoch wie die der Kohäsionszone.

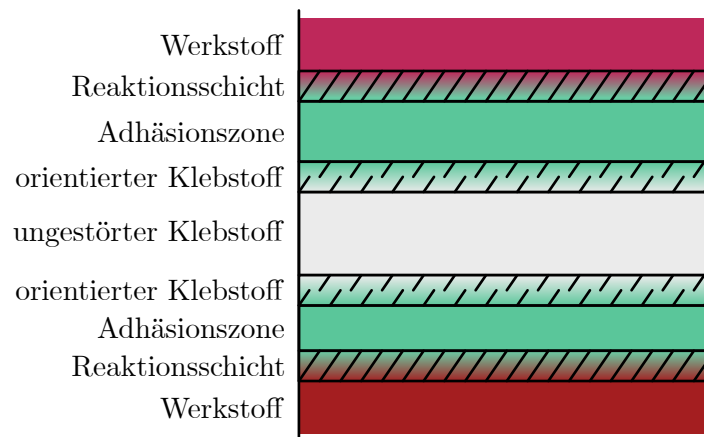


Abbildung 2.13: Erweitertes Modell zum Klebstoffaufbau nach [77]

2.3.2 Einflüsse auf die Klebeverbindung

Aus den oben erörterten Grundlagen lassen sich Schlussfolgerungen ableiten, die zu einer Verbesserung der Funktionseigenschaften der Klebeverbindung führen: Wie schon angedeutet, besitzt der oberflächennahe Klebstoff eine andere Struktur als der Klebstoff in der Kohäsionszone (Abbildungen 2.11 und 2.13). Vor allem durch eine Oberflächenvorbehandlung der Fügeteile können sich die Adhäsionszonen unterschiedlich ausbilden [60, 103]. Neben der Anfangshaftung gibt es weitere Effekte: Einige Autoren berichten über maßgebliche Einflüsse auf die Alterungsbeständigkeit und somit auf die Langzeitstabilität [18, 22, 77, 112]. Weiterhin wird die Festigkeit der Klebefuge um ein Vielfaches vergrößert, wenn die Fügeteile sehr nahe beieinanderliegen. Die Reichweite von einigen Bindungsmechanismen liegt im Bereich von kleiner als 1 nm [22]. Zusammenfassend wirkt sich der Oberflächenzustand direkt auf die Kohäsion und die Adhäsion aus. Je nach Beschaffenheit der Oberfläche und ihrer Reaktionsschicht verändert sich der inhomogene Aufbau der Klebeschicht [22] (Abbildung 2.13).

Neben der Verbesserung der Alterungsbeständigkeit und der grundlegenden Bedeutung für den Abstand der Grenzflächen wirkt sich eine entsprechende Oberflächenvorbehandlung positiv hinsichtlich der Oberflächenspannung der Fügeteile aus [112]. Grundsätzlich entsteht Adhäsion nur, wenn der Benetzungsrandwinkel $\Theta > 90^\circ$ ist [22] (Abbildung 2.14). Für den Fall $\Theta \leq 90^\circ$ würde der Klebstoff die Fügeteile voneinander abstoßen [60]. Aus diesem Grund ist der Benetzungsrandwinkel ein Indikator dafür, wie gut der Klebstoff eine Verbindung mit der Werkstoffoberfläche eingeht [22]; jedoch kann durch den Benetzungsrandwinkel allein keine Adhäsion garantiert werden [112]. Aus Abbildung 2.14 geht hervor, dass neben dem Klebstoff die Beschaffenheit der Werkstoffoberfläche einen

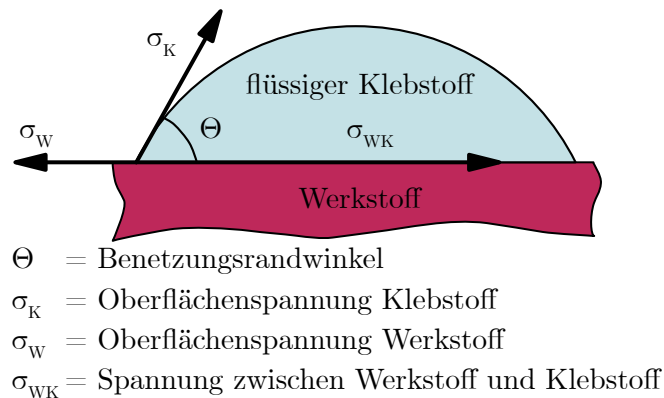


Abbildung 2.14: Benetzungswinkel nach [16]

entscheidenden Einfluss auf den Benetzungswinkel und somit auf die Haftung hat. Im Übrigen beschränkt sich die Benetzungstheorie lediglich auf die Fälle, in denen tatsächlich ein Adhäsionsversagen vorliegt [112]. Prinzipiell bietet die Oberflächenspannung ein erstes Indiz dafür, ob eine Klebewirkung zwischen den Werkstoffoberflächen entstehen kann. Damit lässt sich die Forderung nach einem bestimmten Benetzungswinkel ableiten, der für die untersuchten Oberflächen erreicht werden muss, um eine angemessene Haftung zu erzielen.

Eine weitere Möglichkeit, die Funktionsweise der Klebeverbindung v.a. in feuchten Milieus zu verbessern, ist der Einsatz von hochelastischen Klebstoffen. Brockmann beschreibt in [22] die hohe molekulare Beweglichkeit von festen, hochelastischen Verbindungen. Er stellte fest, dass durch Wasser gelöste Verbindungen sich sukzessive wieder aufbauen können. Das führt insbesondere im Bauwesen bzw. Betonbau zu neuen Denkansätzen bei der Auswahl der verwendeten Klebstoffe, da eine hohe Belastung der Klebestelle durch Feuchtigkeit herrscht: zur Verwendung hochelastischer Systeme mit plastischem Verformungsvermögen, die eine bessere Alterungsbeständigkeit aufweisen als starre Systeme.

Neben der Möglichkeit, die Funktionseigenschaften des Klebstoffs positiv zu beeinflussen, existieren Mechanismen mit negativem Einfluss. Bestimmte Alterungs- und/oder Korrosionsvorgänge können dazu führen, dass die Haftungseigenschaften zwischen Faser und Werkstoff vermindert werden und die angezeigten Dehnungswerte nicht der realen Dehnung entsprechen [22, 112]. Im schlechtesten Fall löst sich die Verbindung auf. Abbildung 2.15 zeigt die jeweiligen Bereiche, in denen durch Alterung oder äußere Einflüsse die Funktionseigenschaften des Klebers beeinflusst sein können. Tabelle 2.2 zeigt zu diesen Bereichen die Einflüsse und Auswirkungen auf die Klebstoffhaftung.

Der negative Einfluss von Feuchtigkeit auf die Kohäsionszone und die Restrukturierung

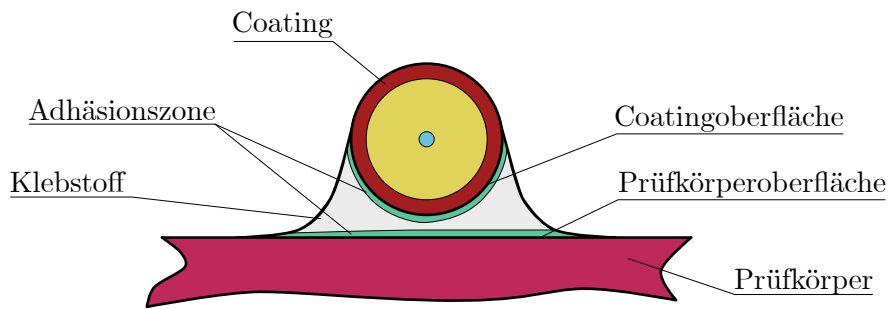


Abbildung 2.15: Bereiche, die durch Alterung infolge äußerer Einflüsse geschädigt werden können

bei hochelastischen Systemen wurde bereits erwähnt. Feuchtigkeit bestimmt zusätzlich die Hydrolyse in der Adhäsionsschicht [22]. Damit sind sogenannte Platzwechselvorgänge durch Wasser gemeint. Grundsätzlich führen diese Vorgänge nicht zum kompletten Versagen der Adhäsionszone, mindern jedoch die Haftung. Ein weiterer Prozess im Zusammenhang mit Feuchtigkeit ist die Hydratation [112], die Anlagerung von Wassermolekülen an der Füge-teiloberfläche. Die anschließende Reaktion mit Oxiden der Oberfläche kann zu einer Veränderung der Oberflächenstruktur führen, die eventuell zu einer Verminderung der Haftung führt [21]. Eine wichtige Einflussgröße neben der Menge an Wasser ist der vorherrschende pH-Wert [22]: Wenn der pH-Wert auf metallischen Oberflächen unter 9,5 sinkt, hydratisiert beispielsweise Eisenoxid und kann die Adhäsionszone einer Klebefuge zerstören.

Die Bondline- und die Filiformkorrosion stellen zwei weitere Versagensmechanismen der Klebefuge dar [112, 115]. Während die Bondlinekorrosion sich vom Rand der Klebeverbindung halbkreisförmig ausbreitet und eine Delamination der Adhäsionszone verursacht, sickern im Fall der Filiformkorrosion die Korrosionsprodukte fadenartig in den Klebstoff ein und verursachen dort ein Ablösen der Klebstoffschicht [115]. Beide Versagensarten treten auf, wenn Feuchtigkeit zusammen mit salzhaltigen Verunreinigungen vorkommt. Die Versuche in [115] zeigten zudem, dass die Filiformkorrosion bei wesentlich geringerer Feuchtigkeit auftrat.

Klebefugen sollten generell vor UV-Licht geschützt werden, da energiereiche Strahlung, darunter natürliche UV-Strahlung, polymere Klebschichten verspröden [112]. Eine Versprödung führt nicht sofort zum Versagen der Klebefuge, mindert jedoch das Dehnungsvermögen und kann somit in Kombination mit einer mechanischen Belastung zu einem Versagen führen.

Tabelle 2.2: Übersicht der Schädigungsmechanismen nach [112]

Bereich	Einfluss	Auswirkungen auf Haftung
Klebstoffe	Feuchtigkeit	mindert (z.T. reversibel)
	UV-Licht	mindert/zerstört
	mechanische Beanspruchung	mindert
Grenzbereiche (Adhäsionszone, Fügeteiloberfläche)	Hydrolyse	mindert
	Hydratation	mindert
	Bondlinekorrosion	zerstört
	Diffusion	mindert
	UV-Licht	mindert/zerstört
	Filiformkorrosion	zerstört
	mechanische Beanspruchung	mindert
Werkstoff	Feuchtigkeit	mindert
	Versprödung	mindert
	Strukturänderung	mindert/zerstört
	mechanische Beanspruchung	mindert

2.3.3 Vorbereitung der Klebestelle

Durch eine Oberflächenvorbehandlung lässt sich die Haftfestigkeit und die Alterungsbeständigkeit positiv beeinflussen, weshalb in diesem Abschnitt Faktoren einer Vorbehandlungsmaßnahme erörtert werden. An erster Stelle werden die Vorbehandlungsmaßnahmen und ihr spezifischer Nutzen für die Qualität der Klebestelle grundsätzlich erläutert. Nachfolgend werden die unterschiedlichen Vorbehandlungsverfahren dargestellt, die speziell für metallische und poröse Oberflächen geeignet sind. Ein wichtiger Aspekt, der in der Literatur kontrovers betrachtet wird, stellt die Reinigung nach der Vorbehandlung dar. Zum Schluss geht es um Haftvermittler und Primer sowie die Liegezeit zwischen Vorbehandlung und abschließendem Aufbringen des Klebstoffs.

Als Vorbehandlung der Klebestelle werden die Arbeitsvorgänge bezeichnet, welche die Oberflächen der Fügeteile so verändern, dass die Klebestelle in einen definierten Zustand adhäsiver Reaktivität gebracht wird [22]. Dadurch soll die Haftung verbessert bzw. bei extrem ungünstigen Bedingungen überhaupt erst ermöglicht werden. Wie in Abschnitt 2.3.1 beschrieben, benötigt Adhäsion neben physikalischen Wechselwirkungen v.a. chemische Wechselwirkungen zwischen Klebstoff und Fügeteiloberfläche [22]. Letzteres kann besonders durch eine Oberflächenvorbehandlung sowie den gezielten Einsatz von

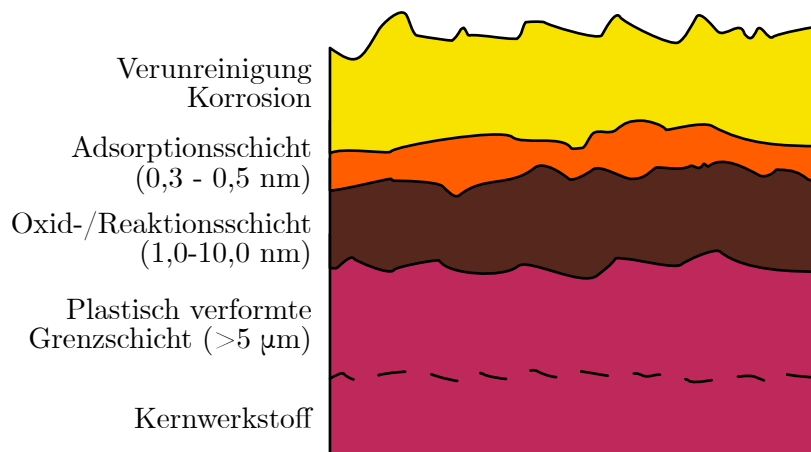


Abbildung 2.16: Schematischer Aufbau einer metallischen Oberfläche nach [107]

Haftvermittlern erreicht werden [22, 61]. Aus den Erläuterungen in Abschnitt 2.3.2 wird deutlich, dass insbesondere bezüglich der Haftfestigkeit die Oberflächenspannung der Fügeteile eine wichtige Kenngröße ist. Verunreinigungen wie Fette, Oxidationsprodukte und lose Bestandteile können die Oberflächenspannung verringern. Idealerweise lässt sich mit gezielten Vorbehandlungsmaßnahmen die Oberflächenspannung erhöhen und somit die Benetzbarkeit durch Klebstoffe verbessern [22]. Ein weiterer Grund für eine Vorbereitung der Klebestelle ist die Langzeitstabilität der Klebefuge. Rasche erwähnt in [112], dass diese durch Vorbehandlungsmaßnahmen verbessert werden kann.

Diesbezüglich ist eine detaillierte Darstellung der Fügeteiloberflächen notwendig. Die vorliegende Arbeit beschränkt sich auf metallische und poröse Oberflächen aus Beton (Abbildungen 2.16 und 2.17). Für eine optimale Adhäsion ist die Applikation auf den Kernwerkstoff empfehlenswert.

Bei metallischen Oberflächen sollte eine Applikation mindestens auf der plastisch verformten Grenzschicht stattfinden [107]. Dazu sind Adsorptions- und Oxidschichten abzutragen, die sich durch einfaches Reinigen nicht entfernen lassen [112].

Bei Oberflächen aus Beton treten neben Verunreinigungen wie Fette und Öle v.a. lose Bestandteile auf. Daneben finden sich auch offene und eingeschlossene Poren, wobei letztere durch ein Abtragen der darüber liegenden Schichten sichtbar werden können. Für optimale Ergebnisse beim Kleben von Betonoberflächen ist es notwendig, die losen Bestandteile und Verunreinigungen sowie die Zementhaut komplett zu entfernen [74, 98, 122].

Zur Vorbehandlung der Klebefuge kommen je nach Material sechs wesentliche Maßnahmen zum Einsatz [22, 61, 112]:

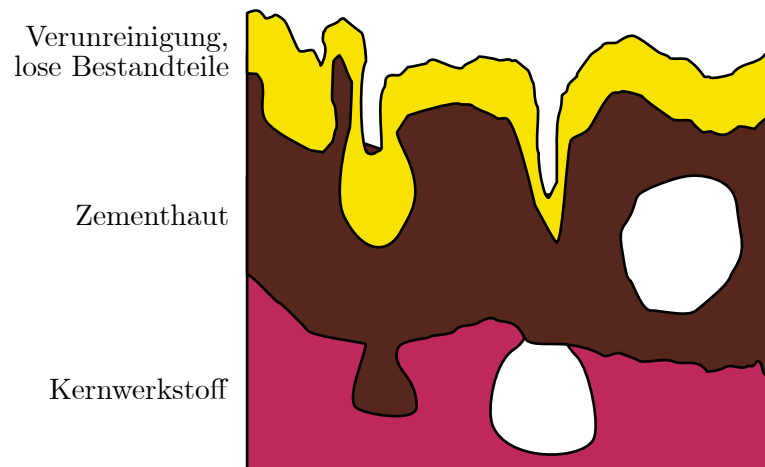


Abbildung 2.17: Schematischer Aufbau einer Betonoberfläche nach [98]

- Reinigen
- Mechanische Vorbehandlung
- Chemische Vorbehandlung
- Thermische Vorbehandlung
- Elektrische Vorbehandlung
- Beschichten

Aufgrund der Anwendbarkeit für die in dieser Arbeit behandelten Einsatzgebiete wird sich auf die Maßnahmen Reinigen, mechanische Vorbehandlung und Beschichten beschränkt.

Verunreinigungen jeglicher Art, wie Staube, Fette oder Öle, können die Haftung von Klebstoffen auf Oberflächen einschränken oder vollständig behindern [112]. Aus diesem Grund ist es notwendig, vor der Applikation oder der eigentlichen Vorbehandlung die Oberflächen zu reinigen und von Verunreinigungen zu befreien.

Ein vollständiger Reinigungsgrad (100 %) ist selbst mit aufwändigen Verfahren nicht zu erreichen [21, 45]. Je nach Maßnahme, Verunreinigung und Oberfläche sind Reinigungsgrade von mehr als 60 % mit geringem Aufwand möglich [45], die laut Rasche zu akzeptablen Ergebnissen hinsichtlich Langzeitstabilität und Haftfestigkeit führen [112].

Die in der Industrie üblichen Reinigungsmethoden reichen von einfachen Verfahren, wie dem Abwischen mit lösungsmittelgetränktem Lappen und dem Reinigen mit Reinigungssprays, bis hin zu aufwändigen Verfahren, darunter die Tauch- und Dampfentfettung, das Reinigen im Plasma sowie mithilfe von Trockeneis [76, 112]. Die vorliegende Arbeit beschränkt sich auf Reinigungsverfahren mit lösungsmittelgetränktem Lappen und Reinigungssprays.

Mit einem lösungsmittelgetränkten Lappen können ausreichend Verunreinigungen von Füge-teiloberflächen entfernt werden. Als Lösungsmittel eignen sich Aceton oder Isopropanol [22]. Rasche empfiehlt zudem fusselfreie, farblose Einmaltücher, die verhindern, dass verunreinigte Lappen die Oberfläche erneut kontaminieren und Farbrückstände an der Oberfläche haften bleiben [112].

Zur Reinigung mit Reinigungssprays wird ein Lösungsmittel auf die zu behandelnde Oberfläche aufgesprüht. Der Nachteil gegenüber der Reinigung mit einem lösungsmittelgetränkten Lappen besteht darin, dass das aufgesprühte Lösungsmittel durch die Zerstäubung schneller verdunstet und somit keine oder nur schlechte Reinigungswirkung erzielt wird [112]. Nach dem Aufsprühen muss unverzüglich das Lösungsmittel ablaufen oder mit einem Lappen abgewischt werden.

Zu den mechanischen Vorbehandlungsmaßnahmen zählen neben dem Strahlen mit metallischen, organischen oder mineralischen Stoffen, sowohl das Schleifen oder Schmirgeln, als auch das Bürsten. Alle Verfahren zielen darauf ab, Material der Füge-teiloberfläche mechanisch abzutragen, bzw. aufzurauen, zu strukturieren oder geringfügig zu verformen [112].

Unabhängig vom eingesetzten Verfahren sollte die Füge-teiloberfläche, wie oben beschrieben, vorher gründlich gereinigt werden. Das vermeidet eine zusätzliche Verteilung der Verunreinigungen auf der Oberfläche durch die mechanische Vorbehandlung [22].

Zur Reinigung der Oberfläche nach der jeweiligen mechanischen Vorbehandlung gibt es in der Literatur unterschiedliche Meinungen. Grundsätzlich zielen alle Autoren darauf ab, den durch die Vorbehandlungsmaßnahme entstehenden Staub von der Oberfläche erneut zu entfernen. Während in [112] und [87] die darauffolgende Reinigung mit lösungsmittelgetränktem Lappen empfohlen wird, legen die Untersuchungen in [22, 55] nahe, den durch die mechanische Vorbehandlung entstehenden Staub durch Abblasen mit trockener Luft oder durch sorgfältiges Abbürsten zu entfernen.

Nicht alle Verunreinigungen stammen von der Füge-teiloberfläche: Der Klebstoff, mit denen die Schmirgelkörner am Leinen befestigt sind, und die Schmirgelkörner selbst können sich in den feinen Riefen absetzen [112]. Aus diesem Grund wird empfohlen das Schmirgelleinen rechtzeitig zu wechseln, bevor sich mögliche Abriebprodukte lösen.

Das grundlegende Ziel aller mechanischen Vorbehandlungsmaßnahmen ist die Verbesserung der Haftfestigkeit des Klebers und der Langzeitstabilität der Klebefuge. In

Abhängigkeit vom angewendeten Verfahren können folgende Veränderungen der Oberfläche mit einer mechanischen Vorbehandlung erzielt werden [112]:

- Entfernung von unerwünschten, ggf. nichttragenden Oberflächenschichten.
- Vergrößerung der spezifischen Oberfläche.
- Entstehung mechanischer Verklammerung.
- Veränderung der chemischen Zusammensetzung der Fügeteiloberfläche.

Die durch die mechanische Vorbehandlung entstehenden Rautiefen können einen entscheidenden Einfluss auf die Haftfestigkeit haben [112]. Dies wird in der Literatur kontrovers diskutiert: Bauer et al., Kaliske und Brockmann postulieren, dass sich die Haftfestigkeit mit steigender Rautiefe verbessert, bei zu großer Rautiefe jedoch wieder verschlechtert [14, 22, 72]. Dagegen belegen Versuche in [99], dass kein Abfallen der Haftfestigkeit mit steigender Rautiefe stattfindet. Brockmanns Äußerungen lassen schlussfolgern, dass bei zu großen Rautiefen einige Bindungsmechanismen nicht mehr wirken können [22]. Einigkeit herrscht beim Zusammenhang zwischen der Riefen- und der Belastungsrichtung: Es sollte darauf geachtet werden, dass die Riefen quer zur Belastungsrichtung eingebracht werden [112].

Eine weitere effektive Maßnahme zur Verbesserung der Haftfestigkeit und Langzeitstabilität einer Klebefuge ist das Beschichten. Dabei handelt es sich um Verfahren, bei denen vor dem Klebevorgang Substanzen zur Aktivierung der Oberfläche aufgebracht werden. Die vorliegende Arbeit beschränkt sich diesbezüglich auf die Beschichtung von porösen und mineralischen Werkstoffen, sogenannte Grundierungen [112], und die Verwendung von Primern, die vorwiegend auf metallischen Oberflächen eingesetzt werden [22, 112].

Für eine Grundierung von porösen Oberflächen eignen sich vielfach verdünnte Klebstoffe, die dadurch die offenen Poren verschließen und Bereiche mit niedriger Eigenfestigkeit verfestigen [74, 112]. Oftmals handelt es sich dabei um Klebstoffe auf Epoxidharzbasis [95, 112].

Primer sind oftmals mit Lösungsmitteln stark verdünnte Polymerlösungen, die vor dem eigentlichen Klebeprozess auf die Fügeteiloberfläche appliziert werden. Nach dem Verdunsten des Lösungsmittels bindet der Primer ab, wodurch die Fügeteiloberfläche eine Beschichtung erhält [22]. Durch die starke Verdünnung können Primer in die feine Struktur der Oberfläche eindringen und sie benetzen [112]. Neben der mitunter enormen Verbesserung der Haftfestigkeit können Primer zur Langzeitstabilität und Wasserbeständigkeit beitragen [22, 112]. Primer sollten nur dünn aufgetragen werden, da sonst durch ihre geringe Eigenfestigkeit die Klebeverbindung schneller versagen kann [112].

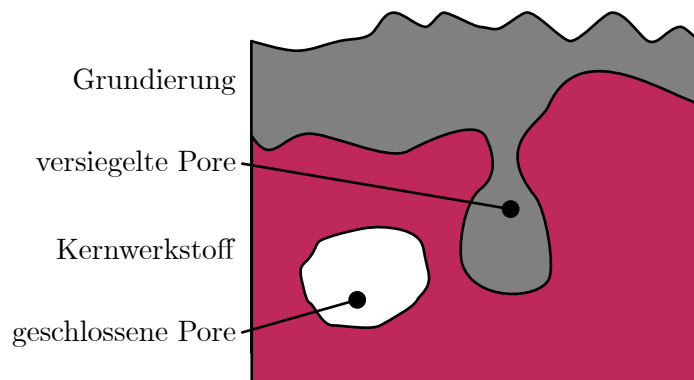


Abbildung 2.18: Schematischer Aufbau einer Betonoberfläche nach mechanischer Vorbehandlung und anschließender Grundierung

Die oben beschriebenen Vorbehandlungsmaßnahmen können oder müssen zum Teil miteinander kombiniert werden. Dazu empfehlen Rasche und Brockmann eine Reinigung der Fügeiteiloberfläche vor einer mechanischen Vorbehandlung [22, 112]. Vor dem Auftragen von Primern wird sowohl eine Reinigung als auch eine mechanische Vorbehandlung empfohlen [96]. In [122] und [95] wird vor der Grundierung von Betonoberflächen ein Abtrag der Zementhaut und eine Freilegung der Gesteinskörnung vor dem Klebprozess empfohlen. In [74, 95] fügen die Autoren noch eine zusätzliche Grundierung an, durch die offene Poren verschlossen und eine ebene Oberfläche geschaffen werden sollen (vgl. Abbildung 2.18).

Die durch eine mechanische Vorbehandlung aktivierte Oberfläche kann im Laufe der Zeit ihre positiven Adhäsionseigenschaften durch Verschmutzungen oder Reaktionen mit der Umwelt verlieren [22]. Die sogenannte Liegezeit sollte v.a. bei Stahloberflächen so gering wie möglich gehalten werden, da entfettete Stähle eine erhöhte Korrosionsneigung aufweisen [112]. Brockmann erwähnt, dass behandelte Oberflächen mit Primern vor unkontrollierter Kontamination oder Nachreaktion geschützt werden können [22]. Krüger stellt zudem fest, dass die Lagerungstemperatur neben der Liegezeit einen signifikanten Einfluss auf die Oberflächenspannung und damit die Adhäsion nach einer Vorbehandlung hat [78]: Höhere Temperaturen vermindern den polaren Anteil der Oberflächenspannung und demgemäß auch die positiven Adhäsionseigenschaften.

2.3.4 Klebstoffarten

In diesem Abschnitt werden die Klebstoffarten beschrieben, die in dieser Arbeit zur Anwendung kamen. An erster Stelle sollen die Klebstoffarten nach ihrem Abbindeverhalten

kategorisiert werden. Nach einer kurzen Erläuterung zum Abbindeverhalten folgt eine Gegenüberstellung der wesentlichen Eigenschaften.

In der Literatur existiert bislang keine Gegenüberstellung von Klebstoffen bezüglich ihrer Leistungsfähigkeit und Verarbeitbarkeit [22]. Einerseits ist das Repertoire an Klebstoffen enorm, andererseits existiert bislang keine einheitliche Normung [22]. Abbildung 2.19 zeigt eine Möglichkeit zur Kategorisierung nach dem Haftungsmechanismus und dem dazugehörigen Abbindevorgang. Die in dieser Arbeit verwendeten Klebstoffe haften alle durch Adhäsionsvorgänge und binden durch eine Polyreaktion ab. Für die Anwendung in der Messtechnik kommen v.a. Cyanacrylate, Methylmethacrylklebstoffe und Epoxidharze zum Einsatz, die im Folgenden näher erläutert werden [74].

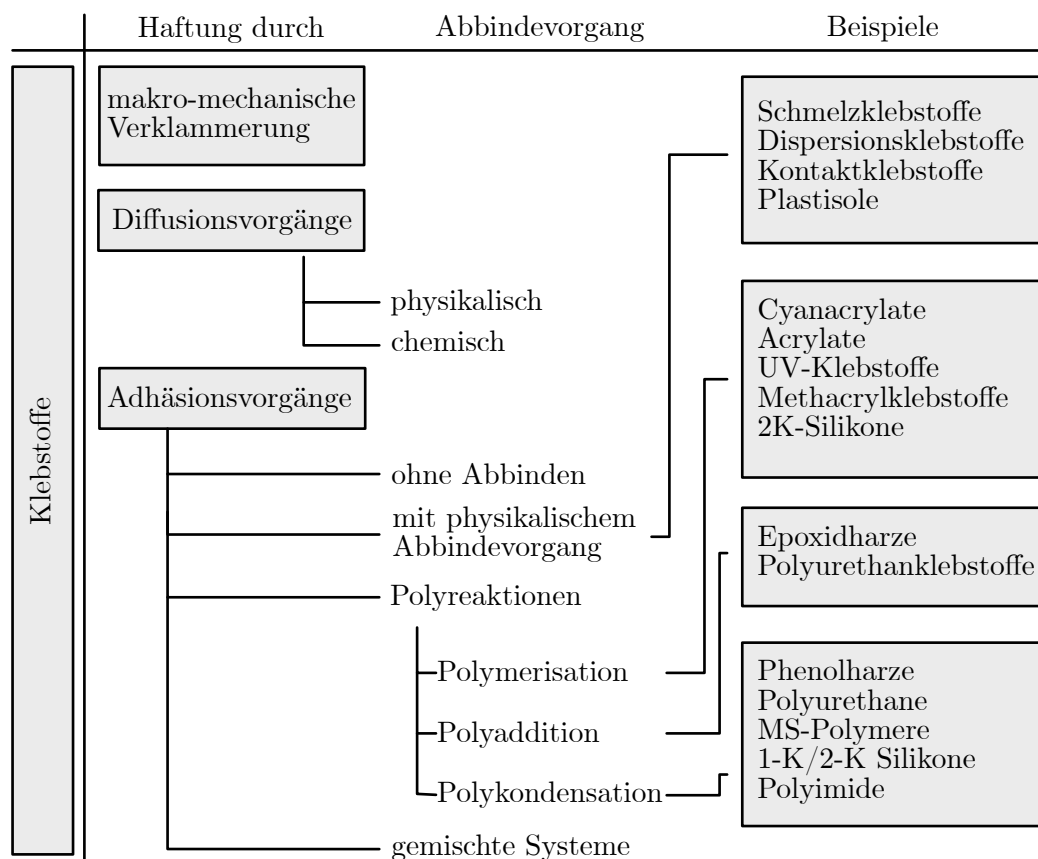


Abbildung 2.19: Kategorisierung von Klebstoffarten nach dem Abbindeverhalten gemäß [112]

Bei Cyanacrylatklebstoffen handelt es sich um lösungsmittelfreie einkomponentige

Reaktionsklebstoffe, die im abgebundenen Zustand als Thermoplaste vorliegen [22, 112]. Die Hauptbestandteile eines Cyanacrylates sind Esterverbindungen, wie z.B. Methyl-, Ethyl-, Butyl- oder Propylester [112]. Die Esterarten unterscheiden sich in der Molekülgröße, womit die Eigenschaften des Klebstoffs angepasst werden können: Kleinere Moleküle, wie die von Methylestern, besitzen im ausgehärteten Zustand eine höhere Festigkeit als größere Molekülketten, womit gleichzeitig die Elastizität verringert wird [112]. Cyanacrylatklebstoffe sind häufig niedrigviskose Flüssigkeiten, die durch die Kapillarwirkung auf porösen Werkstoffen mitunter keine guten Klebeigenschaften besitzen [112]. Der Abbinde Mechanismus der Polymerisation wird durch Wasser in der Umgebung und an der Füge teiloberfläche ausgelöst, wobei um 40 % bis 80 % relative Luftfeuchte benötigt wird [133]. Damit ist die Reichweite des Klebstoffes auf nur 0,1 mm bis 0,2 mm begrenzt und nur für kleinflächige Verbindungen geeignet [22, 112]. Neben der relativen Luftfeuchtigkeit beeinflusst die Füge teiloberfläche den Abbindevorgang: Je nach verwendetem Estermolekül treten Abbindezeiten zwischen wenigen Sekunden und einigen Minuten auf [133]. Ein weiterer Faktor zur Beeinflussung des Abbindevorgangs ist der pH-Wert der Füge teiloberfläche: Bei sehr niedrigen pH-Werten findet kein Abbindevorgang statt. Sehr hohe pH-Werte führen dagegen zu einer Schockhärtung, welche die Endfestigkeit negativ beeinflusst [112]. Cyanacrylatklebstoffe haben den Nachteil, dass sie im abgebundenen Zustand geringe plastische Reserven besitzen, wodurch sie besonders anfällig gegenüber Schälbelastung sind [22]. Untersuchungen ergaben, dass sich mit teilflexibilisierten Cyanacrylatklebstoffen, die sich geringer plastifizieren, bessere Ergebnisse gegenüber Schälbelastungen, Spannungsspitzen und Temperaturschwankungen erzielen lassen [22].

Bei den in dieser Arbeit verwendeten Acrylat- oder Methacrylklebstoffen handelt es sich um chemisch abbindende, reaktive Klebstoffe. Diese kommen häufig als zweikomponentige Systeme vor, während einkomponentige Systeme oft anaerob oder durch UV-Strahlung aushärten [22]. Ein typischer Vertreter dieser Klebstoffgruppe ist Methylmethacrylat (MMA), das sich durch eine zusätzliche Methylgruppe von den Acrylatklebstoffen unterscheidet [22]. Durch die zusätzliche Methylgruppe werden auch große Unterschiede in Bezug auf Festigkeit und Flexibilität erzielt. Weiterhin besitzen MMA hervorragende Benetzungseigenschaften bei fast allen Werkstoffoberflächen. Durch ihre spaltüberbrückende Eigenschaft können MMA je nach Viskositätseinstellung bei porösen Oberflächen eingesetzt werden [22, 112]. Neben den für Dehnungsmessungen guten mechanischen Eigenschaften sind MMA beständig gegenüber Witterungseinflüssen und UV-Strahlung [22]. Eine Schlagzähmodifizierung findet durch Additive wie Copolymere und Kautschuksysteme statt [22]. MMA binden durch Polymerisation ab, wodurch diese Klebstoffe tolerant gegenüber Mischungsfehlern sind [22]. Neben der kurzen Verarbeitungszeit sind MMA im Temperaturbereich -50°C bis 100°C beständig und können kurzzeitig bis 180°C belastet werden [22].

Epoxidharze sind Duromere, die durch eine exotherm ablaufende Polyaddition entstehen [112]. Sie können als einkomponentige oder zweikomponentige Systeme eingesetzt werden. Bei den zweikomponentigen Systemen ist aufgrund der Polyaddition auf das stöchiometrische Mischungsverhältnis und auf eine gute Vermischung zwischen Harz und Härter zu achten [112]. Brockmann konnte neben der Polyaddition auch Polymerisationsmechanismen feststellen, sodass auch bei geringeren Härtermengen Abbindeprozesse stattfinden können [22]. Bei einkomponentigen Systemen sind die Härter blockiert und werden durch die Zufuhr von Wärme oder UV-Strahlung deblockiert, um den Abbindeprozess auszulösen [22, 112]. Zu Beginn des Abbindeprozesses wird schnell eine hohe Klebefestigkeit erreicht; im späteren Verlauf verringert sich ihr Anstieg [112]. Neben der Abbindezeit beeinflusst die Abbinde Temperatur die im ausgehärteten Zustand erreichte Klebefestigkeit: Höhere Temperaturen bis maximal 150 °C begünstigen die Klebefestigkeit, während Temperaturen über 150 °C zu ihrer Verminderung führen [112]. Grundsätzlich haben Epoxidharze ein geringes Verformungsvermögen, das sich mithilfe des Mischungsverhältnisses und des Klebstofftyps anpassen lässt. Neuere Untersuchungen beschäftigen sich mit einer Verbesserung des Verformungsvermögens durch die Zugabe von Polymeradditiven oder Nanopartikeln [62, 112].

In Tabelle 2.3 werden die wichtigsten Eigenschaften der drei oben dargestellten Klebstoffarten zusammenfassend gegenübergestellt.

Tabelle 2.3: Eigenschaften ausgewählter Klebstoffarten nach [22, 60, 112]

Eigenschaft	Epoxide	Cyanacrylate	Acrylate
zwei Komponenten	+	–	+
Aushärtung	< 24h	< 2h	< 12h
Schälfestigkeit	o	–	o
Zugscherspannung	+	+	o
Temperaturbeständigkeit	+	–	o
Feuchtebeständigkeit	+	–	o
Haftung auf geölten Flächen	o	–	o
Anwendung	Metall, poröse Oberflächen, Kunststoffe, Keramik	Metall, Kunststoffe, Keramik, Holz	Metall, poröse Oberflächen, Kunststoffe, Keramik

3 Stand der Forschung

Die Forschungsaktivitäten der letzten drei Jahrzehnte führten zu relevanten Entwicklungen, die den Einsatz der VFOS in der Dehnungsmessung ermöglichten [24, 47, 50, 68, 106, 128]. Durch die wachsende Leistungsfähigkeit der elektronischen Datenverarbeitung stieg in jüngster Vergangenheit das Interesse rasant an und brachte v.a. im SHM des Bauwesens diverse Anwendungen hervor [4, 12, 43, 57, 65, 71, 79, 84, 85, 129]. In vielen Fällen ist vor dem Einsatz in Bauteilversuchen eine Validierung der einzelnen Systemkomponenten notwendig, um realistische Dehnungswerte zu erhalten bzw. das Dehnungsverhalten und seine Einflüsse adäquat interpretieren zu können (vgl. Abschnitt 2.2.2). Einige Autoren erwähnen explizit die hohe Relevanz der Validierung verschiedener Coatingmaterialien, Kabelaufbauten sowie Klebstoffe für die jeweiligen Anwendungszwecke [52, 53, 65, 84, 120]. Im Folgenden werden diesbezüglich die bisherigen Validierungsaktivitäten hinsichtlich der drei Anwendungsszenarien zusammengetragen (vgl. Abschnitt 1.2).

3.1 Optische Fasern auf Stahloberflächen

1997 führten Davis et al. Versuche zur Genauigkeit von FBG-Sensoren gegenüber DMS auf Aluminiumplatten im 3-Punkt-Biegeversuch durch [25]. Die Abweichung zwischen den beiden Messverfahren betrug bei der Dehnung bis zu $2000 \mu\epsilon < 1\%$. Bei größeren Verformungen ergaben sich Differenzen von ca. 3 %. Leider fehlen Angaben zum verwendeten Klebstoff, Coatingmaterial und den Vorbereitungsmaßnahmen. Weitere Untersuchungen zum Dehnungsübertragungsverhalten von FBG-Sensoren führte die Forschergruppe um Li in verschiedenen Matrizen durch [80]. An Zugversuchen von Stahlplatten überprüften die Forscher ihre Dehnungsübertragungsmodelle von oberflächenapplizierten FOS. Im Zuge dessen fanden sie heraus, welche Faktoren die Dehnungsübertragung beeinflussen (vgl. Abschnitt 2.2.2). Die Versuchsergebnisse zeigten Dehnungsverluste von ca. 10 % im Vergleich zur Referenzmessung. Allerdings wurde hierbei weder das Coatingmaterial noch der verwendete Klebstoff und die Vorbereitung der Klebestelle dargestellt. Eine umfängliche Validierung von FBG-Sensoren für Sensoren, die auf metallischen Werkstoffen appliziert waren, führte Schlüter durch [119]. Sie verglich im Zugversuch das Dehnungsverhalten von unterschiedlichen Klebstoffen und Coatingmaterialien. Ihre Ergeb-

nisse zeigen, dass v.a. mit dem Ormocer[®]-Coating gute Dehnungsübertragungswerte im Vergleich mit der DMS-Messung und der Messung mit einer entcoateten Faser realisiert werden können. Dessen ungeachtet beziffern sich die Übertragungsverluste auf ca. 18 % bis 40 %. Quiertant et al. verglichen im Zugversuch und Pull-out-Test an Bewehrungsstäben die erreichten Dehnungen von Acrylat- und Polyimidcoatings [109]. Dafür frästen die Autoren eine Nut in den Bewehrungsstab und applizierten eine Polyimidfaser darin. Die Faser mit Acrylatcoating wurde auf die Oberfläche des Bewehrungsstabs geklebt. Die mit Acrylat ummantelten Fasern maßen niedrigere Verformungen als die Sensoren mit einem Polyimidcoating, allerdings mehr als die Referenzmessung. Gemäß den Dehnungsübertragungsmodellen aus Abschnitt 2.2.1 sollten die Verluste zu einer geringeren Dehnung führen. Des Weiteren fehlen Angaben zum verwendeten Klebstoff und zu den Vorbereitungsmaßnahmen der Klebefuge. In [118] wird die Anwendung der VFOS mithilfe von Polyimidfasern auf PEEK-Oberflächen vorgestellt. Im Zugversuch konnten die Autoren unter Einsatz des Epoxidharzklebstoffs X280 Dehnungswerte von 1,5 % erzielen. Hierzu fehlt ein Vergleich mit einer Referenzmessung; eine Variation der Coatingmaterialien fand nur im Zuge der Messung in der Matrix statt. Hoult et al. untersuchten an Probekörpern aus Stahl die Unterschiede zwischen Polyimid- und Nyloncoatings unter Einsatz des Cyanacrylatklebstoffs LOCTITE 4851 [69]. Im Zugversuch stellte die Forschergruppe fest, dass das steifere Polyimid die Dehnungswerte scheinbar besser überträgt. Die Werte der Sensoren mit einem Nyloncoating fielen teilweise höher aus als die der DMS-Messung. Den Einfluss der Korrosion auf die Klebefuge zwischen Faser und Bewehrungsstab betrachteten Davies et al. in [26, 27]. Die Autoren prüften in diesem Zusammenhang wiederum die Dehnungsübertragung von Polyimid- und Nylonfasern, die sie mit einem Cyanacrylatklebstoff applizierten. Zusätzlich wurde der Einfluss einer Abdeckung durch Silikon oder Epoxidharz untersucht. Wiederholt lückenhaft ist der Vergleich mit einem Referenzmessverfahren. Die Forscher fanden ungeachtet dessen heraus, dass die Polyimidfaser die Dehnungen präziser überträgt und dass Nylonfasern geeigneter für die Rissdetektion sind. In [28] ermittelten die gleichen Autoren die schwindinduzierten Dehnungen von Betonprobekörpern anhand von auf Bewehrung applizierten VFOS. Auch hierbei werden weder Angaben zum Klebstoff oder zur Vorbehandlung vermittelt, noch ein Vergleich verschiedener Coatinmaterialien durchgeführt. Schmidt-Thrö et al. führten Vergleichsversuche mittels DMS und Faser mit Polyimidcoating an einer Stahlprobe durch [120]. Hierbei ergaben sich geringere Abweichungen zwischen der Faser- und der Referenzmessung gegenüber den zuvor genannten Veröffentlichungen. Die Forscher geben an, dass je nach Messaufgabe eine Untersuchung der Dehnungssensitivität der Komponenten Klebstoff und Coating unabdingbar ist. In [3] verglichen die Autoren verschiedene Klebstoffe (Cyanacrylat und Silikon) an Bewehrungsstäben im Biegeversuch. Der Unterschied der Referenzmessung mittels DMS und der Fasermessung beziffert sich

teilweise auf 20 % bis 30 %. Eine Variation der Coatingmaterialien wurde nicht durchgeführt. Speck et al. untersuchten die Dehnungsunterschiede von Fasern mit Acrylat- und Polyimidcoating [126]. Sie applizierten die Sensoren mit einem Cyanacrylatklebstoff und einem 2-K-Epoxidharz auf nachträglich einbetonierte Messinggestelle. Die Autoren stellten fest, dass das Polyimidcoating die Dehnungen exakter überträgt; im Vergleich zur Referenzmessung zeigten die Polyimidfasern höhere Dehnungswerte, während die Acrylatfasern ca. 70 % bis 90 % vermittelt. Allerdings wurden die Referenzdehnungen an der Oberfläche des Betonprobekörpers und nicht am integrierten Messinggestell gemessen. Zwischen den beiden Klebstoffen konnten keine Unterschiede festgestellt werden.

3.2 Optische Fasern auf Betonoberflächen

Bereits 1997 untersuchten Habel et al. FOS auf dessen Eignung als Dehnungsmessverfahren im Bauwesen [58]. Unter anderem prüfte die Forschergruppe die Dehnungsübertragungseigenschaften von FOS-Dehnmessstreifen auf Basis von Fabry-Perot-Sensoren auf Betonoberflächen. Die Autoren geben Hinweise, welche Faktoren für eine adäquate Dehnungsübertragung zu berücksichtigen sind. Sie benennen allgemein den Einfluss des Coatings, des Klebstoffs sowie die Vorbereitung der Betonoberfläche mittels Schleifen und Grundieren. Auf eine detaillierte Darstellung der Ergebnisse für die Anwendung von FOS auf der Betonoberfläche verzichten sie allerdings. Darüber hinaus wird auf die Unterschiede bzgl. der Dehnungsübertragung zwischen Fasersensoren und FOS-Dehnmessstreifen hingewiesen (vgl. Abschnitt 2.2.1). Bastianini et al. nutzten FBG-Sensoren auf Betonoberflächen zur Überwachung von Brücken im SHM [13]. Zwar fehlt ein Vergleich mit einem Referenzmessverfahren wie auch eine Betrachtung unterschiedlicher Coatingmaterialien und Klebstoffe, die Autoren weisen allerdings auf die Notwendigkeit der Vorbehandlung von Betonoberflächen hin. 2011 wurde in [52] die VFOS auf Basis von Brillouinstreuung zur Rissdetektion auf Betonoberflächen angewendet. Dabei nutzte die Forschergruppe Sensoren, die in einem speziellen Tape integriert waren. Für die Rissüberbrückung kam ein Klebstoff mit einem niedrigen E-Modul zum Einsatz, um die Faser nicht zu beschädigen. Die entwickelten Sensoren wurden zum Rissmonitoring auf einer Brücke und einer Pipeline installiert. Auf eine Vorbehandlung der Klebefuge verzichteten die Autoren komplett; ein Vergleich mit einer Referenzmessung fehlt. Villalba et al. untersuchten die Eigenschaften der VFOS auf Basis von Rayleighstreuung auf Betonoberflächen [129]. Dazu applizierten sie eine Polyimidfaser auf einer Betonplatte und verglichen die Werte mit den Dehnungen der Bewehrung, gemessen mittels DMS. Neben der Art und Weise der Applikation und Vorbehandlung der Klebefuge erwähnen die Autoren die Sorte des verwendeten Klebstoffs. Auf das Freilegen der Gesteinskörnung (vgl. Abschnitt 2.3.3) und

auch eine Variation der Coatingmaterialien wurde jedoch verzichtet. Darüber hinaus maß das Referenzverfahren die Dehnung der Bewehrung und nicht die der Betonoberfläche – ein Grund dafür, dass Unterschiede von 16 % bis 24 % gemessen wurden. In [15] wurde ebenfalls VFOS auf Betonoberflächen behandelt. Der Schwerpunkt lag auf der Rissdetektion, die die Autoren mit Betonbalken im 4-Punkt-Biegeversuch untersuchen wollten. Dazu entwickelten sie ein spezielles Sensorkabel, das den Dehnungsverlauf in Rissnähe unbeschadet messen kann. Durch den Kabelaufbau kam es zur verstärkten Schubverzerrung zwischen dem äußeren Rand und dem inneren Glaskern (vgl. Abschnitt 2.2.1). Bao et al. erwähnten in [4] bereits die schlechtere Dehnungssensitivität von Sensorkabeln. Mithilfe einer Transferfunktion passten sie die Werte entsprechend an. Die Ergebnisse – bereinigt durch die Transferfunktion – zeigen eine gute Übereinstimmung mit den als Referenz verwendeten induktiven Wegaufnehmern. Dennoch werden keine alternativen Coatings, Kabel, Klebstoffe oder auch Vorbehandlungsmaßnahmen untersucht. Rodriguez et al. applizierten eine optische Faser schleifenartig auf die Stegoberfläche eines vorgespannten Betonbalkens [114]. Damit wollten sie die Schubbelastung des Balkens unter Biegebelastung aufzeichnen und beweisen, dass sich mithilfe der VFOS auf Basis der Rayleighstreuung Risse vorhersehen lassen. Die Forschergruppe verzichtete jedoch auf eine Beschreibung der Applikation, der Vorbehandlung, der verwendeten Fasermaterialien und auch der Klebstoffe. Des Weiteren fehlt ein Vergleich mit einem Referenzmessverfahren zur Evaluierung der gemessenen Dehnungen. Barrias et al. befassten sich in mehreren Artikeln mit oberflächenapplizierten VFOS [8, 10–12]. Dabei beschreiben sie den Einsatz von Polyimidfasern im Labor und auf Bauwerken zum SHM. In [10] wurden die Fasern mithilfe eines 2K-Epoxidharzes auf der Oberfläche eines Betonbalkens appliziert und im 4-Punkt-Biegeversuch mit einer analytischen Bemessung und einer Referenzmessung mittels DMS verglichen. Im Bereich $< 100 \mu\epsilon$ kam es zu Abweichungen von ca. 10 % bis 20 %. Eine entsprechende Vorbehandlung der Betonoberfläche konnte nicht festgestellt werden. Gleichmaßen kam nur eine Klebstoff-Coating-Kombination zur Anwendung. In einer folgenden Versuchskampagne untersuchten die Autoren unterschiedliche Klebstoffarten hinsichtlich ihrer Dehnungsübertragungseigenschaften auf Betonoberflächen [8, 11]. Mittels eines Cyanacrylatklebstoffs konnten sie realistischere Dehnungen messen. Dennoch bezifferte sich die Abweichung zur Referenzdehnung auf ca. 40 %. Allerdings fehlte die Erprobung unterschiedlicher Coatingmaterialien und Vorbehandlungsmaßnahmen der Oberfläche. Auf einem vorgespannten Betonbalken applizierten die Autoren in [44] Fasern mit Nylon- und Polyimidcoating mithilfe eines Cyanacrylatklebstoffs. Im Vergleich zur Referenzmessung mittels DMS zeigten die Fasersensoren gute Übereinstimmungen im Bereich $< 100 \mu\epsilon$. Es ist unklar, wie sich die Coating-Klebstoff-Kombination bei höheren Dehnungen verhält. Gleichmaßen fanden keine Untersuchungen zur Vorbehandlung der Betonoberfläche statt.

3.3 Optische Fasern in Betonmatrices

Zum Einsatz der FOS in der Betonmatrix gibt es bereits einige Validierungsaktivitäten: Habel et al. untersuchten in [58] die Dehnungssensitivität verschiedener Coatingmaterialien, darunter Carbon, Polyimid und Acrylat. Mithilfe von eingebetteten Fabry-Perot-DMS ermittelten die Autoren im Druckversuch die Dehnungsverluste im Vergleich zum Referenzverfahren. Die Ergebnisse zeigten Abweichungen von 10 % bis 20 %. Zeng et al. applizierten VFOS auf Basis von Brillouinstreuung auf Glasfaserstäbe und integrierten sie in die Matrix von Betonbalken [135]. Selbst mit einem Trägerwerkstoff erzielten die Autoren im Biegeversuch wesentlich geringere Dehnungen als mit der Referenzmessung. In [82] wurden FBG-Sensoren in Mörtelprismen eingebettet und die Verformungen im Zugversuch mit einer Referenzdehnung verglichen. Die geringere Dehnung der FBG von ca. 25 % bis 30 % wurde durch eine Transfergleichung an die des Referenzverfahrens angeglichen. 2003 erweiterten die Autoren ihre Untersuchungen mit Mörtelprismen um ein Szenario im Druckversuch [81]. In beiden Artikeln werden keine Angaben zu den Parametern des eingesetzten Coatings gemacht; auch eine Variation der Coatingwerkstoffe fehlt. Delephine-Lesoille et al. validierten ein speziell entwickeltes Dehnungskabel und integrierten es in Betonzyylinder [29]. Im anschließenden Druckversuch erreichten die Autoren nahezu keine Dehnungsverluste bis zu einer Verformung von $-350\text{ }\mu\epsilon$. Ungeklärt bleibt das Verhalten der FOS bei höheren Dehnungen. Henault et al. prüften ebenfalls die Dehnungsübertragungseigenschaften von Sensorkabeln in einer Betonmatrix [63–65]. Im Vergleich zur Referenzdehnung erreichten die Kabel ca. 20 % geringere Verformungen, weshalb die Autoren einen Algorithmus zur Anpassung entwickelten. Hinsichtlich der Faserkabel gaben Bao et al. in [4] bekannt, dass die Dehnungssensitivität zu gering sei. Li et al. ermittelten in ihrem Modell für einen Beton mit einem E-Modul von $40\,000\text{ N/mm}^2$ für FOS, die durch ein Coating geschützt werden, Dehnungsverluste von ca. 10 % [80]. Die Versuche zur Bestätigung der Hypothese fanden allerdings mit auf Stahlproben geklebten FOS statt. Ähnliche Übertragungswerte ermittelten die Autoren von [66]. In diesem Zusammenhang prüften sie das Dehnungsverhalten von optischen Fasern in der Matrix und untermauerten ihre Annahmen durch eine FE-Analyse. Mithilfe einer entwickelten Transferfunktion konnten die Rohdaten in reale Dehnungswerte konvertiert werden. Ohno et al. integrierten FOS in die Druck- und Zugzone eines Betonbalkens und überprüften die angezeigten Dehnungen mit denen eines Referenzverfahrens [104]. Sie fassten zusammen, dass das Coating sich nicht ausreichend im Beton verankern kann, wodurch die ermittelten Verformungen niedriger wären. Auch hierbei fehlen wesentliche Informationen zum verwendeten Coating. In [6] verwendeten die Autoren VFOS auf Basis der Brillouinstreuung, um die schwindinduzierte Dehnung von zylindrischen Mörtelproben zu messen. Ihre Untersuchung zeigte nahezu identische Dehnungswerte

wie das Referenzmessverfahren. Jedoch fehlen Angaben zum verwendeten Coating sowie Variationen des Coatingmaterials. Die Autoren erweiterten ihr Versuchsprogramm zur Untersuchung von schwindinduzierten Delaminationseffekten [5]. Dabei wurden zwei verschiedene Fasertypen mit einem Coatingdurchmesser von $423\mu\text{m}$ und $1312\mu\text{m}$ eingesetzt. Trotz der enormen Coatingdicke (vgl. Abschnitt 2.2.1) machen die Autoren keine Angaben zu möglichen Dehnungsübertragungsverlusten. Mithilfe eines Messinggestells als Trägerwerkstoff in kleinformatigen Betonprobekörpern untersuchten die Autoren von [126] Polyimid- und Acrylatfasern u.a. auf ihre Dehnungsübertragungseigenschaften. Die Ergebnisse zeigten, dass das Polyimidcoating die Dehnungen besser überträgt. Im Vergleich zu den beiden Referenzmessverfahren (Photogrammetrie und DMS) ergaben sich beim Polyimidcoating Koeffizienten bis zu 1,2. Das Acrylatcoating transferierte geringere Verformungen auf den Kern als die Referenzmessung und zeigte Werte von ca. 0,85 bis 0,70. Die Referenzmessung fand jedoch nur auf der Oberfläche des Probekörpers statt und, anders als die FOS, nicht in der Matrix. Zudem verwendeten die Autoren einen Trägerwerkstoff aus Messing, auf dem sie die Fasern applizierten. Die Klebefuge sowie das Messinggestell könnten die Ergebnisse gleichermaßen beeinflussen wie die unterschiedlichen Messpositionen von Faseroptik und Referenzmessverfahren.

3.4 Zusammenfassung und Forschungslücken

Der oben dargestellte Stand der Forschung zeigt, dass das Messverfahren bisher ungenügend und lückenhaft für die drei ausgewählten Szenarien (vgl. Abschnitt 1.2) validiert wurde. Bis auf [119], wo die Dehnungsübertragungseigenschaften explizit adressiert werden, existieren keine vergleichbaren Untersuchungen. Ungeachtet dessen sind in [119] wie auch in anderen oben aufgeführten Veröffentlichungen die Übertragungsverluste immens im Vergleich zu eigenen Experimenten [132]. Darüber hinaus bestehen Unstimmigkeiten bezüglich der Klebefuge und der Vorbehandlung der Oberflächen. Diese sind entscheidend für den Dehnungstransfer vom Substrat auf die Sensoren (vgl. Abschnitt 2.3.1). Zudem fehlen oftmals Angaben zum verwendeten Klebstoff und dazu, inwiefern generell eine Vorbehandlung stattgefunden hat. Vor allem bei der Anwendung auf Betonoberflächen zeigen eigene Untersuchungen, dass ohne adäquate Vorbereitungsmaßnahme keine reale Dehnung gemessen werden kann. Gleichmaßen empfiehlt Keil in [74] das Freilegen der Gesteinskörnung und ggf. eine Grundierung beim Einsatz von DMS auf Betonoberflächen.

4 Methodik der Validierung

Dieses Kapitel beschreibt die Entwicklung der Prüfmethode zur Validierung des Messsystems auf Stahl- und Betonoberflächen sowie in der Betonmatrix. Das Kapitel gliedert sich in drei Abschnitte, in denen jeweils ein Anwendungsszenario autonom betrachtet wird. Informationen, die in allen Untersuchungen identisch sind, werden vorab aufgeführt: Hierzu zählen die Fasermaterialien, die Klebstoffarten für die VSt und VBe sowie die Betonmatrix für die VBe und VMa.

In allen Versuchen kamen drei verschiedene Fasertypen zum Einsatz, die bisher prävalent für die Dehnungsmessung eingesetzt worden sind (vgl. Kapitel 3). Diese sind in Tabelle 4.1 mit ihren wesentlichen Eigenschaften aufgeführt. Der entscheidende Unterschied besteht in den verschiedenen Coatingmaterialien: Neben Polyimid und Acrylat kam das Ormocer[®]-Coating (organisch modifizierte Keramik) zum Einsatz [42, 119]. Da das Coatingmaterial gegenüber den anderen Fasereigenschaften hinsichtlich seiner Bedeutung für die vorstehenden Versuche hervorsticht, wurde dieser Aspekt der Nomenklatur zugrunde gelegt (4.1).

Bei der Applizierung der Fasern zur VSt und VBe wurden die gleichen Klebstoffarten verwendet. Unterschiede betreffen dagegen die Prüfkörperoberfläche sowie die Vor- und Nachbehandlungsmaßnahmen. Die Einzelheiten finden sich in den entsprechenden Abschnitten.

Tabelle 4.1: Eigenschaften und Nomenklatur der verwendeten Fasermaterialien der Validierungsversuche

Coatingmaterial	Ormocer [®]	Polyimid	Acrylat
Nomenklatur	O	P	A
Fasertyp	LAL-1550-125	FSG-A01	SMF-28e+ [®]
∅ Coating [µm]	195	155 ± 5	242 ± 5
∅ Cladding [µm]	125 ± 1	125	125 ± 0,7
Dämpfung [db/km]	< 2.5	< 0.6	0.02
Hersteller	FBGS	FBGS	Corning [®]

Tabelle 4.2: Übersicht der verwendeten Klebstoffe zur Applizierung der Fasersensoren (VSt,VBe)

Klebstoffbezeichnung	Klebstoffart	Nomenklatur
M-BOND 200	Cyanacrylat	1:MB
LOCTITE HY 4090	Cyanacrylat-Epoxidharz-Hybrid	2:HY
LOCTITE EA 3430	2-K-Epoxidharz	3:EA
Z70	Cyanacrylat	4:Z70
MD-MEGABOND 2000	Methylmethacrylat	5:MD
LOCTITE 4902	Cyanacrylat	6:L

Zur Beurteilung möglicher Unterschiede wurden sechs verschiedene Klebstoffe unterschiedlicher Art verwendet (Tabelle 4.2). Die Empfehlung des Sensorsystemherstellers ist eins der drei verwendeten Cyanacrylate M-BOND 200 [87], die bevorzugt für DMS eingesetzt werden [74]. Neben M-BOND 200 und Z70 ist der LOCTITE 4902 ein Cyanacrylatklebstoff, jedoch mit einer Bruchdehnung von mehr als 120 % [108]. Der Einsatz dieses Klebstoffes wird damit begründet, dass hochelastische Klebstoffe die Möglichkeit bieten, sich bei Exposition von Feuchtigkeit restrukturieren zu können (vgl. Abschnitt 2.3.2), was v.a. in feuchten Milieus des Betons von Vorteil sein kann. Eine weitere Möglichkeit, die Klebefuge vor Schäden durch Eindringen von Wasser zu schützen, ist die Verwendung von Epoxidharzen (vgl. Tabelle 4.2). Diesbezüglich kam der 2-K-Epoxidharz EA 3430 von LOCTITE zum Einsatz. Methylmethacrylate wie MD-MEGABOND 2000 haben akzeptable Eigenschaften in feuchten, aggressiven Umgebungen [91], wie sie in Betonmatrices vorzufinden sind. Eine Auflistung der verwendeten Klebstoffarten sowie deren Nomenklatur findet sich in Tabelle 4.2.

Im Zuge der VBe und der VMa kam eine hochfeste, selbstverdichtende Feinkornbetonmatrix zum Einsatz. Beim Zement handelt es sich um ein Compound der Firma Dyckerhoff [39]. Die Bestandteile der Matrix sind in Tabelle 4.3 aufgelistet. Der Feinkornbeton soll die Streuung zwischen den einzelnen Probekörpern gering halten. Das Größtkorn von maximal 2 mm minimiert die Inhomogenität der Zusammensetzung im Vergleich zu Matrices mit größerem Größtkorn. Im Hinblick auf die VBe kann ein hochfester Betonprobekörper Einflüsse einer nicht planparallelen Ausrichtung der Lasteinleitungsflächen der Prüfmaschine geringfügig ausgleichen. Darüber hinaus minimiert sich die Unschärfe weitestgehend durch sich verändernde Oberflächenstrukturen gegenüber Betonen mit größerem Größtkorn.

Hinsichtlich der Methodik, Auswertung und Diskussion wird auf eine einheitliche

Tabelle 4.3: Zusammensetzung der Betonmatrix innerhalb der VBe und VMa

Matrix	Menge	Einheit
BMK-D5-1 (Compound)	815	
BCS 0.06/0.2	340	
Sand 0/2	965	[kg/m ³]
Wasser	190	
Fließmittel (MC-VP-16-0205-02)	17	

Nomenklatur für Faserstränge und Probekörper zurückgegriffen. Abbildung 4.1 listet die Bedeutungen der einzelnen Bestandteile der Samplebezeichnungen auf.

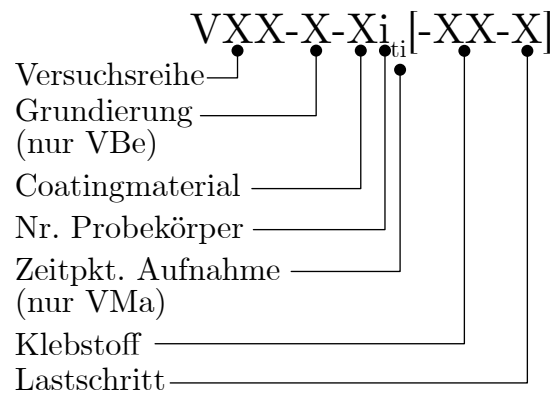


Abbildung 4.1: Nomenklatur der Faserstränge und Probekörper

4.1 Applikation auf der Stahloberfläche

Die folgenden Abschnitte erläutern die Methodik der VSt. Der erste Abschnitt liefert Informationen und Materialkennwerte zu den angewandten Probekörpern. Darin finden sich auch Details zum verwendeten Abdeckmittel. Wie in Abschnitt 2.3.3 erläutert, ist die Vorbereitung der Messstelle essentiell für die Dehnungsübertragung, weshalb eine detaillierte Darstellung folgt. Der dritte und vierte Abschnitt beinhaltet sämtliche Informationen zum Versuchsaufbau und -ablauf sowie alle relevanten Angaben zur photogrammetrischen Referenzmesstechnik.

4.1.1 Prüfkörper, Prüfmaterialien

Hinsichtlich der VSt sollte ein Trägermaterial gefunden werden, das ähnliche Eigenschaften wie Bewehrungsstahl besitzt und zusätzlich die Möglichkeit bietet, mehrere Klebstoffe direkt zu vergleichen. Um den Prüffehler weiterhin möglichst gering zu halten und die Vergleichbarkeit zwischen den Probekörpern zu gewährleisten, kam ein Präzisionsflachstahl S355J2+N als Trägermaterial zum Einsatz [33].

Die Abmessung der Probekörper beträgt in Länge, Breite und Dicke 500 mm, 60,3 mm und 15,3 mm. Der Präzisionsflachstahl hat eine Streckgrenze von ca. 355 N/mm² und Toleranzen in Breite und Dicke von +0,4 mm und < -0,05 mm.

4.1.2 Vorbereitung der Probekörper, Applizierung der Messfaser

Die Vorbereitung der Probekörper und die Applizierung der Faser auf Stahl erfolgt in Anlehnung an Abschnitt 2.3.1 und 2.3.3 in drei Hauptprozessen:

- Vorbereitung und Vorbehandlung der Probekörperoberfläche
- Applizierung der Faser
- Eventuelle Nachbehandlung bzw. Abdeckung

Der Stellenwert einer Vorbehandlung wurde in Abschnitt 2.3.3 ausführlich dargestellt: Sie dient der Sicherstellung einer funktionellen und langzeitstabilen Klebefuge zwischen Faser und Stahloberfläche. Die Vorbereitung und Vorbehandlung der Stahloberfläche teilt sich wiederum in mehrere Prozesse, die im Folgenden erläutert werden:

- Grundreinigung
- Aufrauen mit Schmirgelleinen K200 nach Muster in Abbildung 4.2
- Druckluftreinigung
- Aufrauen mit Schmirgelleinen K400 nach Muster in Abbildung 4.2
- Druckluftreinigung
- Chemische Reinigung der Oberfläche mittels Isopropanol
- Vorbehandlung mit Primer (im Fall von M-BOND 200)
- Reinigung und anschließende Fixierung der Faser

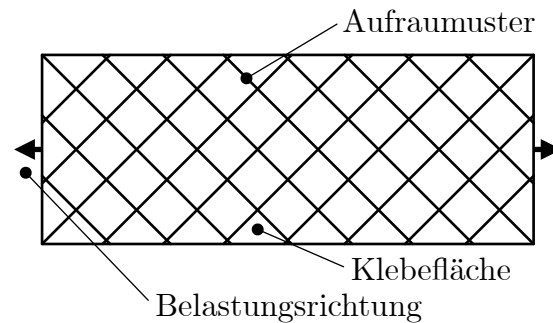


Abbildung 4.2: Aufraumuster der Probekörperoberfläche im Bereich der Klebefuge

Als erster Schritt wurde die Oberfläche mit Isopropanol und einem fusselfreien Einmaltuch gereinigt. Das Reinigungsmittel entfernt Rückstände aus Öl oder Klebstoffresten, die die Qualität der anschließenden Prozesse mindern. Die Verunreinigungen können sich in den feinen Riefen der Oberfläche festsetzen und damit die Haftung des Klebstoffes mindern oder den Haftprozess komplett unterbinden (vgl. Abschnitt 2.3.3).

Das Aufrauen fand mit jeweils einem Schmirgelleinen der Körnung 200 und 400 statt, wobei dadurch die Oxidationsprodukte entfernt und die spezifische Oberfläche vergrößert werden. Das Aufraumuster ist Abbildung 4.2 zu entnehmen; nach jedem Vorgang wurde die Oberfläche mit Druckluft gereinigt und das Schmirgelleinen ausgetauscht. Das verhindert einerseits, dass sich der Stahlstaub in den entstehenden feinen Riefen festsetzt, andererseits, dass das Schmirgelleinen durch den anfallenden Stahlstaub zusetzt.

Die chemische Reinigung mittels Isopropanol folgte dem Aufrauen der Oberfläche. Hierzu wurden geeignete fusselfreie Einmaltücher verwendet. Die Reinigung der Oberfläche fand so oft statt, bis keine Schmirgelrückstände im Reinigungstuch zurückblieben.

Nach der Reinigung der Faser wurde sie mit Kapton -Klebpunkten auf dem Probekörper fixiert. Im Falle der Verklebung mit M-BOND 200 wurde die Klebefuge mit einem Primer vorbehandelt. Die Zeit zum Verdunsten des Lösungsmittels beträgt dabei laut Herstellerangaben mindestens zwei Minuten [96].

Hinsichtlich des Vergleichs der Klebstoffe untereinander eignet sich eine schleifenförmige Applikation (Abbildung 4.3). Dadurch können mit einer einzelnen Faser sämtliche Klebstoffe gleichzeitig untersucht werden.

Wie in Abschnitt 2.2.1 aufgeführt, ist die Qualität der Klebeverbindung entscheidend für die Übertragung der Dehnung vom Probekörper auf die Faser. Um den in Abschnitt 2.3.3 dargestellten zeitlichen Veränderungen der Oberfläche entgegenzuwirken, fand unmittelbar im Anschluss an die Vorbehandlung die Applikation der Messfaser mithilfe von Schaumstofftupfern statt. In [87] und [123] sind entsprechende Hinweise zur Ausführung

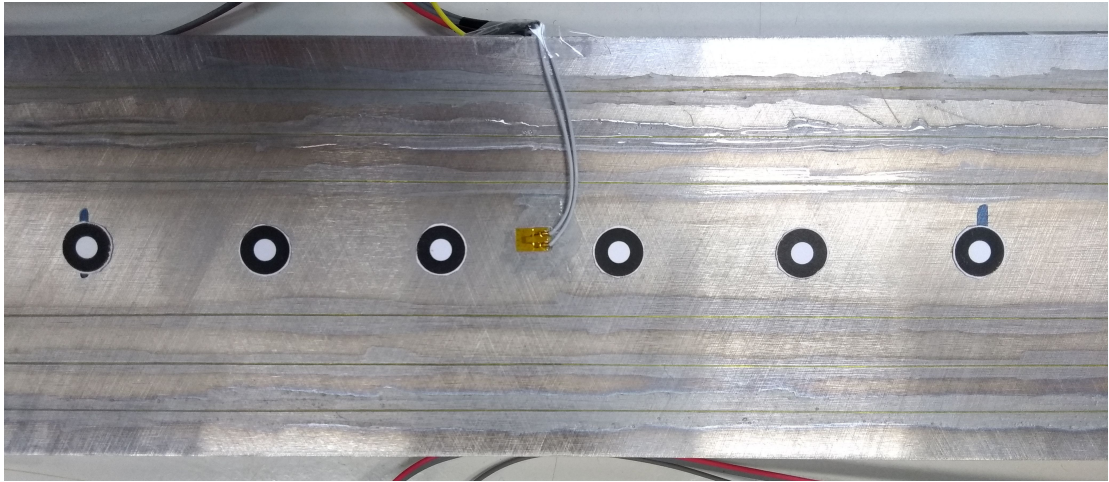


Abbildung 4.3: Probekörper der VSt mit applizierter Faser und Vergleichsmesstechnik

Tabelle 4.4: Mechanische und physikalische Eigenschaften des Abdeckmittels (VSt)

Eigenschaft	Einheit	Wert
E-Modul	[N/mm ²]	372
Härte	Shore D	64
Zugfestigkeit	[N/mm ²]	17,6
Rissdehnung	[%]	31

der Klebefuge zwischen Fasersensor und Probekörper aufgeführt. Abbildung 4.4 zeigt diesbezüglich eine optimale und mangelhafte Ausführung der Klebefuge.

Zusätzlich zur Validierung der Klebstoff- und Coatingkombinationen wurde an einem Probekörper je Serie ein möglicher Einfluss eines Abdeckmittels untersucht. Die Abdeckung schützt die Messfaser vor mechanischen, chemischen sowie Feuchtigkeitseinflüssen. Das Abdeckmittel sollte idealerweise die Klebefuge und die Dehnungsübertragung nicht oder nur geringfügig beeinflussen. Es kam ein 2-K-Epoxidharz ARALDIT®DBF ARADUR®HY 842 mit einer Bruchdehnung von 31 % zum Einsatz, der einen Kompromiss zwischen Schutzfunktion und möglichen Einflüssen auf die Klebefuge darstellt. Es wird davon ausgegangen, dass die hohe Bruchdehnung und der niedrige E-Modul die Dehnungsübertragung nur geringfügig beeinflussen. Die mechanischen und physikalischen Eigenschaften des Abdeckmittels finden sich in Tabelle 4.4.

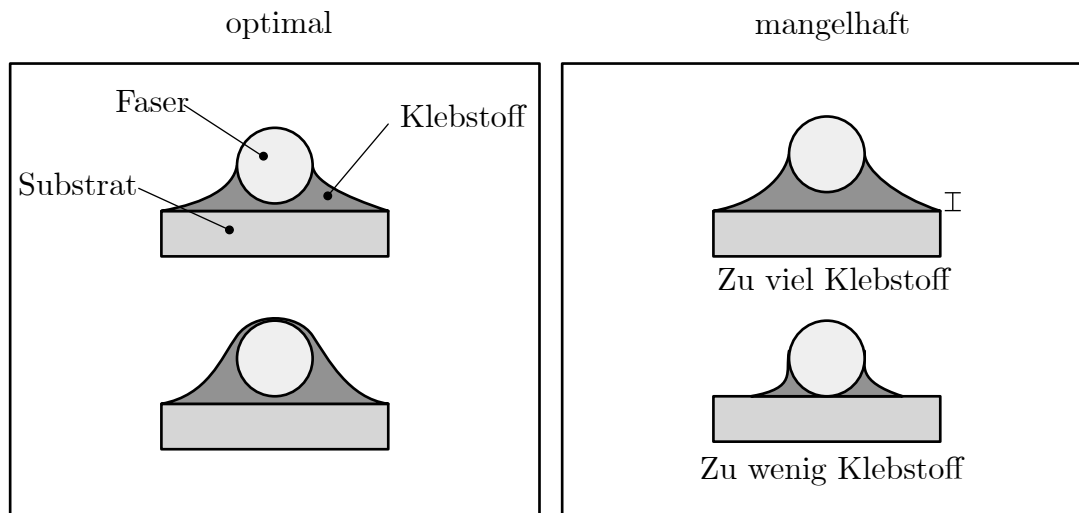


Abbildung 4.4: Optimale (links) und mangelhafte (rechts) Ausführung der Klebefuge nach [123]

4.1.3 Versuchsaufbau und -ablauf

Im Rahmen der VSt kam der 4-Punkt-Biegeversuch zum Einsatz [38]. Er besitzt gegenüber dem Zugversuch entscheidende Vorteile: Der Probekörper wird auf die Auflager gelegt und nicht eingespannt, wodurch sich kein Schlupf und demnach keine externen Biegemomente bilden können. Zudem herrscht zwischen den beiden Lasteinleitungsstellen ein konstantes Biegemoment, das zu einer konstanten Dehnung führt (Abbildung 4.5 a). Der Bereich der konstanten Dehnung dient im Weiteren als Validierungsbereich, in dem die VFOS der Vergleichsmessung gegenübergestellt wird.

Abbildung 4.6 zeigt den Versuchsaufbau und die Anordnung der Dehnungssensoren auf dem Probekörper. Die Messfaser wurde schleifenartig positioniert; für jeden der sechs Faserstränge kam ein Klebstoff aus Tabelle 4.2 zum Einsatz. Die photogrammetrische Vergleichsmessung nutzt die sechs Messpunkte in der Mitte des Probekörpers, um die Verschiebung zwischen ihnen aufzunehmen. Die Messverfahren werden im Validierungsbereich gegenübergestellt. Hinsichtlich der Bettungslänge wurden die Faserstränge über den Validierungsbereich hinaus appliziert (vgl. Abschnitt 2.2.1), wodurch eine adäquate Dehnungsübertragung gewährleistet werden soll.

Der Versuch lief in drei aufeinanderfolgenden Lastschritten bei Raumtemperatur ab. Ziel sollte es sein, die Dehnungsübertragung in Abhängigkeit von unterschiedlichen Lastniveaus zu untersuchen. Tabelle 4.5 zeigt die drei Lastniveaus sowie die analytisch ermittelte Dehnung und Spannung im Probekörper. Bei maximaler Last von 15,2 kN im

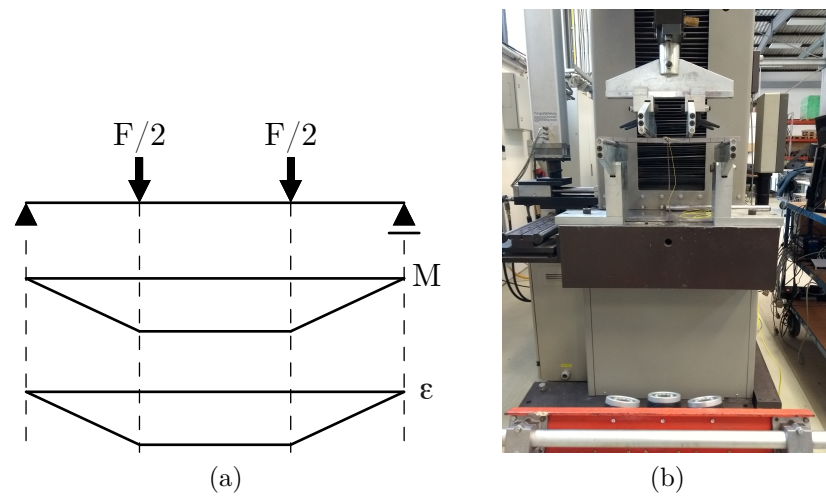


Abbildung 4.5: (a) Biegemomenten- und Dehnungsverlauf des 4-Punkt-Biegeversuchs (VSt); (b) VSt mit photogrammetrischer Vergleichsmessung

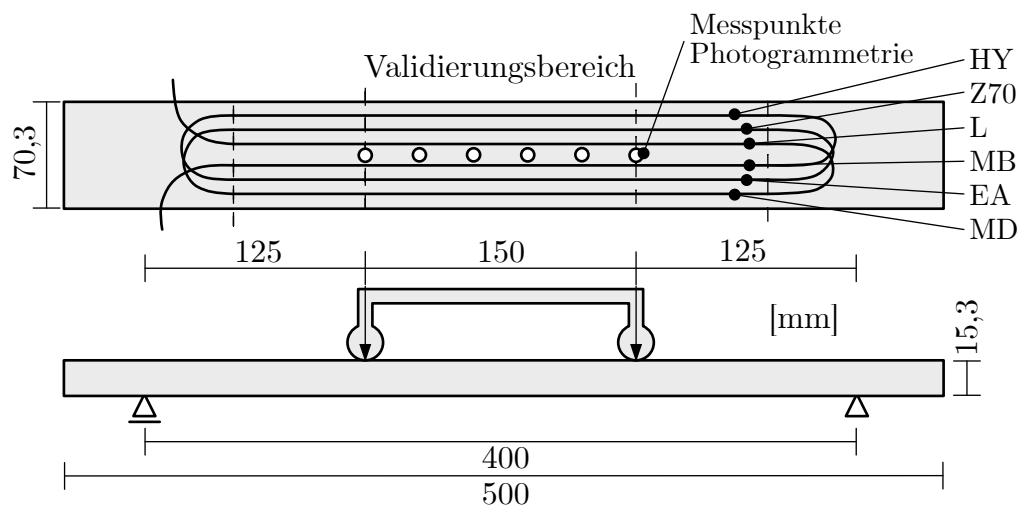


Abbildung 4.6: Präzisionsflachstahl, Versuchsaufbau und Messtechnik (VSt)

Tabelle 4.5: Lastschritte der VSt sowie analytische Dehnung und Spannung im Probekörper

Lastschritt	Kraft [kN]	Dehnung [$\mu\epsilon$]	Spannung [N/mm ²]
1	5,1	550	115
2	10,1	1100	231
3	15,2	1649	346

Tabelle 4.6: Probekörperbezeichnung und dazugehörige Coatingmaterialien (VSt)

Nr.	Bezeichnung	Coatingmaterial	Nachbehandlung
1	VSt-A1	Acrylat	-
2	VSt-A2		-
3	VSt-A3		-
4	VSt-A4		2-k-Epoxidharz
5	VSt-P1	Polyimid	-
6	VSt-P2		-
7	VSt-P3		-
8	VSt-P4		2-k-Epoxidharz
9	VSt-O1	Ormocer [®]	-
10	VSt-O2		-
11	VSt-O3		-
12	VSt-O4		2-k-Epoxidharz

dritten Lastschritt erreicht der Präzisionsflachstahl ca. 98 % seiner Streckgrenze und wird ausschließlich im linear-elastischen Bereich belastet. Jedes Lastniveau wurde fünf Minuten gehalten, um ggf. zeitspezifische Einflüsse der Dehnungsübertragung auf die Klebefuge aufzuzeigen.

Eine Übersicht aller Probekörper mit Bezeichnung und Coatingmaterial zeigt Tabelle 4.6. Um Messschwankungen der beiden Messverfahren zu berücksichtigen, wurde jedes Coatingmaterial mit drei identischen Probekörpern geprüft. Zusätzlich kam auf einem vierten Probekörper ein Abdeckmittel zum Schutz der Fasersensoren zum Einsatz. Wie bereits beschrieben, sollte vorab geprüft werden, ob mögliche Schutzmaßnahmen einen Einfluss auf die Dehnungsübertragung haben.

4.1.4 Vergleichsmesstechnik

Eine photogrammetrische Punktverfolgung kam als Vergleichsmessmethode zum Einsatz. Dabei handelt es sich um ein 3-Kamera-System, das Verschiebungen von Messpunkten in allen drei Richtungen eines Raumes misst (Abbildung 4.5 b). Aus den Verschiebungen zwischen den Messpunkten lassen sich die Dehnungen im Nachgang mithilfe einer unbelasteten Referenzaufnahme errechnen. Um den Durchhang zwischen den beiden Lasteinleitungen zu beachten, wurden im Validierungsbereich sechs Messpunkte appliziert (vgl. Abbildung 4.3 und 4.6). Weitere Informationen zur photogrammetrischen Messmethode sind in der Literatur zu finden [7].

4.2 Applikation auf der Betonoberfläche

Die folgenden Abschnitte beschreiben die Methodik der VBe. Der erste Abschnitt enthält Informationen und Materialkennwerte zu den eingesetzten Probekörpern. Für die VBe ist gleichermaßen die Vorbereitung der Messstelle für die Dehnungsübertragung essentiell. Dementsprechend erfolgt in Abschnitt 4.2.2 eine umfassende Darstellung. Dort finden sich auch Einzelheiten zu den drei Grundierungssystemen, welche in dieser Versuchsreihe zum Einsatz kamen. Der dritte und vierte Abschnitt beinhaltet sämtliche Informationen zum Versuchsaufbau und -ablauf sowie zur angewandten Vergleichsmessmethode.

4.2.1 Prüfkörper, Prüfmateriale

Bei der VBe sollten möglichst alle sechs Klebstoffe gleichzeitig untersucht werden. Dafür eignete sich ein Zylinder als Probekörperform, wobei als Abmessungen eine Höhe $h = 200$ mm und ein Durchmesser $d = 100$ mm gewählt wurden. Die Zusammensetzung der Betonmischung ist in Tabelle 4.3 zu finden. Herstellung und Lagerung der Probekörper fand in Anlehnung an [34] statt. Nach einer Lagerungsdauer von 28 Tagen im Klimaraum (60 % RH, 22 °C) wurden die Probekörper vorbehandelt, mit Messtechnik ausgestattet und anschließend geprüft.

4.2.2 Vorbereitung der Probekörper, Applizierung der Messfaser

Sowohl in Voruntersuchungen zur VBe als auch in der Literatur (vgl. Abschnitt 3.2) finden sich Hinweise, dass eine Vorbehandlung der Betonoberfläche für eine adäquate Dehnungsmessung mittels applizierten Dehnungssensoren notwendig ist. Diesbezüglich sollten die Validierungsversuche durch eine Variation dreier verschiedener Vorbehandlungsmaßnahmen erweitert werden:

- Abschleifen der Zementhaut, Freilegen der Gesteinskörnung
- Abschleifen der Zementhaut, Freilegen der Gesteinskörnung, Grundierung mit Epoxidharz SIKADUR 330
- Abschleifen der Zementhaut, Freilegen der Gesteinskörnung, Grundierung mit Epoxidharz LCL

Ziel ist es, neben den Dehnungsübertragungseigenschaften von Coating und Klebstoff auch einen möglichen Einfluss einer Grundierung zu untersuchen.

Die Vorbereitung der Probekörper und die Applizierung der Faser auf der Betonoberfläche fand in Anlehnung an Abschnitt 2.3.1 und 2.3.3 statt und gliederte sich in drei Hauptprozesse:

1. Vorbereitung und Vorbehandlung der Betonoberfläche
2. Vorbehandlung der geschliffenen oder grundierten Messstelle
3. Applizierung der Faser

Die Vorbereitung und Vorbehandlung der Betonoberfläche gliedert sich wiederum in unterschiedliche Prozesse, die im Nachfolgenden näher erläutert werden. Der Grund der Vorbehandlung wurde in Abschnitt 2.3.3 ausführlich dargestellt: Er dient der Sicherstellung einer funktionellen und langzeitstabilen Klebefuge zwischen Faser und Betonoberfläche. Dazu wurden folgende Schritte durchgeführt:

- Abschleifen der Zementhaut und Freilegen der Gesteinskörnung an der Messstelle
- Druckluftreinigung
- Chemische Reinigung der Messstelle mittels Isopropanol und Grundierung (im Fall der Probekörper mit Grundierung)

Die Vorbehandlung der geschliffenen oder grundierten Messstelle beinhaltet folgende Arbeitsschritte:

- Schleifen, Druckluftreinigung und chemische Reinigung mittels Isopropanol der ausgehärteten Grundierung (im Fall der Probekörper mit Grundierung)
- Vorbehandlung mit Primer (im Fall von M-BOND 200)
- Reinigung und anschließende Fixierung der Faser

Tabelle 4.7: Eigenschaften der beiden Grundierungssysteme nach [111, 122] (VBe)

Eigenschaft	SikaDur 330	L/CL
E-Modul in $[\text{N}/\text{mm}^2]$	3800	3220
Bruchdehnung in $[\%]$	0,9	5,5
Viskosität bei Raumtemperatur in $[\text{mPa}\cdot\text{s}]$	6000	500 ± 100
Topfzeit in $[\text{min}]$	ca. 60	ca. 60

Für die Fixierung der Faser eignen sich Kapton-Klebpunkte. Für die Applikation mittels M-BOND 200 wurde vorher ein Primer aufgetragen. Die Zeit bis zum Verdunsten des Lösungsmittels beträgt laut Herstellerangaben mindestens zwei Minuten [96].

Die Unterschiede der beiden Grundierungsmittel sind zum einen die mechanischen Kennwerte, zum anderen die Viskosität und das Spaltfüllvermögen, das v.a. die Fähigkeit beschreibt, offen gelegte Poren zu versiegeln (Abbildung 2.18). Vor der jeweiligen Grundierung fand eine Vorbehandlung der Messstelle entsprechend den oben dargestellten Schritten statt. Bei beiden Grundierungsmitteln handelt es sich um 2-K-Epoxidharze, die gemäß Herstellerangaben verarbeitet wurden [110, 122]. Nach dem Aushärten des Harzes folgte eine erneute Vorbehandlung der Messstelle inklusive Schleifen, Druckluftreinigen und chemischer Reinigung der Oberfläche mittels Isopropanol. Im weiteren Verlauf folgte die Reinigung und Fixierung der Messfaser sowie ihre Applikation mit den sechs Klebstoffen (Tabelle 4.2). Für die Applizierung mit M-BOND 200 kam der oben beschriebene Primer als Haftvermittler zum Einsatz.

4.2.3 Versuchsaufbau und -ablauf

Im Zuge der VBe kam der axiale Druckversuch zum Einsatz [35]. Dazu werden die Schnittkreisflächen des zylindrischen Probekörpers axial zusammengedrückt (vgl. Abschnitt 4.2.1). Die Druckplatten der Prüfmaschine führen die Last direkt auf den Probekörper ein, wodurch die Querdehnung an der Lasteinleitungsstelle behindert wird und der Prüfkörper ausbaucht (Abbildung 4.7). Um den Einfluss der Ausbauchung auf den Dehnungsverlauf der Faser möglichst gering zu halten, wurde der Validierungsbereich auf eine mittlere Zone des Probekörpers beschränkt.

Die Faser wurde schleifenartig auf die Oberfläche appliziert. Bei jedem einzelnen Faserstrang kam einer der sechs Klebstoffe aus Tabelle 4.2 zum Einsatz. Abbildung 4.8 zeigt diesbezüglich die Anordnung der Messtechnik einschließlich der Vergleichsmessung. Der 8 cm lange Validierungsbereich, in dem die Messung der Fasersensoren mit denen der IWA verglichen wurde, erstreckt sich in der Mitte des Probekörpers. Aus Gründen

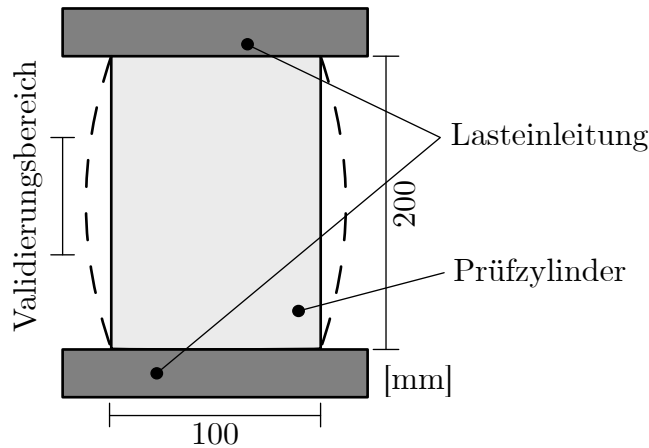


Abbildung 4.7: Lasteinleitungsbereich, Validierungsbereich und Ausbauchen des Prüfzylinders (VBe)

Tabelle 4.8: Lastschritte der VBe sowie die dazugehörige Kraft

Lastschritt	Kraft [kN]
1	200
2	400
3	600

des Einflusses der Bettungslänge ragt die Klebefuge über den Validierungsbereich hinaus (vgl. Abschnitt 2.2.1), um eine adäquate Dehnungsübertragung vom Substrat auf den Fasersensor zu ermöglichen.

Der Versuch fand in drei aufeinanderfolgenden Lastschritten statt. Ziel war es, die Dehnungsübertragung in Abhängigkeit von der Belastung zu untersuchen. Die Höchstlast betrug bei allen Probekörpern $600 \text{ kN} \pm 2 \text{ kN}$, was ca. 60 % der Druckfestigkeit des Betons darstellt. Jedes Lastniveau wurde 30 Sekunden gehalten, um ggf. Einwirkungen auf die Klebefuge hinsichtlich der Belastungsdauer aufzuzeigen. In Tabelle 4.8 sind die einzelnen Lastschritte aufgelistet.

Eine Übersicht aller geprüften Prüfkörper mit der dazugehörigen Nomenklatur, der Grundierungsart sowie dem Coatingmaterial ist in Tabelle 4.9 zu finden. Um Messschwankungen zu berücksichtigen, wurden drei identische Probekörper zu jeder Kombination hergestellt. Damit ergab sich eine Prüfmatrix von insgesamt 27 Prüfzylindern.

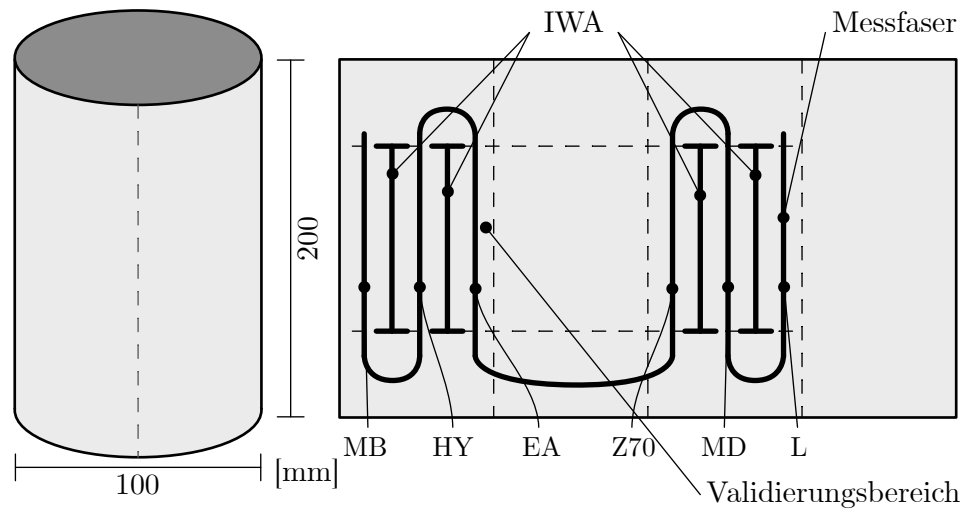


Abbildung 4.8: Druckzylinder, Versuchsaufbau und Messtechnik (VBe)

Tabelle 4.9: Probekörper für die VBe

Nr.	Bezeichnung	Coatingmaterial	Grundierung
1-9	VBe-A	Acrylat	-
	VBe-S-A		SikaDur 330
	VBe-E-A		Epoxidharz L
10-18	VBe-P	Polyimid	-
	VBe-SP		SikaDur 330
	VBe-EP		Epoxidharz L
19-27	VBe-O	Ormocer [®]	-
	VBe-S-O		SikaDur 330
	VBe-E-O		Epoxidharz L

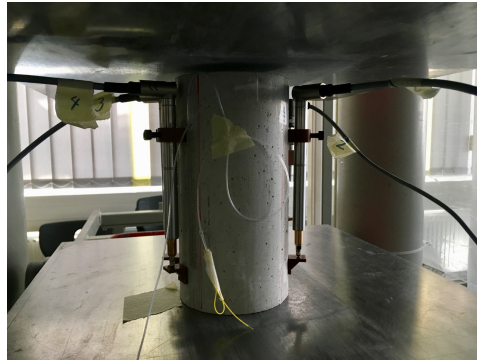


Abbildung 4.9: Versuchsaufbau zur VBe mit induktiver Vergleichsmessung

4.2.4 Vergleichsmesstechnik

Als Vergleichsmessung der VBe kam eine induktive Wegmessung zum Einsatz. Die verwendeten IWA besitzen einen maximalen Messhub von 1 mm bzw. 2 mm, was für diese Versuche einen ausreichenden Messbereich darstellt. Gemäß Abbildung 4.8 wurden vier IWA zum Vergleich mit der Fasermessung eingesetzt. Damit sollten v.a. Abweichungen aus einer nicht planparallelen Ausrichtung der Schnittkreisflächen und der Lasteinleitung der Prüfmaschine berücksichtigt werden. Darüber hinaus lag die Messstelle der IWA unmittelbar neben den Fasersensoren, wodurch ein direkter Vergleich beider Messverfahren ermöglicht wird. Aus den Verschiebungen $\Delta l_{v,VBe}$ sowie der Nulllänge zwischen den Lagerböcken $l_{v,VBe}$ lassen sich im Nachgang mithilfe der Gleichung 5.19 die Dehnungen ermitteln (Abschnitt 5.2.2); die Werte der Nulllängen sind in Tabelle B.1 im Anhang zu finden. Weitere Informationen zur Verformungsmessung mittels IWA sind der Literatur zu entnehmen [90].

4.3 Integration in die Betonmatrix

Die folgenden Abschnitte erläutern die Methodik zur VMa. In diesem Zusammenhang werden einleitend die Prüfkörpergeometrie und die Prüfmaterialien vorgestellt. Eine Applikation der Messfaser ist bei den Versuchen nicht notwendig; im Gegensatz zu den oben vorgestellten Validierungen ist aber ein Einbetten in die Matrix erforderlich. Zunächst werden Informationen zur Vorbereitung und Integration der Fasersensoren dargestellt. In den letzten beiden Abschnitten werden sämtliche Angaben zum Versuchsaufbau und -ablauf sowie zur eingesetzten Vergleichsmessmethode vorgestellt.

4.3.1 Prüfkörper, Prüfmaterien

Im Rahmen der VMa muss die Faser in die Betonmatrix integriert werden, weshalb ausschließlich der Vergleich der drei verschiedenen Coatingmaterialien und deren Dehnungsübertragung Untersuchungsgegenstand war (vgl. Tabelle 4.1). Als Probekörper eigneten sich Betonprismen mit einer Länge von $l = 160$ mm und einer Breite sowie Höhe von $h = b = 40$ mm. Bei der Matrix handelt es sich um einen hochfesten, selbstverdichtenden Beton mit einem Größtkorn von 2 mm. Die Zusammensetzung ist in Tabelle 4.3 aufgelistet.

4.3.2 Vorbereitung der Probekörper und Integration der Messfaser

Die Einbettung in die Betonmatrix erfordert entsprechende Installationshilfen, sodass die Messfaser nach der Betonage an der vorgesehenen Messstelle verbleibt. Im Rahmen der VMa wurde diesbezüglich eine entsprechende Schalung entwickelt, die es ermöglichen die Faser mittig im Probekörper zu fixieren (Abbildung 4.10). Darüber hinaus wurden die Fasern unmittelbar nach der Betonage gespannt, um eine korrekte Positionierung zu gewährleisten. Zu Schutzzwecken und zur Temperaturkompensation lagen die Fasersensoren an beiden Enden in Teflonschläuchen, die 10 mm in die Betonmatrix hineinreichen (Abbildung 4.10 b) und 4.11). Dieser Schutzbereich wurde nicht in der Vergleichsanalyse berücksichtigt und ist entsprechend gekennzeichnet (Abbildung 5.14 und 5.15). Vor dem Einbetten ist eine Reinigung der Fasersensoren mittels Isopropanol obligatorisch, da beispielsweise ölige Oberflächen den Verbund zum Beton stören können. 24 Stunden nach der Betonage wurden die Probekörper ausgeschalt, an der Stirnseite mit Messzapfen ausgestattet und im Klimaraum gelagert. Der Beginn der Lagerung stellt gleichzeitig den Versuchsbeginn t_0 dar.

4.3.3 Versuchsaufbau und -ablauf

Die VMa fand in Anlehnung an DIN 52450 statt [32]. Diesbezüglich wurden die Betonprismen mit stirnseitigen Messzapfen ausgestattet und in einem Messrahmen platziert (Abbildung 4.11). Die Versuchsanordnung minimiert mögliche Zwangsbehinderungen, die das Messergebnis verfälschen könnten, und führt zu einer nahezu freien Schwindverformung. Am oberen Messzapfen liegt eine Messuhr an, die zu Vergleichszwecken die Verformungen am Probekörper misst. Auf Grund der Messzapfen war es notwendig, die Faser 3 mm außermittig in die Betonmatrix zu integrieren (Abbildung 4.11).

Unmittelbar nach der Platzierung im Messrahmen wurden alle Probekörper einer Messreihe in einem Klimaraum mit einer relativen Luftfeuchte von ca. 33% und einer

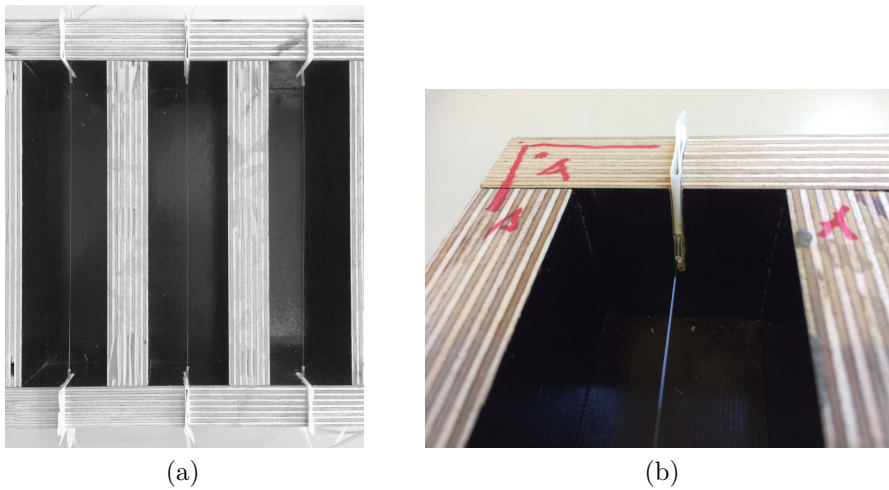


Abbildung 4.10: (a) Schalung für die VMa mit vorgespannter Messfaser; (b) Fixierung mittels Teflonstreifen (VMa)

Temperatur von 22 °C aufbewahrt. In Folge der niedrigen relativen Luftfeuchtigkeit erfahren die Probekörper eine höhere Schwindlast, wodurch die Fasersensoren auch stärker belastet werden.

Zu Beginn der Aufbewahrung im Klimaraum fand eine Nullmessung t_0 statt. Zum Ausschluss von Temperatureffekten wurden zusätzlich die Oberflächen und die Raumtemperatur überprüft. Aufgrund der geringen Abweichung zwischen den Temperaturmesswerten von ($< 2\text{ K}$) wurde der temperaturabhängige Dehnungseffekt als gering eingestuft. Die weiteren Messwerte t_1 und t_2 wurden nach 96 h bzw. 192 h mit beiden Messverfahren gleichzeitig aufgenommen (Tabelle 4.10). Die Probekörper verblieben hierfür im Klimaraum sowie im Messrahmen.

Tabelle 4.10: Messzeitpunkte (VMa)

Messzeitpunkt	Zeit nach der Betonage	
	[h]	[d]
t_0	24 ± 1	1
t_1	96 ± 1	4
t_2	192 ± 1	8

Je Coatingmaterial wurden drei Probekörper geprüft. Damit ergibt sich eine Prüfmatrix von neun Probekörpern mit insgesamt 18 Messwerten (Tabelle 4.11).

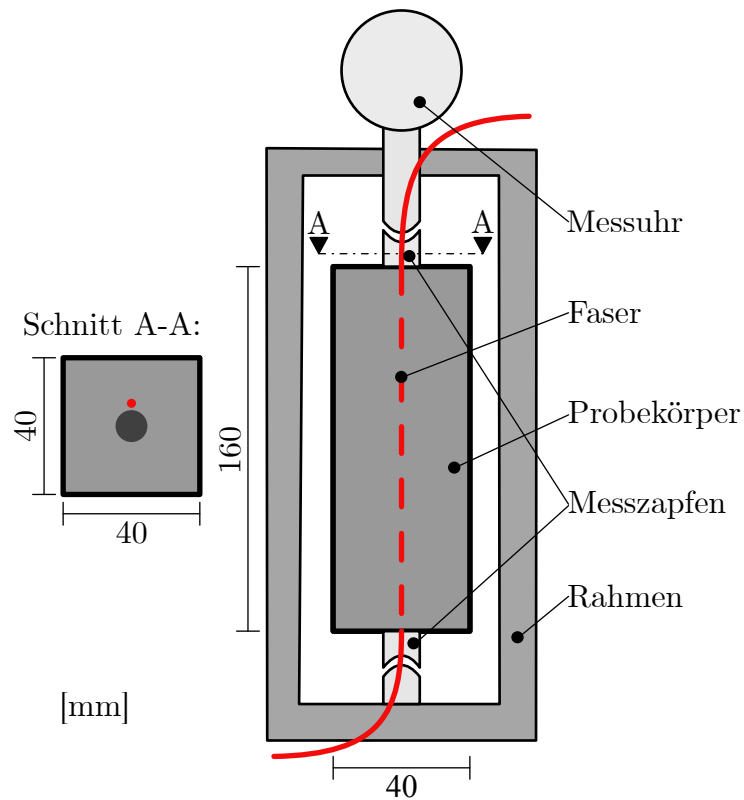


Abbildung 4.11: Versuchsaufbau und Messtechnik (VMa)

Tabelle 4.11: Probekörperbezeichnungen innerhalb der VMa

Nr.	Bezeichnung	Coatingmaterial	l_0 in mm
1	VMa-A1 _{t_i}	Acrylat	160,0
2	VMa-A2 _{t_i}		160,1
3	VMa-A3 _{t_i}		160,0
4	VMa-P1 _{t_i}	Polyimid	159,9
5	VMa-P2 _{t_i}		159,9
6	VMa-P3 _{t_i}		160,2
7	VMa-O1 _{t_i}	Ormocer [®]	159,9
8	VMa-O2 _{t_i}		160,0
9	VMa-O3 _{t_i}		160,4

4.3.4 Vergleichsmesstechnik

Zur Vergleichsmessung im Rahmen der VMa kamen digitale Messuhren zum Einsatz. Die Messuhren zeigen beim oben dargestellten Versuchsaufbau die Längenänderung zwischen den beiden Messzapfen infolge der Schwindverformung der Betonprismen (Abbildung 4.11). Die Dehnung errechnet sich mithilfe der Nulllänge $l_{0,VMa}$, die unmittelbar vor der Nullmessung t_0 mittels Messschieber entnommen wurde (Tabelle 4.11). Eine mit der VFOS vergleichbare Ablesegenauigkeit ist mit Geräten mit einer Auflösung von $\Delta l_{\min} = 0,001 \text{ mm}$ erreichbar. Bei einer Nulllänge von $l_0 = 160 \text{ mm}$ (Prismenlänge ohne Messzapfen), ergibt sich eine absolute Auflösung $a_{v,VMa}$ von:

$$a_{v,VMa} = \frac{\Delta l_{\min}}{l_{0,VMa}} = \frac{0,001 \text{ mm}}{160 \text{ mm}} \cdot 10^6 = 6,25 \mu\epsilon \quad (4.1)$$

5 Auswertung und Ergebnisse

Mithilfe der in dieser Arbeit angewandten VFOS auf Basis der Rayleighstreuung wurden die Dehnungswerte alle 0,265 cm entlang der Faser aufgezeichnet (vgl. Abschnitt 2.1.2). Das führt zu einer Datenmatrix X , in der allen Elementen e neben dem Dehnungswert eine Zeit- und Ortsinformation zugeordnet wird.

$$X = \begin{pmatrix} e_{11} & \cdots & e_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{n1} & \cdots & e_{nm} \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

In dieser Matrix X entspricht jeder Zeilenvektor $\vec{e}_{n+1}$ einem Zeitstempel t , in Abhängigkeit von der Aufzeichnungsrate der Dehnungsmessung. Jeder Spaltenvektor $\vec{e}_{m+1}$ repräsentiert dabei den oben erwähnten Messpunkteabstand von $x = 0,265$ cm. Somit liefert jede Fasermessung eine Matrix, deren Elemente e die Dehnungswerte ε_f je Zeit- und Längenwert beinhaltet:

$$X_f = \begin{pmatrix} \varepsilon_{f,t_1,x_1} & \cdots & \varepsilon_{f,t_1,x_m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \varepsilon_{f,t_n,x_1} & \cdots & \varepsilon_{f,t_n,x_m} \end{pmatrix} \quad (5.2)$$

Die dadurch entstehenden Daten enthalten wesentlich mehr Werte als bei punktuellen Dehnungsmessverfahren. Hinsichtlich der VSt (Abbildung 4.6) betrug die Länge des Messbereichs inklusive der Ausrundung ca. 339 cm, was näherungsweise 1300 Messpunkte entspricht. Bei einer Versuchsdauer von 20 min und einer Datenaufzeichnungsrate von 1 Hz entstanden mit einer einzigen Faser mehr als 1,56 Mio. Dehnungswerte.

Die enorme Datenmenge erforderte es, eine eigens angepasste und fachgerechte Auswertesoftware auf Basis der Programmiersprache PYTHON zu entwickeln. Die Software modifiziert die Versuchsdaten in zwei Stufen: Die erste Stufe umfasst die Aufbereitung der Rohdaten, die in Abschnitt 5.1 dieses Kapitels näher erläutert wird. Der Aufbereitung folgt eine Kongruenzanalyse, in der die einzelnen Versuchsdaten ausgewertet und mit der Referenzmessung verglichen werden (Abschnitt. 5.2.1, 5.2.2 und 5.2.3).

5.1 Aufbereitung der Rohdaten

Der Grund für eine Aufbereitung der Rohdaten sind mögliche Messabweichungen des faseroptischen Messsystems. Zwei Arten von Abweichungen soll die Rohdatenaufbereitung modifizieren: zum einen das allgemeine Messrauschen, zum anderen systematische Messabweichungen, die zum Teil durch das Messverfahren selbst entstehen können.

Das allgemeine Messrauschen wird weitestgehend durch folgende Parameter beeinflusst:

- Qualität und Zustand der Messkomponenten (Stecker, Buchse, Messfaser)
- Qualität der vorhandenen Spleißstellen
- Messmodus (örtliche Auflösung, Messrate)
- Belastungszustand der Faser

Das Messrauschen der in Kapitel 4 vorgestellten Versuche ist entlang der Faser konstant und wird innerhalb der Kongruenzanalyse weitestgehend statistisch eliminiert (Abschnitt 5.2).

Im Vergleich zum Messrauschen können die systematischen Messabweichungen einen gravierenden Einfluss auf die Messergebnisse haben. Neben den Parametern, die das allgemeine Messrauschen beeinflussen, sind weitere Ursachen für das Auftreten dieser Art von Abweichungen bekannt:

- Zu geringer Biegeradius der Messfaser
- Sprunghafte Dehnungsänderungen zwischen den Messpunkten
- Inhomogenität der Klebefuge/Verbundfuge

Die genannten Ursachen bedingen sich gegenseitig: So kann beispielsweise eine inhomogene Klebefuge zu sprunghaften Dehnungsänderungen innerhalb der Messpunkte führen. Diese Messabweichungen können sich derart auswirken, dass entweder kein oder ein extremer Dehnungswert aufgezeichnet wird. Abbildung 5.1 zeigt dazu die Ergebnismatrix des Versuchs VBe-A2 inklusive aller systematischen Messabweichungen, die durch extreme Dehnungswerte im Bereich von $\pm 10\,000\,\mu\epsilon$ erkennbar sind und weitestgehend an den Enden der Klebefugen auftraten.

Die Substitution der systematischen Messabweichungen erfolgt durch eine Approximation auf Grundlage eines Interpolationsverfahrens. Diesbezüglich werden die Messabweichungen identifiziert und anschließend mit interpolierten Werten substituiert. Zur

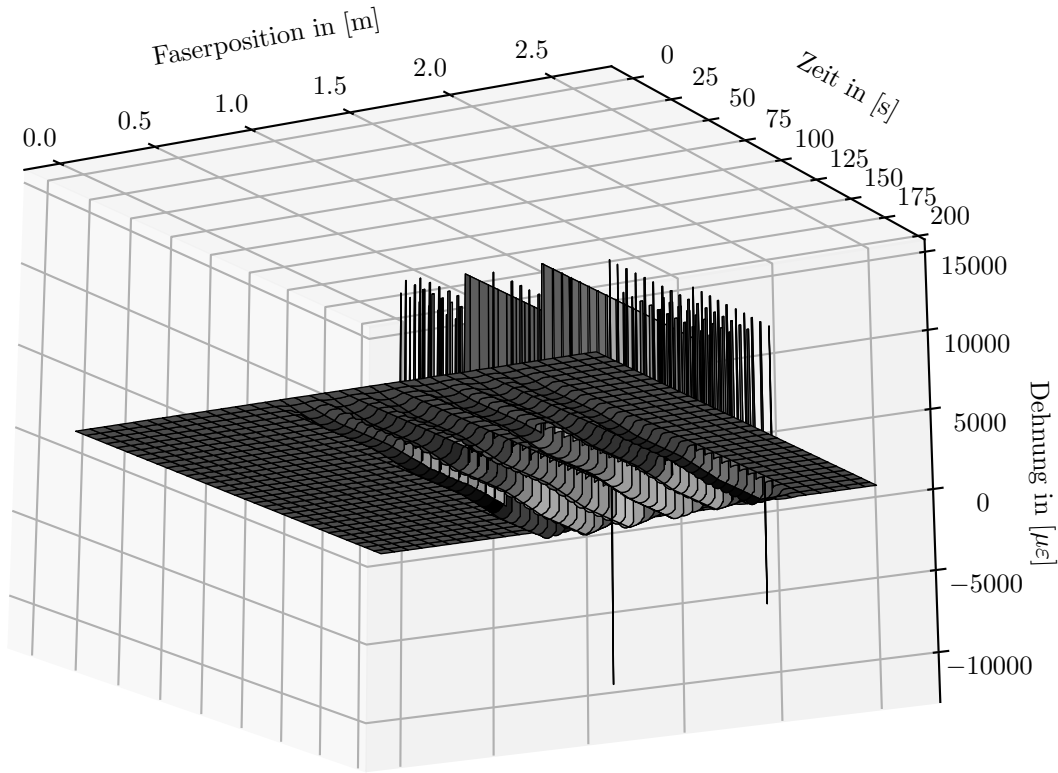


Abbildung 5.1: Gesamte Ergebnismatrix des Probekörpers VBe-A-2 ohne Rohdatenaufbereitung

Identifizierung der Messabweichungen wird ein Interpolationsintervall angewandt. Alle Dehnungswerte der Ergebnismatrix aus Gleichung 5.2, die nicht innerhalb dieses Intervalls liegen, werden als Messabweichungen identifiziert und substituiert. Die Grenzen des Interpolationsintervalls $\varepsilon_{\text{int},i}$ lassen sich aus dem maximalen Dehnungswert des Versuch ε_{max} und einem für die jeweilige Grenze ($\varepsilon_{\text{int},1}$ und $\varepsilon_{\text{int},2}$) zugeordneten Faktor ermitteln (Gleichung 5.3 und 5.4). Die Faktoren sollen sicherstellen, dass im Zuge der Substitution die minimalen und maximalen Dehnungswerte nicht selbst als systematische Messabweichung gelten. In den Faktoren ist neben der Standardabweichung der Fasermessung auch ein Sicherheitsbeiwert implementiert. Die Abbildungen 5.2 zeigen jeweils einen Dehnungsverlauf eines exemplarischen Validierungsversuchs zur Herleitung des Interpolationsintervalls ε_{int} .

$$\varepsilon_{\text{int},1} = \varepsilon_{\text{max}} \cdot 1,2 \quad (5.3)$$

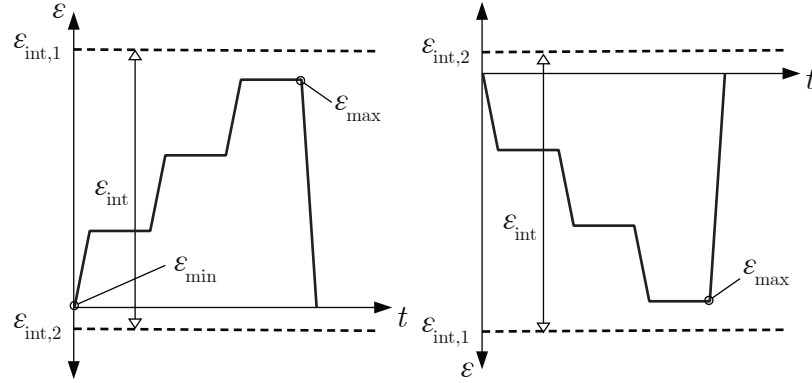


Abbildung 5.2: Interpolationsintervall eines exemplarischen Validierungsversuchs für positive und negative Dehnungswerte

$$\varepsilon_{\text{int},2} = \varepsilon_{\text{max}} \cdot -0,15 \quad (5.4)$$

Die als Messabweichungen deklarierten Dehnungswerte, welche außerhalb des Intervalls liegen, werden in einem weiteren Schritt durch interpolierte Werte eindimensional und somit zeilenweise innerhalb der Ergebnismatrix X_f ersetzt. Jeder Zeilenvektor, der in der Matrix X_f enthalten ist, definiert sich daraufhin wie folgt:

$$\text{für } \varepsilon_{\text{max}} > 0 \rightarrow \vec{x}_n = [\varepsilon_{t_n, x_1} \cdots \varepsilon_{t_n, x_m}], \quad \varepsilon_{\text{int},1} < \varepsilon_{t_n, x_m} < \varepsilon_{\text{int},2} \quad (5.5)$$

$$\text{für } \varepsilon_{\text{max}} < 0 \rightarrow \vec{x}_n = [\varepsilon_{t_n, x_1} \cdots \varepsilon_{t_n, x_m}], \quad \varepsilon_{\text{int},1} > \varepsilon_{t_n, x_m} > \varepsilon_{\text{int},2} \quad (5.6)$$

Mittels Interpolation wird der Dehnungsverlauf zwischen vorhandenen, nicht substituierten Dehnungswerten approximiert, womit er sich einem Dehnungsverlauf ohne Messabweichungen annähert. Je weniger Abweichungen unmittelbar nebeneinander liegen, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Approximation einer Dehnung ohne Messabweichungen entspricht (Abbildungen 5.3 und 5.4). Für die Substituierung lassen sich verschiedene Interpolationsverfahren einsetzen. Im Zuge dieser Arbeit wurden vier eindimensionale Verfahren hinsichtlich ihrer Approximationsgüte an zwei exemplarischen Dehnungskurven untersucht:

- Lineare Interpolation [46]
- Interpolation nach Akima [1]

- Kubische Splinedateninterpolation [46]
- Polynominterpolation 2. Grades [46]

In den Abbildungen 5.3 und 5.4 wird jeweils ein exemplarischer Dehnungsverlauf dargestellt (Sample, punktiert). Während die Samplewerte in Abbildung 5.3 einen konstanten Dehnungsverlauf über den gesamten Messbereich zeigen, sollen die Samplewerte in Abbildung 5.4 einen gleichmäßigen ansteigenden Verlauf verdeutlichen. Zur Simulation eines faseroptischen Dehnungsverlaufs mit Messabweichungen wurden aus beiden Samplekurven diverse Messpunkte gelöscht, um dazwischen im Nachgang mit den oben genannten Verfahren zu interpolieren. Die drei Segmente (R1-R3) stellen hierfür vier verschiedene Messszenarien dar:

- R1: Einzelne, unabhängige Messabweichungen (2, 4, 5, 7, 9, 15, 17, 19, 21, 24, 28 und 30).
- R2-1: Geringer zusammenhängender Bereich an Messabweichungen (35 bis 40).
- R2-2: Mittlerer zusammenhängender Bereich an Messabweichungen (50 bis 60).
- R3: Großer zusammenhängender Bereich an Messabweichungen (70 bis 90).

In R1 und R2-1 sind die Unterschiede zwischen den Interpolationsverfahren bei beiden Verläufen gering. In R2-2 und R3 oszillieren die Polynom- und die kubische Splinedateninterpolationen, sodass keine zufriedenstellende Approximationsgüte erreicht wurde (Tabelle 5.1). Der Unterschied zwischen der Interpolation nach Akima und der linearen Interpolation ist v.a. in R3 des ansteigenden Verlaufs sichtbar (vgl. Abbildung 5.4). Dort erreicht das Verfahren nach Akima eine bessere Approximation, weshalb dieses Interpolationsverfahren im Zuge der Rohdatenaufbereitung zur Anwendung kam.

Hinsichtlich der Interpolation nach Akima handelt es sich um eine kontinuierliche differenzierbare Splineinterpolation [1]. Dafür werden Polynomfunktionen dritter Ordnung $f_i(x)$ aufgestellt, die jeweils Informationen der vier Nachbarpunkte $[x_{i-2}, y_{i-2}]$ bis $[x_{i+2}, y_{i+2}]$ verwenden. Diese Art der stückweisen Kurveninterpolation führt zu weniger starken Oszillationen im Vergleich zur Polynominterpolation und zur kubischen Splinedateninterpolation (vgl. Abbildung 5.3). Darüber hinaus können die Dehnungsverläufe wesentlich „weicher“ approximiert werden als durch eine lineare Interpolation (vgl. Abbildung 5.4 Bereich R3). Mithilfe entsprechender Randbedingungen lässt sich zusätzlich die Monotonie der vorhandenen Datenpunkte besser abschätzen, wodurch die Approximationsgüte steigt.

Für die Datenpunkte x_i, y_i ist die Interpolationsfunktion definiert durch:

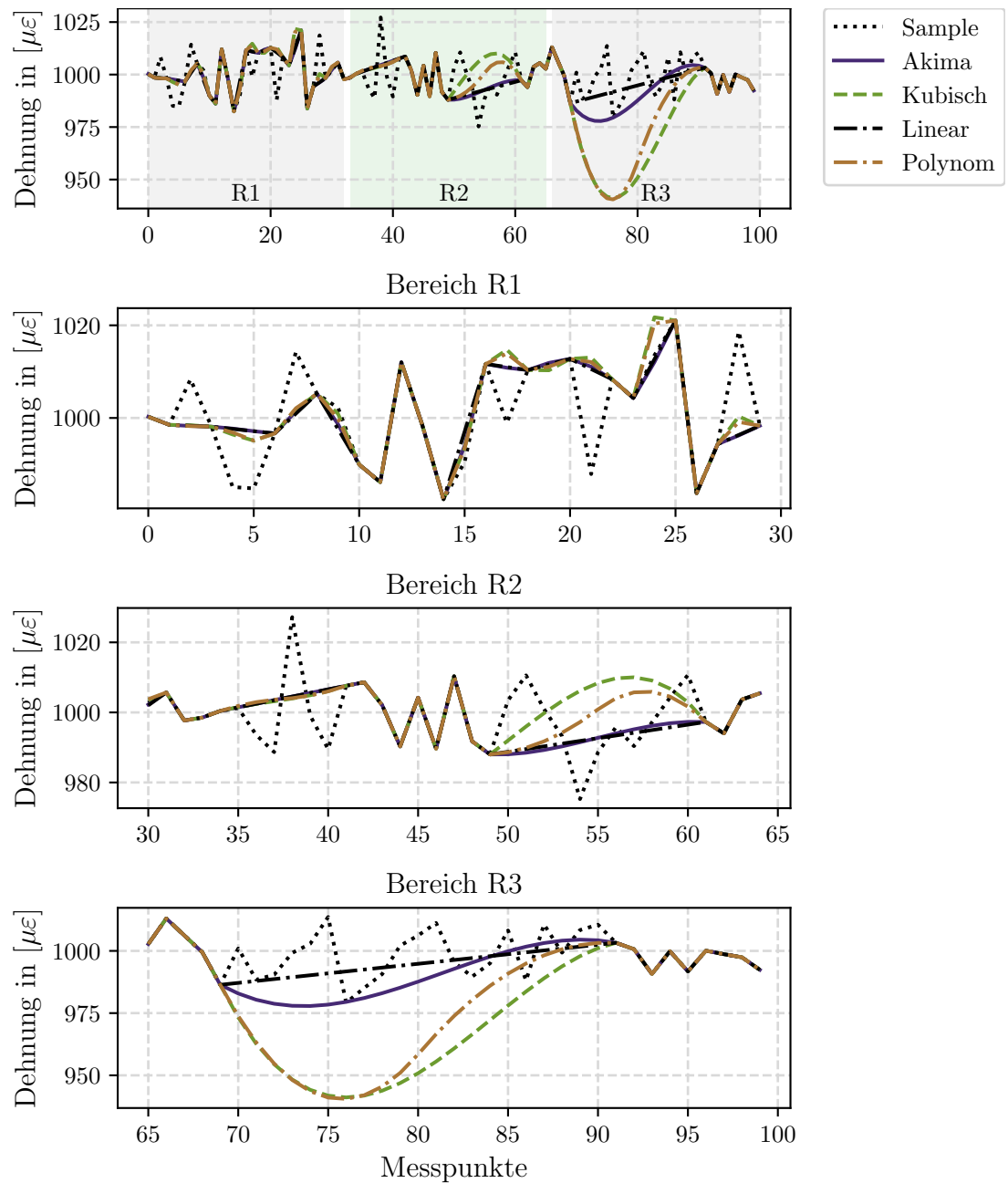


Abbildung 5.3: Vergleich verschiedener Interpolationsverfahren am Beispiel einer exemplarischen Dehnungskurve mit konstantem Verlauf

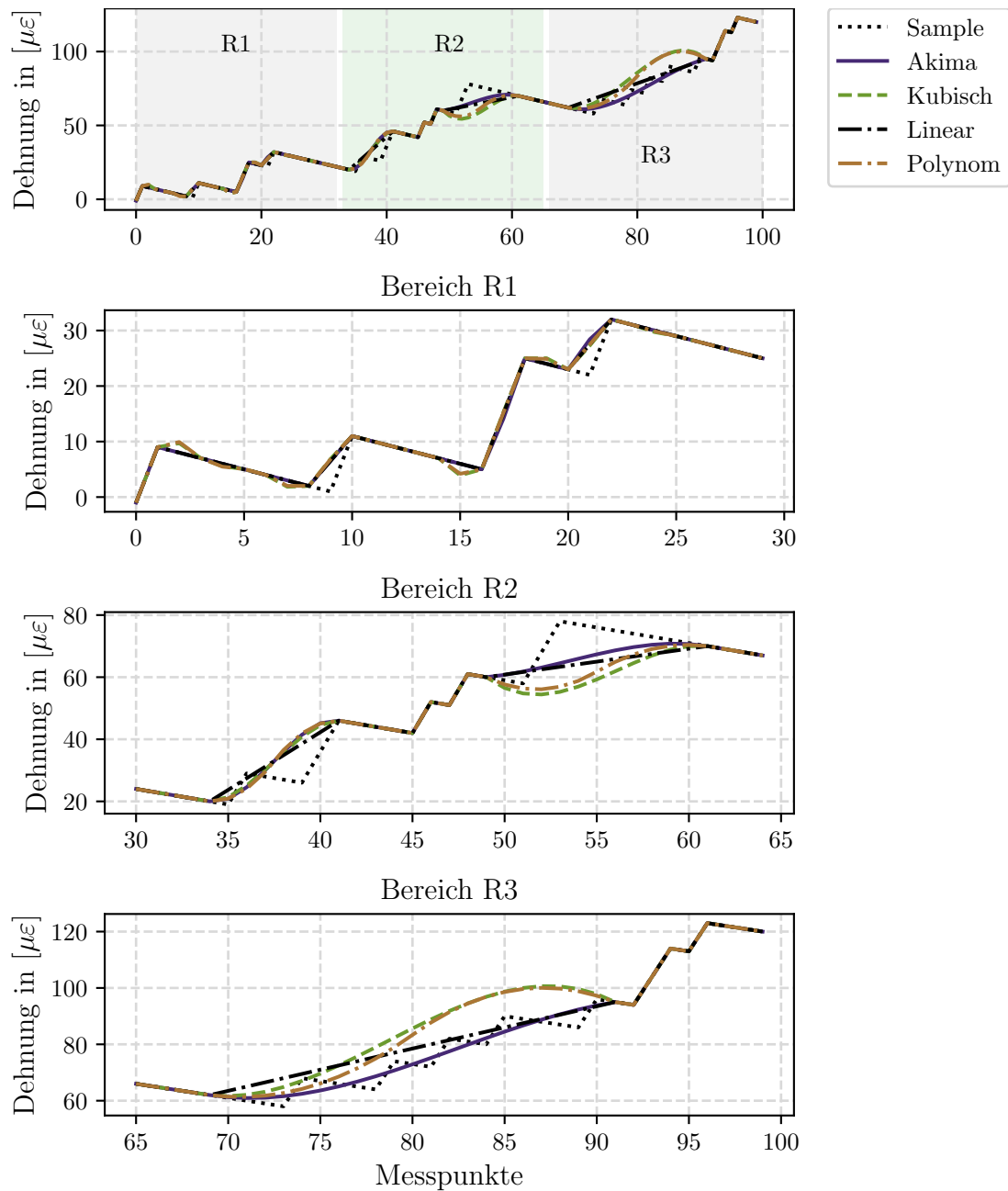


Abbildung 5.4: Vergleich verschiedener Interpolationsverfahren am Beispiel einer exemplarischen Dehnungskurve mit ansteigendem Verlauf

Tabelle 5.1: Vergleich der verschiedenen Interpolationsmethoden anhand der Mittelwerte und der Standardabweichungen in $\mu\epsilon$

konstanter Dehnungsverlauf					
Interpolationsmethode					
	Sample	Akima	Kubisch	Linear	Polynom
Mittelwert	1000,43	999,74	999,39	999,24	999,27
Standardabweichung	9,79	11,15	18,09	7,51	21,72
ansteigender Dehnungsverlauf					
Interpolationsmethode					
	Sample	Akima	Kubisch	Linear	Polynom
Mittelwert	51,03	51,00	52,21	51,64	52,09
Standardabweichung	32,88	32,26	33,88	32,63	33,70

$$f_i(x) = p_0 + p_1 (x - x_i) + p_2 (x - x_i)^2 + p_3 (x - x_i)^3 \quad (5.7)$$

Um die Koeffizienten p lösen zu können, wird die Steigung w_i im jeweiligen Kurvenabschnitt benötigt:

$$w_i = \frac{(|m_{i+1} - m_i| m_{i-1} + |m_{i-1} - m_{i-2}| m_i)}{(|m_{i+1} - m_i| + |m_{i-1} - m_{i-2}|)} \quad (5.8)$$

Wobei m_i die Steigung der einzelnen Segmente darstellt:

$$m_i = \frac{(y_{i+1} - y_i)}{(x_{i+1} - x_i)} \quad (5.9)$$

Zur Lösung der Interpolationsfunktion (Gleichung 5.7) ist die Ableitung der einzelnen Koeffizienten notwendig (Gleichung 5.10– 5.13):

$$p_0 = y_i \quad (5.10)$$

$$p_1 = w_i \quad (5.11)$$

$$p_2 = \frac{\left[3 \frac{(y_{i+1} - y_i)}{(x_{i+1} - x_i)} - 2w_i - w_{i+1} \right]}{(x_{i+1} - x_i)} \quad (5.12)$$

$$p_3 = \frac{\left[w_i + w_{i+1} - 2 \frac{(y_{i+1} - y_i)}{(x_{i+1} - x_i)} \right]}{(x_{i+1} - x_i)^2} \quad (5.13)$$

Um die Wirksamkeit des vorgestellten Auswerteverfahrens zu verdeutlichen, wurden die Versuchsdaten aus Abbildung 5.1 entsprechend aufbereitet. Das Ergebnis zeigt Abbildung 5.5: Sämtliche Messabweichungen konnten substituiert werden; die drei Lastschritte und die sechs Klebefugen sind deutlich erkennbar.

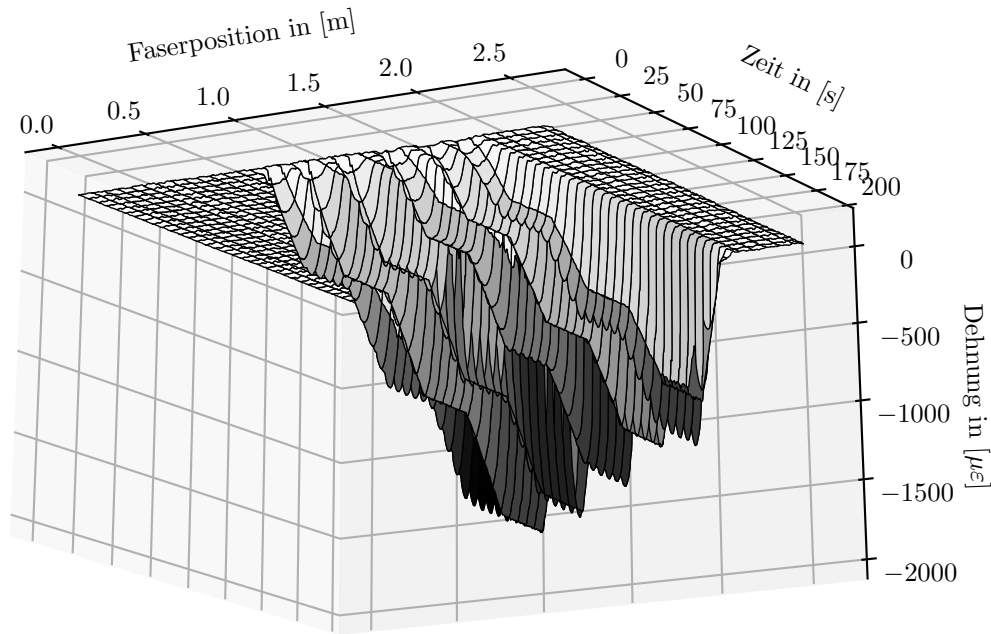


Abbildung 5.5: Interpolierte Ergebnismatrix des Probekörpers VBe-A-2 ohne Einteilung in relevante Bereiche (vereinfachte Darstellung mit reduzierter Anzahl an Dehnungswerten)

Zur weiteren Reduktion der Datenmenge lässt sich die Ergebnismatrix in kleinere relevante Bereiche einteilen. Abbildung 5.6 zeigt dazu beispielhaft die interpolierte Ergebnismatrix des Probekörpers VBe-A2-MB-2 (zweiter Lastschritt, Klebstoff M-BOND 200).

Die Kombination aus Datenmenge und systembedingten Messabweichungen macht eine automatisierte Aufbereitung der Messergebnisse notwendig. Das vorgestellte Handlungsschema bietet die Möglichkeit, die gewonnenen Messdaten schnell und mit einer hohen Approximationsgüte aufzubereiten. Dennoch ist zu erwähnen, dass das Verfahren

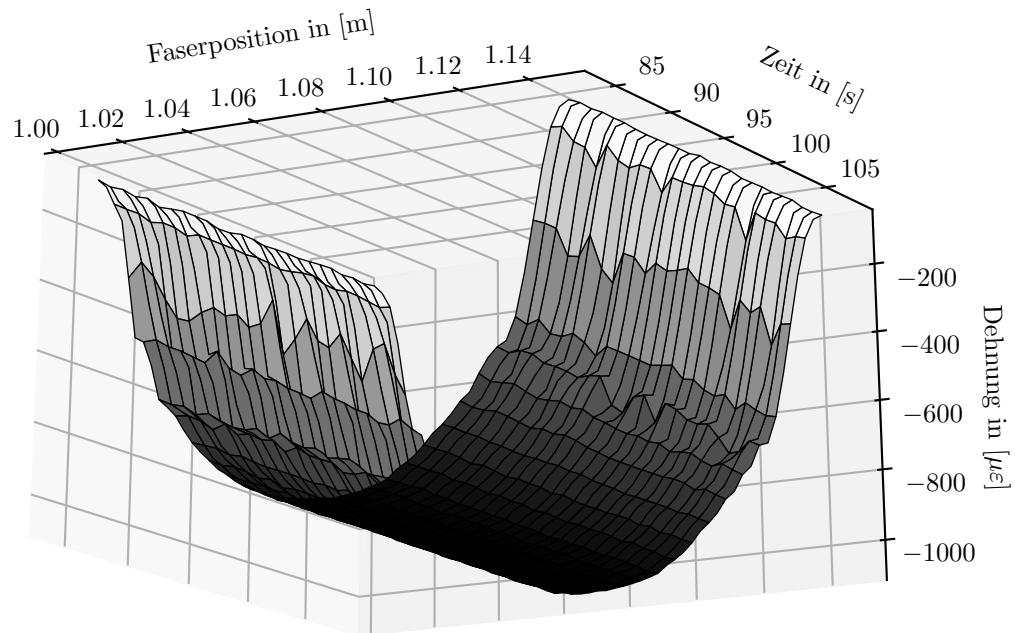


Abbildung 5.6: Interpolierte Ergebnismatrix des Probekörpers VBe-A2-MB-2 (Lastschritt 2, Klebstoff M-BOND 200)

lediglich für das vorliegende Versuchsdesign entwickelt wurde. Für Versuche, die keine Laststufen durchlaufen oder in einem Lastniveau verharren, müssen die Randbedingungen der Interpolationsfunktion angepasst oder andere Verfahren evaluiert werden. Für die Versuche aus Kapitel 4 ließ sich hiermit eine Grundlage für die Vergleichsuntersuchungen der folgenden Abschnitte schaffen.

5.2 Kongruenzanalyse

Die Kongruenzanalyse umfasst hier die Vergleichsbetrachtung zwischen der Referenzmessmethode und der Messung der VFOS im Rahmen der Validierungsversuche. Dadurch sollen die Unterschiede zwischen den einzelnen Systemen (Coating, Klebstoff, ggf. Grundierung) aufgezeigt und die Vorzugsvariante für die Evaluierungsversuche im Nachgang festgelegt werden. Hinsichtlich der Vergleichbarkeit mit den Referenzmessmethoden ist die Herleitung eines Vergleichswerts notwendig, die im weiteren Verlauf beschrieben wird. Zusätzlich wird die Standardabweichung über die Länge der Faser im Validierungsbereich als Prädiktor für die Dehnungsübertragungsqualität des jeweiligen Systems herangezogen.

Bei der Bildung des Vergleichswertes wird das konstante Dehnungsniveau in der Mitte des Probekörpers – im Validierungsbereich – herangezogen (vgl. Abbildung 5.7). Mithilfe eines Zeitausschnitts der einzelnen Lastniveaus ergibt sich die Validierungsmatrix X_V .

$$X_V = \begin{pmatrix} \varepsilon_{t_{V_1}, x_{V_1}} & \cdots & \varepsilon_{t_{V_1}, x_{V_m}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \varepsilon_{t_{V_n}, x_{V_1}} & \cdots & \varepsilon_{t_{V_n}, x_{V_m}} \end{pmatrix} \quad (5.14)$$

Tabelle 5.2 zeigt die Länge des Validierungsbereichs und die Dauer der Zeitabschnitte der einzelnen Versuchsreihen zur Bildung der Validierungsmatrix. Während die Spalten $\vec{x}_V$ die Länge im Validierungsbereich wiedergeben, bilden die Zeilen $\vec{t}_V$ die Zeitabschnitte. Die Messwerte wurden mit einer Aufzeichnungsrate von 1 Hz aufgenommen, sodass jede Zeile der Matrix eine Sekunde des Versuchs darstellt. Der Abstand zwischen den Faserabschnitten ist mit 0,265 cm konstant, weshalb sich die Faserposition vereinfachend in Messpunkten darstellen lässt (vgl. Tabelle 5.2, Abbildung 5.8 a).

Um den Vergleichswert aus der Validierungsmatrix herzuleiten, wird zunächst mithilfe des Medians ein Zeilenvektor $\vec{x}_V$ je Lastschritt und je Validierungsbereich gebildet.

$$\vec{x}_V = [\varepsilon_{x_{V_1}} \cdots \varepsilon_{x_{V_n}}] \quad (5.15)$$

Dadurch lässt sich das allgemeine Messrauschen ausgleichen, ohne die Dehnungsänderungen entlang der Faser zu glätten. Mithilfe der mittleren Dehnung des Zeilenvektors lässt sich der Vergleichswert wie folgt bilden:

$$\overline{\varepsilon_{x_V}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_{x_{V,i}} = \frac{\varepsilon_{x_{V,1}} + \varepsilon_{x_{V,2}} + \cdots + \varepsilon_{x_{V,n}}}{n} \quad (5.16)$$

Anhand der Standardabweichung s_V des Zeilenvektors $\vec{x}_V$ kann die Streubreite der Dehnungswerte ermittelt werden. Diese wird zur Beurteilung der Dehnungsübertragung innerhalb der verschiedenen Kombinationen herangezogen.

$$s_V = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^j (\varepsilon_{x_{V,i}} - \overline{\varepsilon_{x_V}})^2}{j}} \quad (5.17)$$

Abbildung 5.7 verdeutlicht die Herleitung des Vergleichswerts. Die Einrückung entlang der Faser und der Zeitabschnitte sorgt dafür, dass Unregelmäßigkeiten, beispielsweise durch das Einpegeln der Last am Anfang eines Lastschritts oder Imperfektionen innerhalb der Lasteinleitung, berücksichtigt werden.

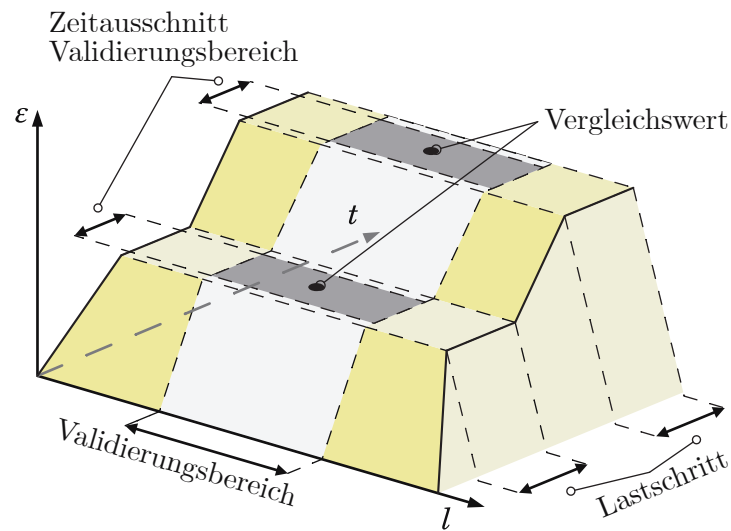


Abbildung 5.7: Schematische Darstellung eines relevanten Ausschnittes der Ergebnismatrix eines Validierungsversuchs

Tabelle 5.2: Länge und Zeitabschnitte der Validierungsversuche

Versuchsreihe	Länge Validierungsbereich in [mm]	Anzahl Messpunkte	Zeitausschnitt je Lastschritt in [s]
VSt	≈ 150	59	290
VBe	≈ 90	35	26
VMa	≈ 140	55	10

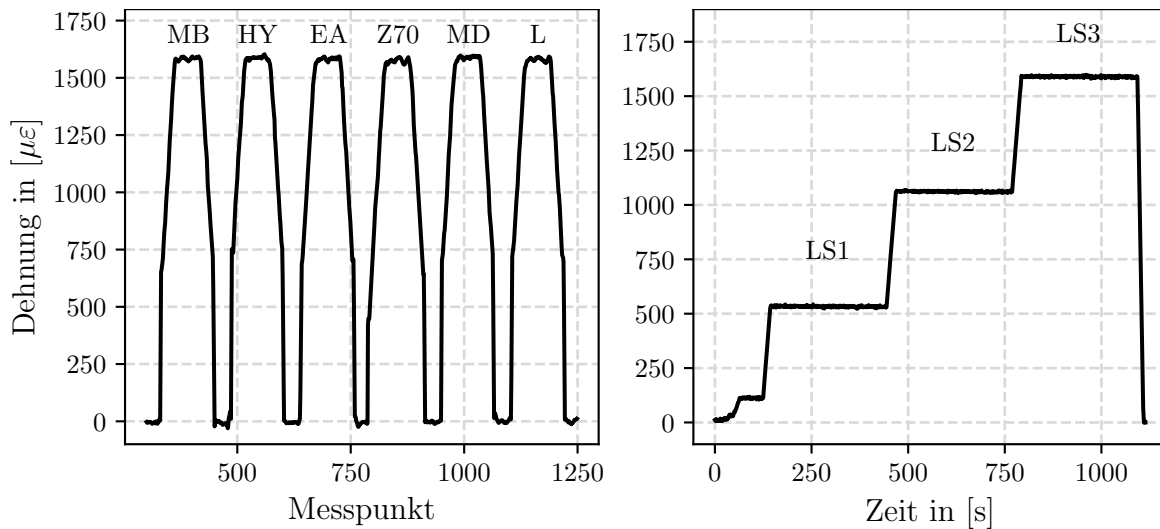


Abbildung 5.8: Ausschnitte der Ergebnismatrix der VSt; a) Dehnungsverlauf eines Zeitpunkts im dritten Lastschritt VSt-O3-3; b) Lastverlauf Messpunkt 384 (VSt-O3-MB-3)

5.2.1 Applikation auf der Stahloberfläche

Abbildung 5.8 a) und 5.8 b) zeigen verschiedene Ausschnitte aus der Ergebnismatrix eines Versuches der VSt. Während Abbildung 5.8 a) den Dehnungsverlauf entlang der Faser eines Zeitpunkts im dritten Lastschritt darstellt, zeigt Abbildung 5.8 b) den Lastverlauf an einem Messpunkt im dritten Lastschritt (VSt-O3-MB-3). Ziel dieser Versuchsreihe war es, die verschiedenen Faser-Klebstoff-Kombinationen untereinander zu vergleichen und einer Vergleichsmessung gegenüberzustellen. Dazu wurden zwölf Probekörper mit drei verschiedenen Coatingmaterialien und sechs unterschiedlichen Klebstoffen im 4-Punkt-Biegeversuch geprüft.

Abbildung 5.9 und Tabelle 5.3 zeigen die gemittelten Vergleichswerte aller drei bzw. vier Probekörper jedes Coatingmaterials (Einzelwerte Anhang 5.2.1) in Abhängigkeit vom verwendeten Klebstoff und der dazugehörigen Vergleichsmessung. Der Probekörper VSt-A3 fiel während der Messung aus, weshalb dazu keine Ergebnisse vorliegen. Die Resultate zeigen eine hohe Korrelation zwischen der photogrammetrischen Vergleichsmessung und der Fasermessung mittels Polyimid- undOrmocer®-Coating. Für die weitere Auswertung wird das Verhältnis aus Gleichung 5.18 zwischen der Faserdehnung und photogrammetrischen Dehnung herangezogen. Während die Messwerte des Acrylatcoatings mittlere Dehnungsverluste von $< 11\%$ aufzeigen, konnte bei den beiden anderen

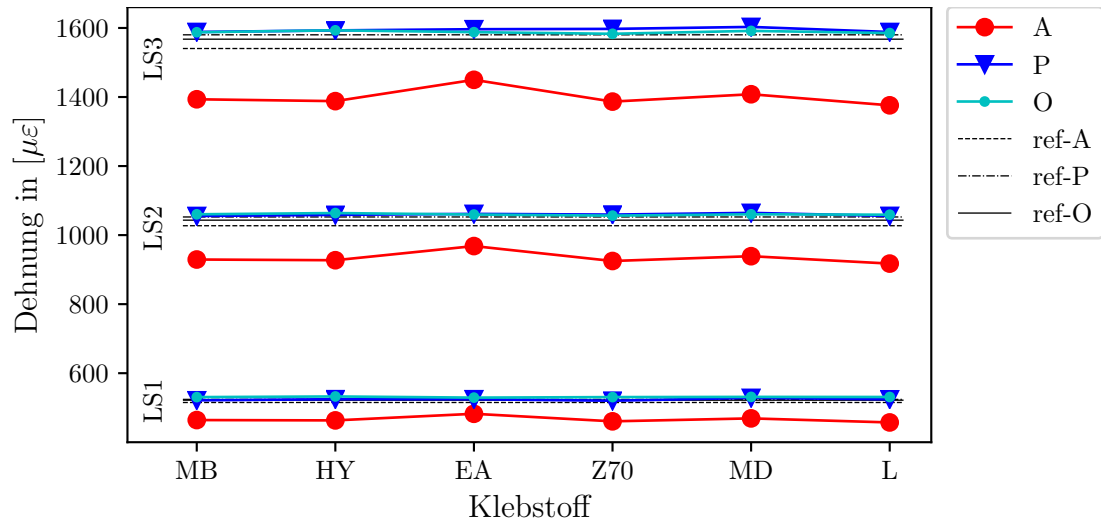


Abbildung 5.9: Gemittelte Vergleichswerte der VSt, getrennt nach Coating, Klebstoff und Lastschritt

Coatingmaterialien kein Verlust festgestellt werden (Tabelle 5.4). Darüber hinaus zeigen die Quotienten q_{VSt} keine signifikanten Abweichungen zwischen den einzelnen Klebstoffen.

$$q_{\text{VSt}} = \frac{\varepsilon_{\text{f,VSt}}}{\varepsilon_{\text{v,VSt}}} \quad (5.18)$$

mit:

q_{VSt} ... Dehnungsquotient (VSt)

$\varepsilon_{\text{f,VSt}}$... Vergleichswert der Fasermessung (VSt)

$\varepsilon_{\text{v,VSt}}$... Dehnung der photogrammetrischen Vergleichsmessung (VSt)

Abbildung 5.10 zeigt einen detaillierten Dehnungsverlauf in Abhängigkeit von der Faserposition innerhalb des Validierungsbereichs. Darin enthalten sind die gemittelten Zeilenvektoren aller Probekörper der Klebeverbindung mit M-BOND 200 im dritten Lastschritt. Die Dehnungsverläufe mittels Ormocer®- und Polyimidcoating verlaufen im Validierungsbereich nahezu konstant. Beim Acrylatcoating zeigt sich v.a. in den Randzonen des Validierungsbereichs ein deutlicher Dehnungsverlust.

Mithilfe der Standardabweichung lassen sich die jeweiligen Klebstoff-Coating-Systeme untereinander vergleichen. Dazu wird angenommen, dass ein niedriger Wert auf eine verbesserte Dehnungsübertragung und eine homogenere Klebefuge zurückgeht. Tabelle 5.5 zeigt vorhandene Unterschiede der Standardabweichungen der Zeilenvektoren. Beim

Tabelle 5.3: Gegenüberstellung der mittleren Vergleichswerte der VSt hinsichtlich photogrammetrischer und faseroptischer Dehnung, aufgeteilt nach Coating, Klebstoff und Lastschritt

Coating	LS	MB	HY	EA	Dehnung in [$\mu\epsilon$]			Photogrammetrie
					Z70	MD	L	
Acrylat	1	464	463	482	461	469	457	515
	2	929	927	968	925	939	917	1027
	3	1393	1388	1450	1387	1408	1376	1540
Polyimid	1	521	525	525	520	528	524	524
	2	1055	1059	1061	1059	1064	1056	1053
	3	1588	1593	1596	1597	1603	1588	1580
Ormocer [®]	1	531	533	529	531	531	531	522
	2	1060	1064	1060	1056	1060	1059	1043
	3	1588	1593	1588	1583	1592	1585	1568

Tabelle 5.4: Mittlere Quotienten q_{VSt} zu den Lastschritten 1-3

Coating	LS	MB	HY	EA	Quotienten		
					Z70	MD	L
Acrylat	1	0.902	0.900	0.938	0.895	0.912	0.889
	2	0.905	0.903	0.944	0.901	0.915	0.894
	3	0.905	0.901	0.942	0.900	0.914	0.894
Polyimid	1	0.996	1.002	1.002	0.994	1.009	1.001
	2	1.000	1.004	1.006	1.002	1.008	1.002
	3	1.001	1.005	1.006	1.003	1.009	1.002
Ormocer [®]	1	1.017	1.021	1.015	1.017	1.019	1.018
	2	1.015	1.019	1.014	1.012	1.015	1.014
	3	1.011	1.015	1.011	1.009	1.013	1.009

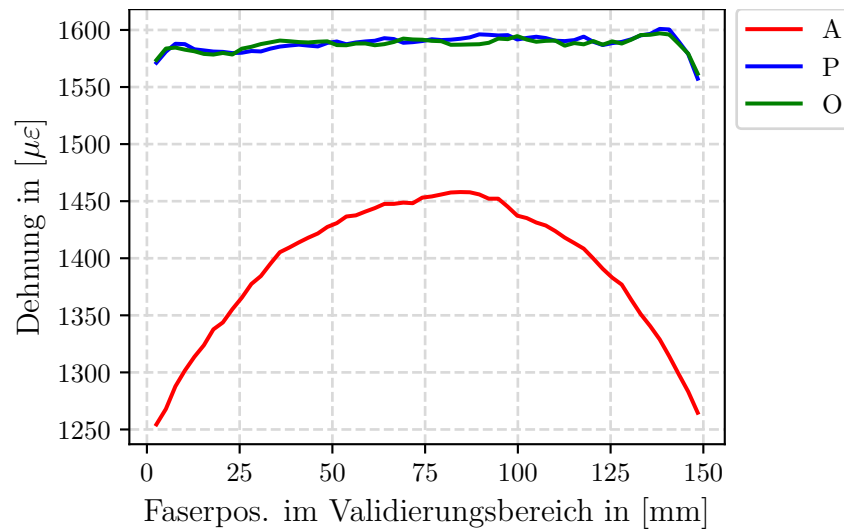


Abbildung 5.10: Detaillierter Dehnungsverlauf der gemittelten Zeilenvektoren aller Probekörper je Coatingmaterial der Klebeverbindung M-BOND 200 im dritten Lastschritt (VSt-A_i-MB-3, VSt-P_i-MB-3, VSt-O_i-MB-3)

Acrylatcoating führten die Klebstoffe M-BOND 200 und EA zu vergleichsweise niedrigen Werten. Bei den beiden anderen Coatingmaterialien zeigten die Faserstränge mit den Klebstoffen M-BOND 200 und LOCTITE die niedrigsten Standardabweichungen.

Ein möglicher Einfluss der Abdeckung hinsichtlich der Dehnungsübertragung zeigt sich bei den beiden Coatingmaterialien Polyimid undOrmocer[®] (vgl. Tabelle A.5 und A.6). Die mittlere Differenz zwischen den Probekörpern mit und ohne auf der Sensorfaser aufgetragene Abdeckung beträgt 2,7 %.

5.2.2 Applikation auf der Betonoberfläche

Die Ergebnisse der Versuchsreihen der VBe werden im folgenden Abschnitt dargestellt. Ziel der Untersuchungen war es, die verschiedenen Klebstoff-Coating-Kombinationen hinsichtlich ihrer Dehnungsübertragungsperformance zu überprüfen. Zusätzlich sollte überprüft werden, ob sich eine Grundierung der abgeschliffenen, offenporigen Betonoberfläche positiv auf die Dehnungsübertragung auswirkt (vgl. Abschnitt 2.3.3). Dazu wurden 27 Probekörper mit sechs unterschiedlichen Klebstoffen und drei verschiedenen Coatingmaterialien getestet (Tabelle 4.1 und 4.2). Als Grundierungsmittel kamen zwei Epoxidharze zum Einsatz, deren Eigenschaften in Tabelle 4.7 aufgelistet sind. Die zylindrischen Probekörper wurden im Druckversuch lastschrittweise geprüft. Zur Ver-

Tabelle 5.5: Mittlere Standardabweichung der Fasermessung im Validierungsbereich zu den Lastschritten 1-3 innerhalb der VSt

Coating	Standardabweichung in [$\mu\epsilon$]						
	LS	MB	HY	EA	Z70	MD	L
Acrylat	1	20	24	20	24	22	24
	2	40	46	41	47	45	48
	3	60	70	60	68	66	70
Polyimid	1	5	7	6	7	7	6
	2	7	14	8	9	10	7
	3	9	19	10	12	14	9
Ormocer [®]	1	5	6	6	7	8	6
	2	7	11	9	9	9	7
	3	8	16	10	13	13	9

anschaulichung des Versuchsaufbaus und -ablaufs zeigt Abbildung 5.11 a) und b) den Verlauf der Fasermessung des Probekörpers VBe-E-O1 im dritten Lastschritt und den zeitlichen Verlauf an der Position 480 (M-BOND 200) einschließlich der Entlastung.

Tabelle 5.6 zeigt die mittleren Vergleichswerte im Validierungsbereich aller Probekörper. Die Dehnungswerte der IWA wurden mittels Gleichung 5.19 ermittelt. Stark ausgeprägte Unterschiede zwischen den einzelnen Klebstoffen sind v.a. innerhalb der Probekörperreihe VBe-O zu finden. Dort weisen die Einzelwerte der Probekörper VBe-S-O1 und VBe-S-O3 deutliche Abweichungen voneinander auf. Die Ergebnisse deuten auf eine schief eingeleitete Last hin, die durch imperfekte Probekörper und/oder durch eine Schiefstellung des Querhauptes der Prüfmaschine entstanden sein könnten. Jedoch vermitteln die dazugehörigen Werte der IWA einen ähnlichen Versatz zwischen den Zylinderquadranten auf, weshalb diese Werte für die Auswertung herangezogen werden können. Daher wird beim Vergleich zwischen den Grundierungen, Klebstoffen und Coatings im Weiteren der Dehnungsübertragungsquotient genutzt, der sich nach Gleichung 5.20 berechnet (Tabelle 5.7). Die dazugehörigen Einzelwerte sind in Tabelle B.2, B.3 und B.4 im Anhang aufgelistet.

$$\epsilon_{v,VBe} = \frac{\Delta l_{v,VBe}}{l_{0,VBe}} \quad (5.19)$$

$$q_{VBe} = \frac{\epsilon_{f,VBe}}{\epsilon_{v,VBe}} \quad (5.20)$$

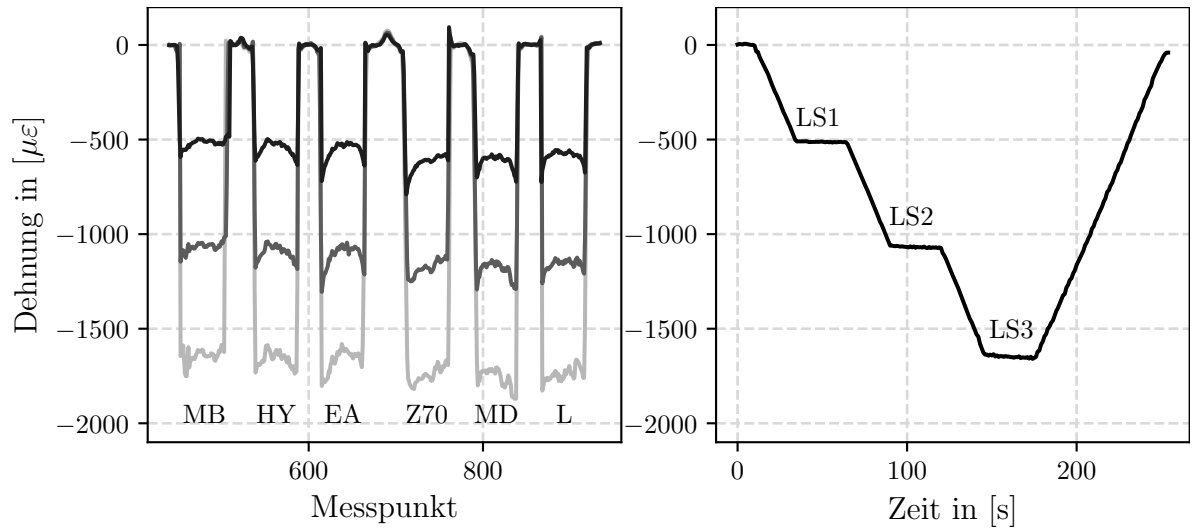


Abbildung 5.11: Ausschnitte der Ergebnismatrix der VBe; a) Dehnungsverlauf eines Zeitpunkts im dritten Lastschritt VBe-E-O1; b) Lastverlauf Messpunkt 480 (VBe-E-O1-MB-3)

mit:

- $\varepsilon_{v,VBe}$... Dehnung der induktiven Vergleichsmessung (VBe)
- $\Delta l_{v,VBe}$... Längenänderung der IWA (VBe)
- $l_{0,VBe}$... Nulllänge der IWA nach Tabelle B.1 (VBe)
- q_{VBe} ... Dehnungsquotient (VBe)
- $\varepsilon_{f,VBe}$... Vergleichswert der Fasermessung (VBe)

Tabelle 5.6: Gemittelter Vergleichswert der Fasermessung und Vergleichsmessmethode der VBe, getrennt nach Klebstoff und Lastschritt

Nr.	LS	MB	IWA1	HY	IWA1/2	EA	IWA2	Z70	IWA3	MD	IWA3/4	L	IWA4
A	1	-505	-744	-482	-760	-470	-776	-467	-635	-396	-603	-401	-571
	2	-992	-1417	-952	-1477	-940	-1536	-942	-1264	-821	-1223	-847	-1183
	3	-1502	-2100	-1442	-2209	-1436	-2319	-1453	-1936	-1279	-1887	-1328	-1839
S-A	1	-385	-449	-377	-526	-457	-603	-639	-800	-529	-747	-472	-694
	2	-876	-1062	-830	-1184	-922	-1305	-1153	-1446	-1003	-1389	-947	-1332
	3	-1394	-1712	-1312	-1879	-1419	-2046	-1688	-2112	-1497	-2051	-1445	-1991
E-A	1	-392	-538	-443	-614	-511	-689	-570	-747	-514	-710	-473	-672
	2	-848	-1143	-893	-1266	-988	-1388	-1074	-1408	-997	-1368	-962	-1327
	3	-1328	-1772	-1367	-1942	-1485	-2113	-1598	-2087	-1497	-2042	-1469	-1996
P	1	-558	-640	-580	-698	-601	-756	-558	-618	-529	-613	-530	-608
	2	-1117	-1283	-1148	-1400	-1123	-1517	-1123	-1260	-1087	-1248	-1082	-1236
	3	-1692	-1952	-1737	-2134	-1651	-2315	-1707	-1928	-1664	-1910	-1657	-1891
S-P	1	-623	-718	-586	-719	-553	-719	-488	-563	-500	-596	-536	-628
	2	-1192	-1366	-1149	-1400	-1112	-1435	-1042	-1195	-1064	-1237	-1096	-1279
	3	-1766	-2039	-1731	-2111	-1697	-2183	-1622	-1856	-1648	-1907	-1685	-1958
E-P	1	-440	-458	-487	-584	-600	-710	-657	-669	-576	-631	-507	-594
	2	-994	-1072	-1045	-1265	-1169	-1457	-1224	-1294	-1132	-1251	-1053	-1208
	3	-1565	-1711	-1627	-1970	-1760	-2228	-1797	-1945	-1706	-1894	-1624	-1844
O	1	-485	-528	-490	-594	-538	-661	-644	-766	-606	-724	-571	-682
	2	-1038	-1170	-1050	-1293	-1102	-1415	-1207	-1424	-1172	-1370	-1129	-1317
	3	-1631	-1840	-1636	-2024	-1689	-2207	-1791	-2099	-1759	-2035	-1703	-1972
S-O	1	-358	-359	-432	-486	-565	-613	-697	-768	-634	-743	-549	-717
	2	-899	-943	-978	-1128	-1118	-1313	-1271	-1422	-1215	-1399	-1119	-1376
	3	-1467	-1569	-1550	-1809	-1689	-2050	-1877	-2120	-1821	-2092	-1715	-2064
E-O	1	-544	-617	-529	-642	-542	-666	-622	-734	-567	-676	-531	-617
	2	-1106	-1248	-1080	-1312	-1093	-1377	-1194	-1396	-1143	-1336	-1110	-1275
	3	-1695	-1906	-1658	-2019	-1669	-2132	-1779	-2072	-1731	-2011	-1705	-1949

Tabelle 5.7 und Abbildung 5.12 zeigen die gemittelten Dehnungsübertragungsquotienten aller Probekörper; die Einzelwerte stehen in Tabelle B.2, B.3 und B.4 im Anhang. Die höchsten Verluste weisen die Faserstränge ohne Grundierung (VBe-A-EA) auf (ca. 39 %). Die Verluste der Messungen mit Acrylatcoating kombiniert mit einer Grundierung liegen durchschnittlich bei < 30 %. Die Faserstränge VBe-S-A-MB zeigen die geringsten Dehnungsverluste von ca. 17 %. Grundierungen mit SIKADUR, kombiniert mit Cyanacrylatklebstoffen (M-BOND, Z70) und Acrylatfasern, führten im Vergleich zu anderen Kombinationen mit diesem Fasertyp zu geringeren Dehnungsverlusten von ≤ 20 %. Bei den anderen Coatingmaterialien sind die höchsten Verluste bei den Messungen mit den Fasersträngen VBe-P-EA-3 und VBe-O-EA-3 zu finden. Beim Polyimidcoating beziffern sie sich auf ca. 29 %. Die Kombinationen mit dem Ormocer[®]-Coating zeigten Verluste von ca. 23 %. Bei grundierten Fasersträngen und der Verwendung eines Cyanacrylatklebstoffs konnte eine Reduktion der Dehnungsübertragungsverluste festgestellt werden. Während bei den Fasersträngen VBe-E-P-Z70 im dritten Lastschritt Verluste von ca. 8 % gemessen wurden, traten bei den Ormocer[®]-Coating-Kombinationen VBe-S-O-MB Verluste von ca. 6 % auf. Die Kombinationen VBe-S-O-MB zeigten im gesamten Vergleich die geringsten Dehnungsübertragungsverluste.

Abbildung 5.13 zeigt den Vergleich der Dehnungsverläufe ausgewählter Zeilenvektoren im Validierungsbereich und die jeweiligen Dehnungswerte der IWA. Deutlich erkennbar ist der nahezu konstante Verlauf der Dehnungsverläufe der Ormocer[®]- und Polyimidfaser und deren geringe Verluste im Vergleich zur zugehörigen Messung mit IWA. In den Endbereichen der Validierungszone zeigen sich signifikante Unterschiede zwischen dem Acrylatcoating und den beiden anderen Coatingmaterialien.

Tabelle 5.8 listet die gemittelten Standardabweichungen der einzelnen Zeilenvektoren auf. Es zeigt sich, dass beim Acrylatcoating der Anstieg der Standardabweichung durch die Lasterhöhung höher ausfällt als bei den beiden anderen Coatingmaterialien. Darüber hinaus reduziert sich die Standardabweichung bei allen Klebstoff-Coating-Kombinationen durch Anordnung einer Grundierung, außer bei den Kombinationen von Polyimidfasern mit dem Klebstoff M-BOND 200. Werden die Durchschnittswerte aller drei Lastschritte betrachtet, erzielen die Probekörper mit Grundierung teilweise 50 % geringere Standardabweichungen (VBe-S-P-Z70). Bei den Fasersträngen VBe-P1-EA traten im zweiten und dritten Lastschritt extreme Werte auf (vgl. Tabelle B.6 im Anhang). Alle anderen Standardabweichungen zeigen keine Auffälligkeiten. Die niedrigsten Abweichungen konnten bei allen drei eingesetzten Coatingmaterialien bei grundierten Fasersträngen festgestellt werden: So wichen VBe-S-A-MB, VBe-E-P-EA und VBe-S-O-L mit den mittleren Werten aller drei Lastschritte 51 $\mu\epsilon$, 25 $\mu\epsilon$ und 29 $\mu\epsilon$ ab. Wenn die auffälligen Kombinationen

Tabelle 5.7: Mittelwerte der Dehnungsquotienten q_{VBe} für alle Fasercoatings, getrennt nach Klebstoff, Lastschritt und Grundierungsmethode

Nr.	LS	MB	HY	EA	Z70	MD	L
A	1	0.68	0.63	0.61	0.73	0.66	0.70
	2	0.70	0.64	0.61	0.75	0.67	0.72
	3	0.72	0.65	0.62	0.75	0.68	0.72
S-A	1	0.86	0.72	0.76	0.80	0.71	0.68
	2	0.82	0.70	0.71	0.80	0.72	0.71
	3	0.81	0.70	0.69	0.80	0.73	0.73
E-A	1	0.73	0.72	0.74	0.76	0.73	0.70
	2	0.74	0.71	0.71	0.76	0.73	0.72
	3	0.75	0.70	0.70	0.77	0.73	0.74
P	1	0.87	0.83	0.80	0.90	0.86	0.87
	2	0.87	0.82	0.74	0.90	0.87	0.88
	3	0.87	0.82	0.71	0.89	0.87	0.88
S-P	1	0.87	0.82	0.77	0.87	0.84	0.85
	2	0.87	0.82	0.78	0.87	0.86	0.86
	3	0.87	0.82	0.78	0.87	0.86	0.86
E-P	1	0.96	0.83	0.85	0.98	0.91	0.85
	2	0.93	0.83	0.80	0.95	0.91	0.87
	3	0.91	0.83	0.79	0.92	0.90	0.88
O	1	0.92	0.83	0.81	0.84	0.84	0.84
	2	0.89	0.81	0.78	0.85	0.86	0.86
	3	0.89	0.81	0.77	0.85	0.86	0.86
S-O	1	1.00	0.89	0.92	0.91	0.85	0.80
	2	0.95	0.87	0.85	0.89	0.87	0.81
	3	0.94	0.86	0.82	0.89	0.87	0.83
E-O	1	0.88	0.82	0.81	0.85	0.84	0.86
	2	0.89	0.82	0.79	0.86	0.86	0.87
	3	0.89	0.82	0.78	0.86	0.86	0.87

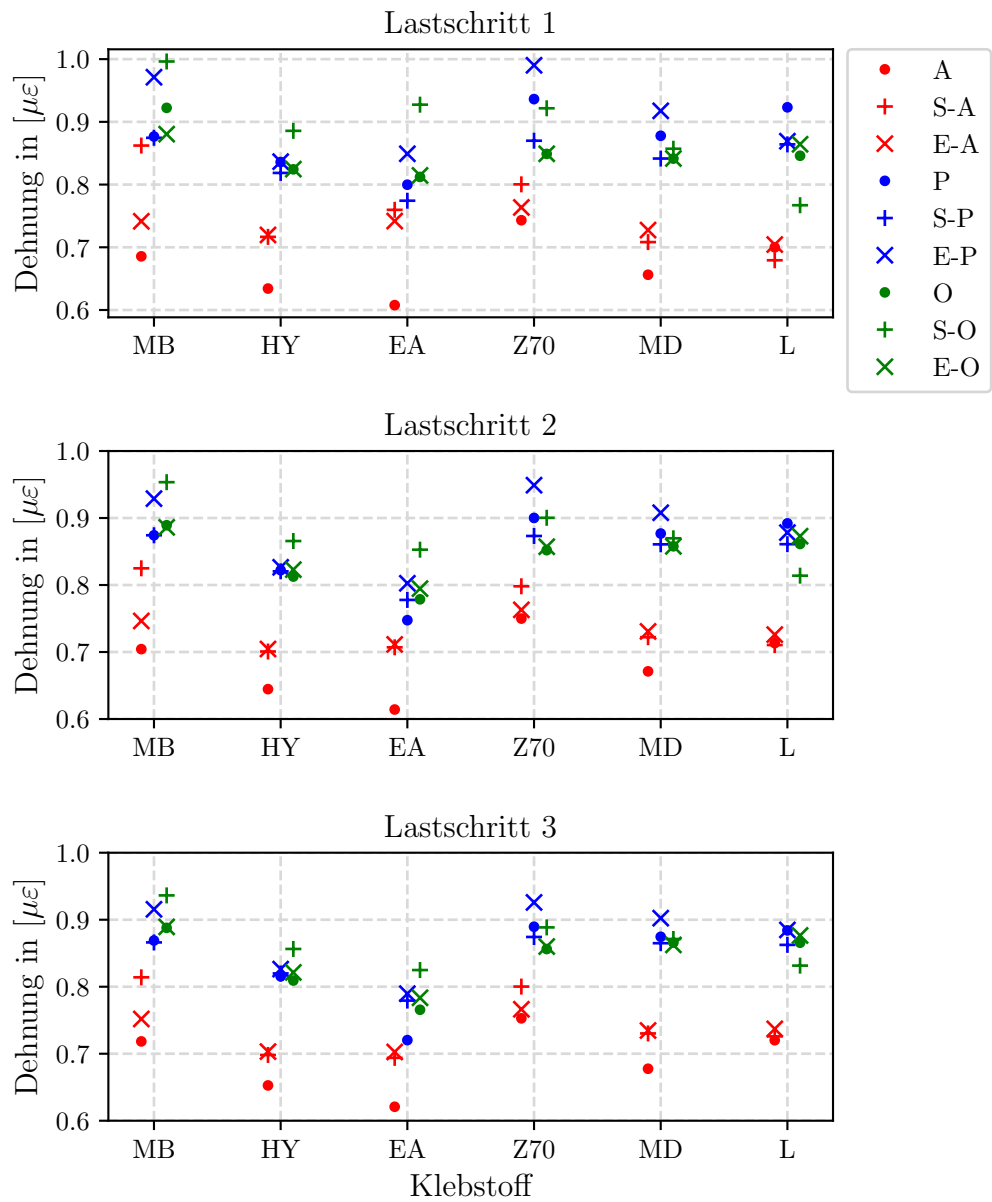


Abbildung 5.12: Mittelwerte der Dehnungsquotienten q_{VBe} für alle Fasercoatings, getrennt nach Klebstoff, Lastschritt und Grundierungsmethode

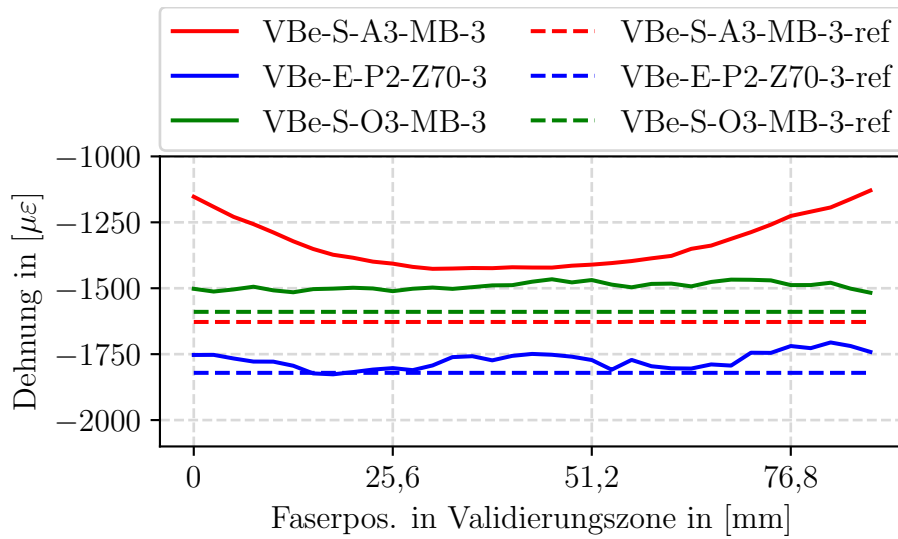


Abbildung 5.13: Vergleich detaillierter Dehnungsverläufe ausgewählter Kombinationen im Zuge der VBe

VBe-P-EA außer Acht gelassen werden, finden sich die höchsten mittleren Standardabweichungen aller drei Lastschritte bei den Fasersträngen VBe-A-EA bzw. VBe-A-MD, VBe-P-HY und VBe-O-MB ($91 \mu\epsilon$, $91 \mu\epsilon$, $65 \mu\epsilon$ und $63 \mu\epsilon$).

5.2.3 Integration in die Betonmatrix

Ziel der VMA war es, die Fasermessungen unterschiedlicher Coatings einer Vergleichsmessung gegenüberzustellen, um mögliche Dehnungsübertragungsverluste zu identifizieren. Dazu wurden neun Probekörper (Tabelle 4.11) hergestellt, mit je einem Fasersensor ausgestattet und anhand von Schwindversuchen geprüft. Bei dem Beton handelte es sich um eine Feinkornbetonmatrix, deren Zusammensetzung in Tabelle 4.3 aufgelistet ist.

Tabelle 5.9 fasst die Versuchsergebnisse aller Probekörper zusammen. Die Einzelwerte sind im Anhang in Tabelle C.1 zu finden. Darin enthalten sind die gemittelten Vergleichswerte sowie Standardabweichungen der Zeilenvektoren, getrennt nach dem jeweiligen Coating zu den Zeitpunkten t_1 und t_2 . In den letzten beiden Spalten werden die dazugehörigen Vergleichsmesswerte dargestellt, die sich mithilfe der Ablesewerte der Messuhren und deren Nulllängen (Tabelle 4.11) nach Gleichung 5.21 ergeben. Sowohl die Dehnungswerte als auch die Standardabweichungen zeigen eine hohe Übereinstimmung beider Messmethoden.

Tabelle 5.8: Mittelwerte der Standardabweichung im Validierungsbereich der VBe für alle Fasercoatings, getrennt nach Klebstoff und Lastschritt

Nr.	LS	MB	HY	EA	Z70	MD	L
A	1	38	41	45	36	43	43
	2	79	85	89	72	91	84
	3	118	126	138	106	138	129
S-A	1	29	27	36	38	42	37
	2	49	62	73	58	76	74
	3	75	98	107	79	106	107
E-A	1	28	26	32	33	35	26
	2	64	58	69	59	70	60
	3	101	91	102	82	106	97
P	1	22	48	43	47	51	27
	2	39	63	121	65	62	39
	3	61	84	199	78	73	52
S-P	1	36	41	25	26	25	37
	2	42	52	29	31	32	46
	3	68	64	42	36	41	56
E-P	1	43	31	20	27	30	22
	2	52	41	22	34	33	26
	3	63	52	32	48	42	34
O	1	51	34	42	42	37	30
	2	63	47	57	58	48	40
	3	74	60	68	78	61	56
S-O	1	41	25	26	45	21	26
	2	50	30	31	56	32	26
	3	52	39	42	63	40	26
E-O	1	31	28	29	52	30	25
	2	37	37	39	61	40	33
	3	40	45	57	75	52	46

Tabelle 5.9: Mittelwerte der Dehnung und Standardabweichung im Validierungsbereich für alle Fasercoatings zu den Zeitpunkten t_1 und t_2 in [$\mu\epsilon$]

Coating	Fasermessung				Vergleichsmessung	
	mittlere Dehnung		Standardabweichung		mittlere Dehnung	
	t_1	t_2	t_1	t_2	t_1	t_2
Acrylat	-553	-657	20	21	-594	-733
Polyimid	-576	-680	13	14	-598	-737
Ormocer [®]	-568	-682	18	19	-579	-712

$$\varepsilon_{v,VMa} = \frac{\Delta l_{v,VMa}}{l_{0,VMa}} \quad (5.21)$$

mit:

$\varepsilon_{v,VMa}$... Dehnung der Vergleichsmessung (VMa)

$\Delta l_{v,VMa}$... Ablesewerte der Messuhren (VMa)

$l_{0,VMa}$... Nulllänge Probekörper nach Tabelle 4.11 (VMa)

Die Standardabweichung bei den Messzeitpunkten t_1 und t_2 ist bei allen Coatings nahezu identisch. Die Messungen mithilfe des Acrylatcoatings ergaben die höchsten Abweichungen von $20 \mu\epsilon$ bzw. $21 \mu\epsilon$. Die geringste Abweichung zeigte die Messung mittels Polyimidcoating mit $13 \mu\epsilon$ bzw. $14 \mu\epsilon$.

Die mittleren Dehnungsquotienten q_{VMa} (Tabelle 5.10, Gleichung 5.22) aus der Fasermessungen und der dazugehörigen Vergleichsmessungen verdeutlichen die hohe Korrelation beider Messmethoden, insbesondere der Messungen mittels Ormocer[®]-Coating (3 %). Die höchsten Verluste wurden beim Acrylatcoating festgestellt und beziffern sich auf 8,5 % (Tabelle 5.10). Die Messungen der Polyimidfasern zeigen einen Unterschied zur Vergleichsmessung von 6 %.

Der Vergleich der beiden Messzeitpunkte t_1 und t_2 verdeutlicht eine Erhöhung der Dehnungsverluste mit zunehmender Schwindverformung. Beim Polyimid- und Acrylatcoating beträgt der Unterschied zur Messung zum Zeitpunkt $t_2 \leq 4 \%$, während beim Ormocer[®]-Coating 2 % festgestellt wurde.

$$q_{VMa} = \frac{\varepsilon_{f,VMa}}{\varepsilon_{v,VMa}} \quad (5.22)$$

Tabelle 5.10: Mittelwerte der Dehnungsquotienten im Validierungsbereich für alle Fasercoatings zu den Zeitpunkten t_1 , t_2 und gemittelt.

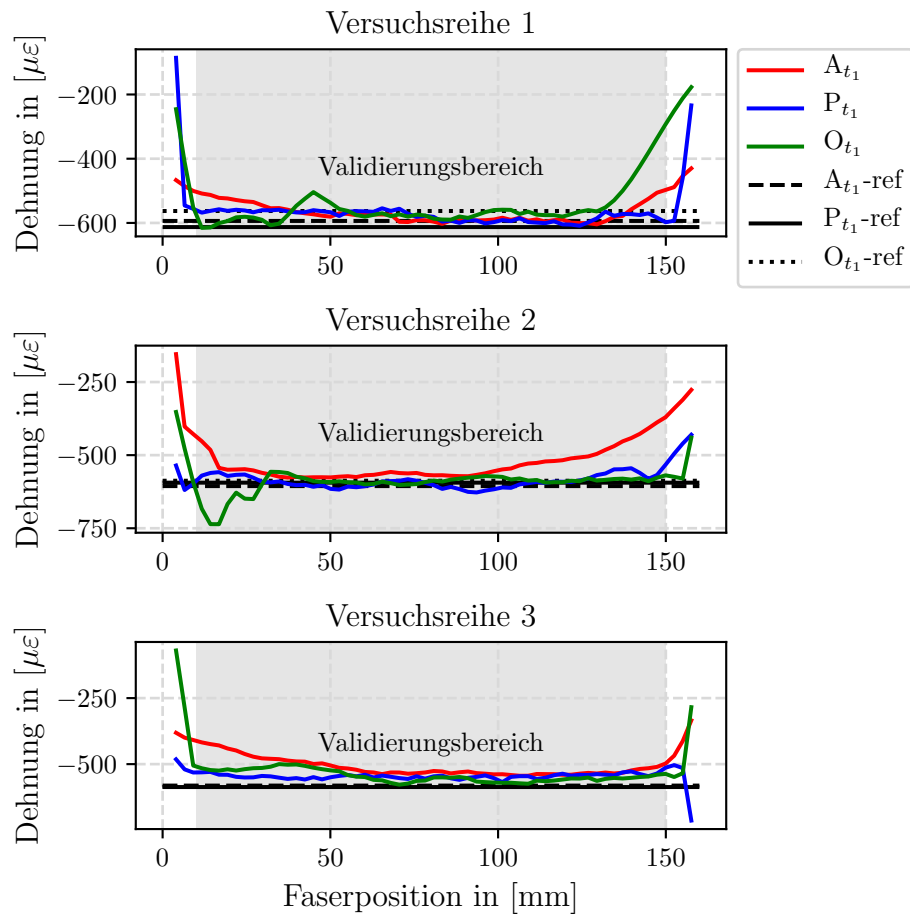
Coating	t_1	t_2	$\bar{t}$
Acrylat	0,93	0,90	0,915
Polyimid	0,96	0,92	0,94
Ormocer®	0,98	0,96	0,97

q_{VMa} ... Dehnungsquotient (VMa)

$\varepsilon_{\text{v,VMa}}$... Dehnungen der Vergleichsmessung (VMa)

$\varepsilon_{\text{f,VMa}}$... Vergleichswert der Fasermessung (VMa)

Abbildung 5.14 und 5.15 zeigen den detaillierten Dehnungsverlauf aller Probekörper zu den Messzeitpunkten t_1 und t_2 und deren dazugehörigen Vergleichsmesswert (Zusatzbezeichnung „ref“). Der grau hinterlegte Bereich repräsentiert den Validierungsbereich, in dem die Faser mit der Betonmatrix verbunden ist. Die 10 mm in den Endbereichen veranschaulichen die Segmente, in denen die Faser durch einen Teflonschlauch geschützt ist. Beim Acrylatcoating konnte verminderte Schwindverformung v.a. an den Enden des Probekörpers festgestellt werden. In der Mitte des Probekörpers steigt das Dehnungsniveau auf das der beiden anderen Coatingmaterialien. Die Dehnungsverläufe der Polyimidfasern sind über den gesamten Validierungsbereich konstant, was die Standardabweichungen in Tabelle 5.9 unterstreichen. Die Messungen mittels Ormocer®-Fasern korrelieren bis auf VMa-O1 $_{t_1}$ und VMa-O2 $_{t_1}$ mit denen der Polyimidfasern. Bei VMa-O1 $_{t_1}$ sinkt die Schwinddehnung ab der Faserposition 130 mm; VMa-O2 $_{t_1}$ zeigt an der Faserposition 20 mm einen Dehnungsanstieg. Zum Messzeitpunkt t_2 konnten diese Messabweichungen nicht festgestellt werden.

Abbildung 5.14: Dehnungsverlauf der drei Versuchsreihen der VMa zum Zeitpunkt t_1

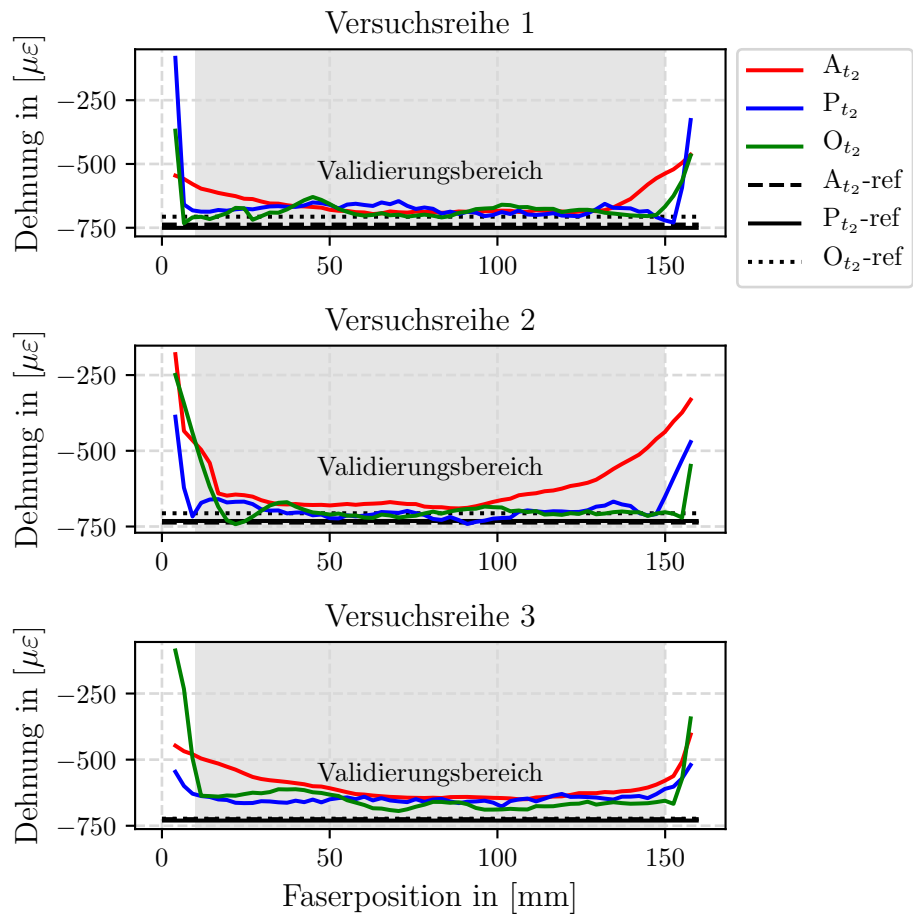


Abbildung 5.15: Dehnungsverlauf der drei Versuchsreihen der VMa zum Zeitpunkt t_2

5.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Zuge der VSt wurden zwölf Präzisionsflachstähle im 4-Punkt-Biegeversuch bis zur Streckgrenze geprüft. Dabei sollten die ermittelten Dehnungen verschiedener Klebstoff-Coating-Kombinationen dem Ergebnis einer photogrammetrischen Vergleichsmessung gegenübergestellt werden. Darüber hinaus wurden die Faserstränge eines Probekörpers je Versuchsreihe mit Epoxidharz abgedeckt, um den Einfluss einer Abdeckung feststellen zu können. Bis auf den Ausfall von VSt-A3 waren keine Auffälligkeiten feststellbar. Bei Betrachtung der Dehnungsübertragungsquotienten und der dazugehörigen Standardabweichungen zeigten die Kombinationen mit Polyimid- bzw. Ormocer®-Coating und den Cyanacrylatklebstoffen M-BOND 200 und LOCTITE 4902 gute Übereinstimmungen mit den Referenzmessungen. Auch bei steigender Belastung konnte keine signifikante Verminderung der Dehnungsübertragung festgestellt werden. Bei den genannten Kombinationen bewirkte die Abdeckung eine Verschlechterung von ca. 2,7 % im Vergleich zu den nicht abgedeckten Fasersträngen.

Innerhalb der VBe wurden 27 Betonzylinder im Druckversuch lastschrittweise geprüft. Neben den verschiedenen Klebstoff-Coating-Kombinationen sollte auch der Einfluss von drei Grundierungsarten in die Beurteilung integriert werden. Bis auf die extremen Standardabweichungen des Faserstrangs VBe-P-EA ließen sich nur geringfügige Abweichungen feststellen. Bei der Betrachtung der Dehnungswerte zeigten sich v.a. bei den Probekörpern VBe-S-O1 und VBe-S-O3 Abweichungen zwischen den einzelnen Zylinderquadranten. Das Phänomen bestätigten die Dehnungsmessungen mittels IWA, weshalb an dieser Stelle von einer Unregelmäßigkeit auf Seiten der Prüfmaschine oder der Schnittflächen der Probekörper ausgegangen wird. Aus diesem Grund werden für die Beurteilung der Übertragungsverluste ausschließlich die Dehnungsquotienten herangezogen. Allgemein reduzierten sich mit einer Grundierung die Dehnungsübertragungsverluste nahezu aller Faserstränge. Die Kombination VBe-S-O-MB wies die geringsten Verluste von durchschnittlich 7 % auf. Außer bei den Kombinationen mit dem Cyanacrylatklebstoff LOCTITE 4902 nahmen die Verluste bei steigender Belastung zu.

Im Rahmen der VMa wurden die Fasersensoren in Betonprismen integriert. Anhand von Schwindversuchen sollte die Fasermessung einer Vergleichsmessung mit Messuhren gegenübergestellt werden. Lediglich die Messungen VMa-O1_{t₁} und VMa-O2_{t₁} zeigten im Randbereich Messabweichungen. Die geringsten Dehnungsübertragungsverluste wies die Ormocer®-Faser mit durchschnittlich 3 % auf. Die Standardabweichung im Validierungsbereich lag bei allen Fasermessungen $\leq 21 \mu\epsilon$.

6 Diskussion der Versuchsergebnisse

In diesem Kapitel werden die Validierungsergebnisse je nach Anwendungsszenario diskutiert und interpretiert. Auf eine Einordnung in den Stand der Forschung und eine detaillierte Begutachtung der gewonnenen Daten folgt eine Gegenüberstellung hinsichtlich der Modellrechnungen. Im Abschnitt Methodenkritik werden das Versuchsdesign und der Stellenwert der Vergleichsmesstechnik evaluiert. Anschließend folgen aus der Diskussion heraus Material- und Handlungsempfehlungen für die Anwendung der Messtechnik. Aus den bisherigen Erkenntnissen in Kombination mit dem Stand der Forschung lässt sich der weitere Forschungsbedarf ableiten.

6.1 Rohdatenaufbereitung

Die Rohdatenaufbereitung stellt den wichtigsten Aspekt des Messverfahrens dar. Die enorme Datenmenge repräsentiert einerseits eine hohe Informationsdichte, erschwert andererseits die Interpretation der Messdaten. Ohne eine weiterführende Aufbereitung der Rohdaten wäre das Messverfahren nur eingeschränkt nutzbar. Die entwickelte Software hat innerhalb der Validierungsversuche mehr als 23.972.900 Dehnungswerte ausgelesen und mittels eines Interpolationsverfahrens aufbereitet. Tabelle 6.1 zeigt die Anzahl an Dehnungswerten, die in den jeweiligen Versuchen aufgenommen wurden. In den Rohdaten sind auch Faserabschnitte enthalten, die keine Relevanz bei der Auswertung haben. Wird nur der für die Kongruenzanalyse relevante Validierungsbereich betrachtet (Tabelle 5.2), reduziert sich die Datenmenge auf insgesamt 1.004.788 Dehnungswerte (vgl. Tabelle 6.1).

Das vorgestellte Verfahren zur Approximation von Messabweichungen mithilfe der Interpolation nach Akima ist nur eine mögliche Herangehensweise die enorme Datenmenge zu bearbeiten. Um auch bei sprunghaften Dehnungsänderungen eine hohe Approximationsgüte zu erhalten sind weitere Untersuchungen notwendig. Dabei sollten auch andere Vorgehensweisen und Algorithmen in Betracht gezogen werden. Hier könnten im Besonderen zweidimensionale Verfahren für zukünftige Forschungsaktivitäten von Interesse sein.

Tabelle 6.1: Anzahl der Dehnungswerte vor und nach der Aufbereitung

Versuchsreihe	Dehnungswerte Rohdaten	Dehnungswerte Validierungsbereich
VSt	17.030.735	749.713
VBe	6.591.121	224.385
VMa	351.044	30.690
Summe	23.972.900	1.004.788

6.2 Applikation auf der Stahloberfläche

Die Ergebnisse der VSt zeigen eine hohe Korrelation zwischen der Fasermessung mittels Polyimid- und ORMOCER[®]-Coating und der photogrammetrischen Vergleichsmessung. Diese Ergebnisse decken sich mit denen, die Davis et al. und Speck et al. in [25, 126] beschreiben. Während in [25] keine Informationen zum verwendeten Coating und Klebstoff zu finden sind, nutzten Speck et al. Epoxidharz- und Cyanacrylatklebstoffe sowie Polyimidfasern. Die Daten zu den Kombinationen VSt-O-MB widersprechen jedoch den Dehnungsübertragungsverlusten von ca. 18 %, die Schlüter in [119] feststellte. Ebenfalls konnten die hohen Verluste von > 20 % mittels Acrylatcoating nicht reproduziert werden. Bei allen Kombinationen zeigte sich beim Acrylatcoating (VSt-A) ein Unterschied von < 11 % im Vergleich zur photogrammetrischen Dehnungsmessung, wobei der Wert mit dem von [80] nahezu übereinstimmt: Li et al. ermittelten ca. 10 % Dehnungsübertragungsverluste im Zugversuch auf Stahlproben. Die Autoren geben jedoch nicht an, welchen Klebstoff und welches Coating sie verwendeten. Die enormen Verluste von teilweise 20 % bis 30 % von [3] ließen sich nicht reproduzieren. Die allgemeine Aussage, dass mit Polyimidcoating im Vergleich zu Acrylatcoating präzisere Ergebnisse erzielt werden können, deckt sich mit den Erkenntnissen von [26, 27, 109, 119, 120, 126]. Aus mehreren Gründen sind die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit aussagekräftiger: Neben den detaillierten Angaben zum verwendeten Klebstoff und Coating wurden deutlich mehr Probekörper geprüft als in der vorgestellten Literatur. Zudem wurde intensiv auf die Vorbereitung der Klebefuge und den Klebeprozess eingegangen, sodass eine Reproduktion ermöglicht wird. Darüber hinaus kam ein Vergleichsmessverfahren zum Einsatz, welches keine eventuellen Einschränkungen durch die Klebefuge erfährt.

Werden die Klebstoffe untereinander verglichen, zeigten sich – bis auf die Kombinationen VSt-A-EA – keine signifikanten Unterschiede innerhalb der jeweiligen Versuchsreihen (VSt-A, VSt-P, VSt-O). Die gemessenen Dehnungsübertragungsverluste von ca. 11 %

mittels Acrylatcoating lassen sich somit auf einen Schlupf zwischen Coating und Cladding und/oder einen Spannungsabbau durch das weniger steife und dickere Coating zurückführen (vgl. Abbildung 1.1).

Die Standardabweichungen bieten eine weitere Möglichkeit, die jeweiligen Kombinationen untereinander zu vergleichen. Bei konstanten Dehnungsverläufen kann die Streuung entlang der Faser als Prädiktor für die Qualität der Dehnungsübertragung von Coating und Klebstoff herangezogen werden. Die ermittelten Abweichungen der Zeilenvektoren im Validierungsbereich zeigten höhere Werte bei der Acrylatfaser als bei den beiden anderen Coatings. In Kombination mit den Dehnungsübertragungsverlusten zeigten v.a. die Konstellationen VSt-O-MB und VSt-O-L gute Dehnungsübertragungseigenschaften.

Im Vergleich zur Literatur bietet die vorliegende Arbeit erstmals eine Quantifizierung des Einflusses einer nachträglichen Abdeckung. Diese soll dem Schutz der Klebefuge und Faser vor mechanischen und chemischen Einflüssen und vor einer möglichen Beeinträchtigung durch Wasser dienen. Wie in Abschnitt 2.3.2 dargestellt, kann v.a. Feuchtigkeit die Klebstoffhaftung beeinträchtigen. Die Versuchsergebnisse der Polyimid- und ORMOCER®- Fasern zeigten eine verminderte Dehnungsübertragung ($\approx 2\%$) im Vergleich zu den Werten ohne Abdeckung. Die Standardabweichungen dieser Proben befinden sich trotzdem auf dem Niveau mit den Werten ohne Abdeckung. Der festgestellte Unterschied ist sehr gering; zudem wurde nur ein Probekörper je Coatingmaterial mit Abdeckung geprüft. Weitere Untersuchungen zum Einfluss einer Abdeckung sind daher notwendig.

Laut den Grundlagen zur Dehnungsübertragung aus Abschnitt 1.1 sollte folgende Gleichung gelten:

$$\varepsilon_f \leq \varepsilon_v \quad (6.1)$$

Einige Dehnungsmessungen mittels Polyimid- und ORMOCER®-Coating zeigten höhere Werte als photogrammetrische Vergleichsmessungen. Einerseits unterliegt die Vergleichsmessung ebenfalls Streuungen, die zur Abweichung beitragen können, andererseits misst die photogrammetrische Dehnungsmessung die Änderung der Streckenlänge zwischen den Messpunkten (vgl. Abbildung 4.6) und vernachlässigt dabei den Durchhang. Im Versuchsaufbau sollte diesem Aspekt durch eine erhöhte Anzahl an Messpunkten entgegengewirkt werden. Wurden die Bogenlängen der einzelnen Strecken einbezogen, glichen sich die Dehnungswerte beider Messverfahren weiter an.

Im Vergleich zu den Dehnungsübertragungsmodellen aus Abschnitt 2.2.1 bestätigen die Versuchsergebnisse, dass mit einem höheren E-Modul des Coatings E_c und einem geringeren Faserdurchmesser r_c die Dehnungsübertragungsverluste reduziert werden können. Die Modelle überschätzen jedoch die Dehnungseinleitungslängen beim Polyimid- und Acrylatcoating (vgl. Abbildung 2.10): Die Fasermessung mittels Polyimidcoating

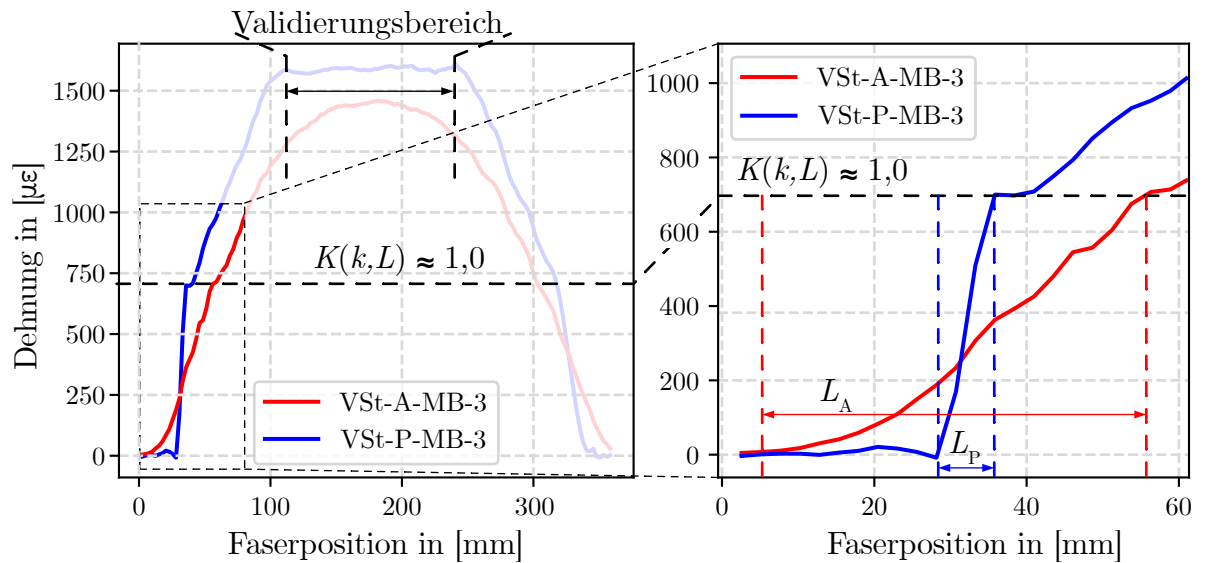


Abbildung 6.1: Links: Verlauf der gemittelten Zeilenvektoren VSt-A-MB-3 und VSt-P-MB-3; rechts: Darstellung der näherungsweisen Bettungslängen der mittleren Dehnungsverläufe der Proben VSt-A-MB-3 und VSt-P-MB-3

erreichte schon nach einer Bettungslänge von ca. $L = 6$ mm einen Dehnungskoeffizienten $K(k, L)$ (Gleichung 2.7) von nahezu $\approx 1,0$ (Abbildung 6.1). Das Acrylatcoating erreicht diesen Wert ab einer Bettungslänge von $L \approx 50$ mm. Die Unterschiede der Bettungslängen verdeutlichen, dass ein detaillierter Vergleich zwischen den Messergebnissen und den ermittelten Modellwerten nur ansatzweise sinnvoll erscheint. Allein die Aspekte der Klebefuge, darunter die Klebstoffschichtdicke und der Klebstoffüberhang, können nur bedingt beeinflusst und überprüft werden. Darüber hinaus lassen sich mit dem in dieser Arbeit angewandten Applikationsprozess keine vollkommen gleichwertigen Klebefugen erzielen. Allerdings zeigen die Ergebnisse, dass sich unter Einhaltung der Handlungsempfehlungen bezüglich der Materialauswahl, der Vorbehandlungsmaßnahmen und des Klebprozesses aus Abschnitt 2.3.3 ausreichend genaue Übereinstimmungen zwischen beiden Messverfahren erzielen lassen.

6.3 Applikation auf der Betonoberfläche

Die Validierungsversuche quantifizierten erstmals ausgiebig die Dehnungsübertragung von auf Betonoberflächen applizierter FOS. Zudem haben bisher nur vereinzelte Autoren den Einsatz unter Druckbelastung überprüft [58] bzw. überhaupt der FOS eine

Vergleichsmessung gegenübergestellt [8, 10, 11]. Auch wurden bisher noch keine Vergleichsuntersuchungen zu den unterschiedlichen Vorbehandlungsmaßnahmen, wie dem Freilegen der Gesteinskörnung oder einer zusätzlichen Grundierung, durchgeführt. Einige Autoren prüften bisher hinsichtlich der Rissdetektion einige Coatingmaterialien bzw. die generelle Anwendung der VFOS (vgl. Abschnitt 3.2).

Die in Abschnitt 5.2.2 ermittelten Dehnungsverluste im Vergleich zur Messung mittels IWA widersprechen den Werten aus der Literatur. Während in [10] 10 % bis 20 % Dehnungsverluste mit einer Polyimidfaser und einem Epoxidharz dargestellt werden, stellte die Forschergruppe ca. 40 % Unterschied zur Vergleichsdehnung unter Einsatz eines Cyanacrylates in [8, 11] fest. Die Dehnungsverluste in der vorliegenden Arbeit mit Polyimidcoating und Epoxidharz – ohne zusätzliche Grundierung – beziffern sich auf ca. 20 % bis 30 %. Beim Einsatz mit einem Cyanacrylat wurden dagegen lediglich maximal 14 % festgestellt. Beim Vergleich der Klebstoffe untereinander zeigte sich, dass mit den drei Cyanacrylaten auf der Betonoberfläche eine bessere Dehnungsübertragung erzielt werden konnte. Die Haftung und Vernetzung der Cyanacrylatklebstoffe auf der Betonoberfläche könnten aufgrund ihrer niedrigeren Viskosität besser ausfallen als die der anderen Klebstoffe. Mit Einsatz einer Grundierung gleichen sich die Unterschiede weiter an, wobei auch in diesen Fällen die Kombinationen mit den beiden Cyanacrylaten M-BOND 200 und Z70 die geringsten Dehnungsverluste aufzeigten.

Werden die Unterschiede der einzelnen Vorbehandlungsmaßnahmen betrachtet, zeigt sich eine signifikante Verbesserung der Dehnungsübertragung durch Anordnung einer Grundierung mit SIKADUR 330 oder EPOXIDHARZ LCL. Während bei den Acrylat- und ORMOCER[®]-Fasern in Kombination mit SIKADUR 330 die geringsten Verluste gemessen wurden, zeigten sie sich bei der Polyimidfaser in Kombination mit EPOXIDHARZ LCL. Disputabel ist, weshalb mit dem Polyimidcoating in Verbindung mit SIKADUR 330 gegenüber den beiden anderen Coatings keine signifikante Verringerung der Verluste erzielt werden konnte. Generell lässt sich feststellen, dass durch eine Grundierung mit Epoxidharz die offenen Poren des Betons größtenteils geschlossen und homogenere Oberflächen geschaffen werden, wodurch sich die Klebeeigenschaften verbessern können. Möglicherweise verstärkt sich die Haftung der angewendeten Klebstoffe auf Epoxidharzen gegenüber Betonoberflächen. An dieser Stelle sind weitere Untersuchungen zum Einfluss der Grundierung auf die Dehnungsübertragung notwendig.

Die Aussagekraft der Standardabweichungen als Prädiktor der Dehnungsübertragungseigenschaften (vgl. Abschnitt 6.2) innerhalb der VBe ist eingeschränkt. Grundsätzlich lässt sich die Streuung zur Einschätzung einer korrekten Dehnungsübertragung nutzen, jedoch konnten Schwankungen bei planparalleler Lasteinleitung festgestellt werden. Eine imperfekte Lasteinleitung zeigten v.a. die Probekörper VBe-P3 und VBe-E-O3. Bei ihren Messungen traten bei einigen Fasersträngen sowohl erhöhte Standardabweichungen auf

(Tabelle B.6 und B.7) als auch eine signifikante Differenz zwischen den Dehnungswerten am Anfang und Ende des Messbereichs innerhalb eines Zeilenvektors. Hinsichtlich der ermittelten Dehnungsquotienten besteht keine Einschränkung der Aussagekraft, da die IWA unmittelbar neben den jeweiligen Fasersträngen angeordnet waren. Dennoch lässt sich festhalten, dass beim Einsatz einer Grundierung die Streuungen der Zeilenvektoren verringert werden. Demnach wird davon ausgegangen, dass eine Grundierung neben einer Reduktion der Verluste auch zu einer homogenen Dehnungsübertragung führt.

Die Standardabweichung des Faserstrangs VBe-P-3-EA (Tabelle B.6) weist in den Lastschritten zwei und drei extreme Messwerte auf. Bei detaillierter Betrachtung des Dehnungsverlaufs geht der Autor davon aus, dass sich die Haftungseigenschaften des Epoxidharzes im oberen Bereich der Klebefuge verschlechterten, wodurch die übertragene Dehnung niedriger ist als im unteren Bereich.

Im Vergleich zu den Dehnungsübertragungsmodellen bestätigt die VBe die Annahme, dass ein höherer E-Modul sowie ein geringerer Faserradius bessere Dehnungsübertragungseigenschaften zur Folge haben. Bei den Validierungsversuchen zeigten sich geringere Bettungslängen als in der in Abschnitt 2.2.1 vorgestellten Modellrechnung bei den Messungen mittels Polyimidfaser (vgl. Abbildung 2.10 und Abbildung 6.2). Einige Polyimidfaserstränge erreichten bereits nach ca. 5 mm das Niveau der mittleren Dehnung im Validierungsbereich. Bei der Acrylatfaser liegen die Bettungslängen bei $L \approx 65$ mm und korrelieren mit der Modellrechnung. Allerdings sind bei beiden Coatingmaterialien die Dehnungsquotienten im Vergleich niedriger als die Dehnungskoeffizienten der Modelle. Wie bereits angedeutet, könnte der Grund dafür die inhomogene und poröse Struktur der Betonoberfläche sein, die die Dehnungsübertragung reduziert. Selbst mithilfe einer Grundierung konnten die Unterschiede zur Vergleichsmessung zwar verringert, jedoch nicht komplett negiert werden. Diesbezüglich sind weitere Untersuchungen notwendig, um v.a. mögliche Unterschiede zwischen unterschiedlichen Betonzusammensetzungen festzustellen.

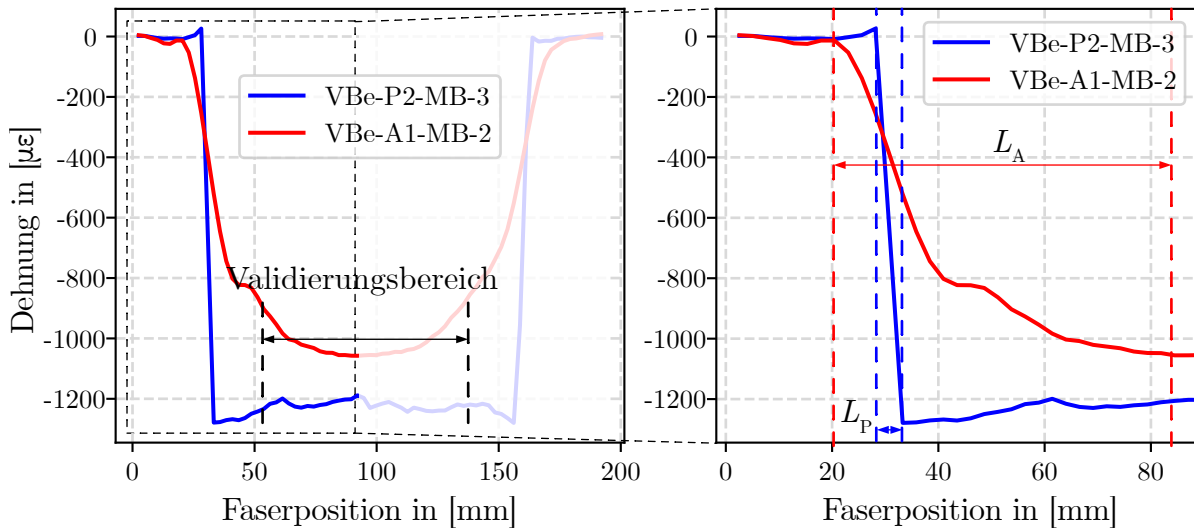


Abbildung 6.2: Links: Verlauf der Zeilenvektoren VBe-A1-MB-2 und VBe-P2-MB-3; rechts: Darstellung der näherungsweisen Bettungslängen der Proben VBe-A1-MB-2 und VBe-P2-MB-3

6.4 Integration in die Betonmatrix

Die VMa quantifiziert erstmals anhand von Schwindversuchen einen Vergleich verschiedener Coatingmaterialien mit einem Referenzmessverfahren zur Dehnungsmessung innerhalb der Betonmatrix. Die Ergebnisse zeigten eine hohe Korrelation zwischen der Messung mittels FOS und der Vergleichsmessung mit Messuhren. Besonders beim ORMOCER[®]-Coating wurden nur geringfügige Unterschiede festgestellt. Ohno et al. beschreiben in [104], dass integrierte optische Fasern keine ausreichende Verankerung mit dem Beton erfahren. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen jedoch unter geringer Druckbelastung eine nahezu vollständige Dehnungsübertragung, was sich mit den Ergebnissen von [29] deckt. Auch die Dehnungsübertragungsverluste der Acrylatfasern verdeutlichen – zumindest zum Messzeitpunkt t_2 – Übereinstimmungen mit Studien anderer Autoren [58, 66, 80]. Die hohen Verluste von teilweise $> 15\%$ bei [63–65, 82, 126] konnten nicht bestätigt werden. Zum Messzeitpunkt t_1 zeigten die Acrylatfasern nur 7% Abweichung gegenüber der Messung mittels Messuhr. Erstmals konnte gezeigt werden, dass sich mithilfe eines ORMOCER[®]-Coatings auch bei Belastungen $< -350\ \mu\epsilon$ die Dehnung des Betons nahezu vollständig auf den Faserkern übertragen ließ. Dadurch sind auch Transferfunktionen obsolet, wie sie in [63, 82] beschrieben werden.

Die Unterschiede der gemessenen Dehnungen zwischen dem Acrylatcoating und den

beiden anderen Fasercoatings sind im Vergleich zur VSt und VBe wesentlich geringer. Das Acrylatcoating erreicht zum Messzeitpunkt t_1 wie auch t_2 in der Mitte des Probekörpers das Dehnungsniveau der Polyimid- und ORMOCER[®]-Fasern. Der Autor geht davon aus, dass sich durch den wesentlich höheren E-Modul des Betons gegenüber den Klebstoffen die Schubverzerrung zwischen Coating und umgebenden Stoff reduziert. Der Unterschied zwischen Polyimid- und ORMOCER[®]-Coating korreliert hingegen mit den beiden anderen Untersuchungen: Auch dort wurden, wenn auch in geringem Maße, niedrigere Dehnungsverluste durch das ORMOCER[®]-Coating festgestellt.

Die Standardabweichungen der Zeilenvektoren können hier wie bei der VSt herangezogen werden, um die Linearität der Dehnungsübertragung zu beurteilen. Die Abweichungen der drei Coatingmaterialien zeigen nur marginale Unterschiede. Auch innerhalb der beiden Messzeitpunkte treten keine signifikanten Änderungen der Standardabweichungen auf. In Kombination mit den ermittelten Dehnungsquotienten lässt sich feststellen, dass die Dehnungen vom Beton gleichmäßig und homogen an den Faserkern übertragen werden können.

VMa-O1 _{t_1} zeigt im Bereich ab 130 mm einen stetigen Abfall der Dehnung bis zum Ende des Probekörpers. Zum Messzeitpunkt t_2 konnte dieser Abfall nicht mehr festgestellt werden. Die Rohdaten dokumentieren in diesem Bereich vermehrt Messabweichungen, die zum Messzeitpunkt t_2 nicht mehr auftraten. Es wird vermutet, dass lokale Dehnungsspitzen zwischen einzelnen Messpunkten außerhalb des messbaren Bereichs des Messsystems lagen (vgl. Abschnitt 5.1). Die fortschreitende Schwindverformung führte zum Ausgleich der Dehnungsspitzen, wodurch zum Messzeitpunkt t_2 keine Messabweichungen mehr auftraten. Für eine detaillierte Beurteilung der Messabweichungen sind jedoch weiterführende Untersuchungen notwendig.

Der Dehnungsverlauf von VMa-O2 _{t_1} weist im Bereich der Faserposition 20 mm einen Dehnungsanstieg von ca. 140 $\mu\epsilon$ auf. Bei der Betrachtung der Rohdaten ließen sich vereinzelt Messabweichungen feststellen. Die Rohdatenaufbereitung führte in diesem Fall zu einer Approximation anhand der verfügbaren Messpunkte, die das Messgerät noch erfasste. An dieser Stelle ist nicht geklärt, ob es sich um systematische Messabweichungen handelt und/oder um eine Dehnungserhöhung aufgrund partiell verstärkter Schwindprozesse. Da sich jedoch zum Messzeitpunkt t_2 Messwerte auf dem Dehnungsniveau von VMa-O2 _{t_1} befinden, können systematische Messabweichungen prinzipiell ausgeschlossen werden. Bei der Betrachtung des Querschnitts ließen sich keine sichtbaren Gefügestörungen feststellen. Zusätzliche Forschungsbemühungen und Erfahrungen mit weiteren Versuchsreihen sind notwendig, um derartige Anomalien im Dehnungsverlauf beurteilen zu können.

Im Vergleich zum Dehnungsmodell nach Yuan et. al. [134] lässt sich feststellen, dass die Lasteinleitungslänge der zwei vergleichbaren Coatingmaterialien (Acrylat, Polyimid) überschätzt wird (vgl. Abbildung 2.9). Das Polyimidcoating erreicht bereits nach ca. 10 mm

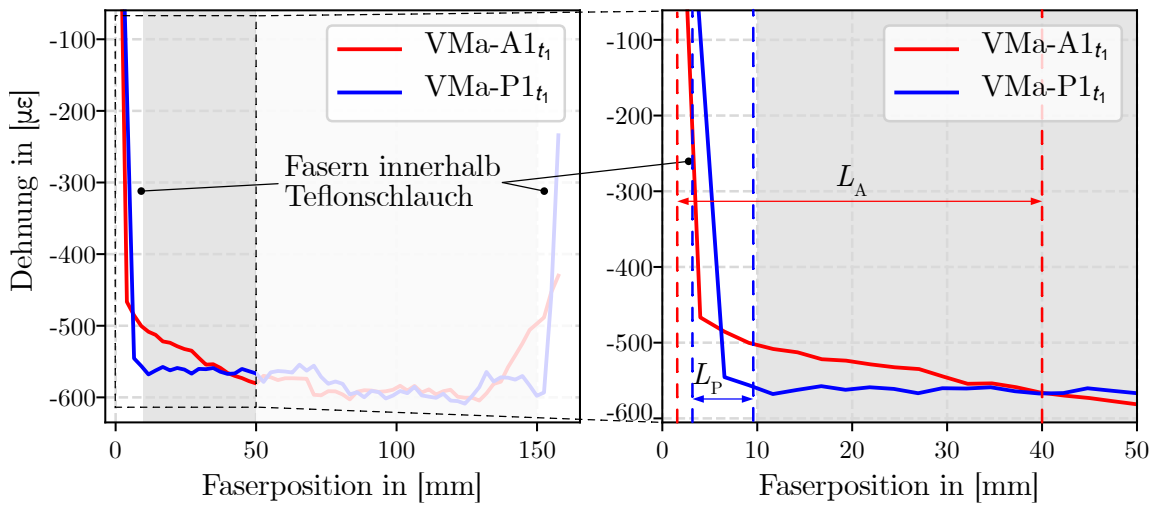


Abbildung 6.3: Links: Verlauf der Zeilenvektoren VMa-A1_{t_1} und VMa-P1_{t_1} ; rechts: Darstellung der näherungsweise Bettungslängen von der Zeilenvektoren VMa-A1_{t_1} und VMa-P1_{t_1}

nahezu das Niveau der Vergleichsmessung (Abbildung 6.3). Das Acrylatcoating benötigt < 50 mm Bettungslänge, bis > 90 % der Vergleichsdehnung, bzw. $K(k, L) > 0.9$ erreicht wird. Hinsichtlich der maximal möglichen Dehnung stimmen die Werte des Modells mit den Ergebnissen der VMA für das Acrylatcoating überein: Der Dehnungskoeffizient und die Dehnungsquotienten liegen im Bereich von 0,9. Bei der Messung mit Polyimidfaser zeigten die Ergebnisse geringere Werte als aus dem Dehnungsübertragungsmodell. An dieser Stelle steht ein Dehnungsquotient von ca. 0,94 einem Dehnungskoeffizienten von $\approx 0,99$ gegenüber. Darüber hinaus wird im Modell nach [134] der Einfluss des Lastanstiegs und der daraus resultierenden Dehnungsübertragungsminderung nicht berücksichtigt.

6.5 Methodenkritik

Auf Basis der Ergebnisse und deren Diskussion folgen in diesem Abschnitt kritische Anmerkungen zum Versuchsdesign und zur verwendeten Vergleichsmesstechnik. Damit soll einerseits auf mögliche Messunsicherheiten bzw. -abweichungen hingewiesen werden, andererseits dienen die Ausführung auch dazu, sie zu relativieren. Die Methodenkritik zum Versuchsdesign gliedert sich gemäß den drei untersuchten Validierungsszenarios. Im darauffolgenden Abschnitt folgt eine Bewertung der drei genutzten Vergleichsmessverfahren.

6.5.1 Versuchsaufbau und Versuchsdesign

Applikation auf der Stahloberfläche Im Zuge der VSt wurden in Vorversuchen verschiedene Versuchsdesigns überprüft (vgl. [132]). Der in der Literatur oft verwendete Zugversuch (z.B. in [119]) führte zu Ungenauigkeiten, weshalb der 4-Punkt-Biegeversuch zum Einsatz kam. Zum einen deuteten die Ergebnisse des Zugversuchs auf eingeleitete Versatzmomente im Zuge der Einspannung der Probekörper hin. Zum anderen trat ein Schlupf zwischen Spannbacken und Prüfmaschine auf, der einerseits die eingeleitete Kraft minderte, andererseits zu einer Parallelverschiebung in der Längsachse führte. Da die Messverfahren nicht alle in einer Achse appliziert werden können, erfuhren sie unterschiedliche Dehnungen im Verlauf des Belastungsversuchs. Der 4-Punkt-Biegeversuch besitzt diesbezüglich entscheidende Vorteile: Der Probekörper wird auf die Auflager platziert und nicht eingespannt, sodass ein Schlupf und daraus entstehende Versatzmomente ausbleiben. Das konstante Moment zwischen den Lasteinleitungspunkten konnte genutzt werden, um die beiden Messverfahren zu vergleichen. Mithilfe des Präzisionsflachstahls ließen sich gleichzeitig verschiedene Coating-Klebstoff-Kombinationen überprüfen und die Toleranzen bezüglich der Probekörperabmessungen und Oberflächenspannungen mindern. Trotz höchster Sorgfalt können beim 4-Punkt-Biegeversuch Messunsicherheiten auftreten:

- Die Längsachse des Probekörpers und die Auflager sowie Lasteinleitungen müssen im rechten Winkel zueinander stehen; eine minimale Schrägstellung kann nicht ausgeschlossen werden.
- Qualitätsunterschiede der Komponenten der Fasersensoren (Spleißstellen, Pigtails, Terminierungen) können das Ergebnis beeinflussen. Trotz sorgfältiger Bereitstellung und Reinigung der Komponenten lassen sich Fehlstellen oder Verschmutzungen an den Verbindungsstellen nicht vollständig ausschließen.
- Alle Maßnahmen, die die Klebefuge betreffen, implizieren Fehlerpotentiale:
 - Das Schleifen und die Reinigung der Oberfläche wurden mit äußerster Sorgfalt und auf gleiche Art und Weise ausgeführt; dennoch kann eine vollkommen chemisch reine Oberfläche nicht gewährleistet werden. Weitere Informationen dazu finden sich in Abschnitt 2.3.3.
 - Ein vollkommen gleichmäßiger Klebstoffauftrag ist nur ansatzweise realisierbar.
 - Lufteinschlüsse im ausgehärteten Klebstoff lassen sich nicht komplett ausschließen und können die Dehnungsübertragung beeinflussen.
 - Die parallele Ausrichtung der Faserstränge zur Längsachse des Probekörpers kann nur in gewissen Toleranzen eingehalten werden.

Mithilfe des lastschrittspezifischen Versuchsdesigns sollte den dargestellten Unsicherheiten entgegengewirkt werden. Das Zusammenfassen der einzelnen Lastschritte zu medianen Werten mindert die Streuungen der jeweiligen Messverfahren. Darüber hinaus sind die Dehnungsquotienten unabhängig von der Kraftmesseinrichtung der Prüfmaschine, da beide Messverfahren die Dehnungen gleichzeitig erfuhren. Die Ergebnisse zeigen, dass die Abweichungen der Coatingmaterialien Polyimid sowie ORMOVER[®] grundsätzlich geringfügig ausfielen und weitestgehend vernachlässigbar sind.

Applikation auf der Betonoberfläche Das Versuchsdesign der VBe weist ebenfalls gewisses Potential hinsichtlich Messunsicherheiten auf. Allein schon die Inhomogenität des Betons kann zu Schwankungen der Messergebnisse führen. Durch die Verwendung einer selbstverdichtenden Feinkornbetonmischung sollten aber mögliche Unschärfen gering gehalten werden. Darüber hinaus kann die homogenere Oberflächenbeschaffenheit Schwankungen der Dehnungsverläufe minimieren. Trotz höchster Sorgfalt können sämtliche Fehlerquellen nur minimiert werden. Die Probekörper wurden nach entsprechender Norm hergestellt, vorbereitet und geprüft [34, 35], jedoch zeigten sich bei einigen Proben Hinweise auf eine nicht planparallele Lasteinleitung. Folgende weitere Aspekte können die Messergebnisse beeinflussen:

- Trotz regelmäßiger Überprüfung der Druckprüfmaschine können Abweichungen in der parallelen Ausrichtung der Lasteinleitungsflächen vorhanden sein (Ausrichtung des Querhauptes und des Probekörpers).
- Qualitätsunterschiede der Komponenten der Fasersensoren (Spleißstellen, Pigtail, Terminierung) können das Ergebnis beeinflussen. Trotz sorgfältiger Bereitstellung und Reinigung der Komponenten lassen sich Fehlstellen oder Verschmutzungen an den Verbindungsstellen nicht ausschließen.
- Alle Schritte, die die Klebefuge betreffen, weisen Fehlerpotential auf:
 - Das Schleifen und die Reinigung der Oberfläche wurde mit äußerster Sorgfalt und auf gleiche Art und Weise ausgeführt; dennoch kann eine vollkommen chemisch reine Oberfläche nicht gewährleistet werden. Weitere Informationen dazu finden sich in Abschnitt 2.3.3.
 - Ein vollkommen gleichmäßiger Klebstoffauftrag ist nur ansatzweise realisierbar.
 - Lufteinschlüsse im ausgehärteten Klebstoff lassen sich nicht komplett ausschließen und können die Dehnungsübertragung beeinflussen.
 - Die parallele Ausrichtung der Faserstränge zur Längsachse des Probekörpers kann nur in gewissen Toleranzen eingehalten werden.

Hinsichtlich der nicht planparallelen Ausrichtung der Lasteinleitungsflächen wurde unmittelbar neben jedem Faserstrang ein IWA angebracht. Dadurch ist die Vergleichbarkeit der Dehnungswerte und der Standardabweichung von entsprechenden Probekörpern zwar weiterhin eingeschränkt, die Aussagekraft und Vergleichbarkeit der Dehnungsquotienten bleibt jedoch bestehen. In Bezug auf die VBe-Ergebnisse können damit die Verzerrungen hinsichtlich einer schiefen Lasteinleitung und der Kraftmesseinrichtung vernachlässigt werden. Auch bei diesen Versuchsreihen mindert das Zusammenfassen der Lastniveaus zu medianen Zeilenvektoren den Einfluss des Messrauschens.

Integration in die Betonmatrix Im Zuge der VMa ist v.a. der Aspekt der Temperaturkompensation der faseroptischen Messung hinsichtlich der Vergleichbarkeit bedeutsam. Dazu wurde die Oberflächentemperatur der Probekörper mit der Umgebungstemperatur in der Klimakammer abgeglichen; die Differenz betrug weniger als 2 K. Der Einfluss der Temperatur auf die Dehnungsmessung wird dementsprechend als gering eingestuft. In Vorversuchen wurde zudem geprüft, inwiefern ein Unterschied zwischen der Temperatur auf der Oberfläche und im Inneren des Probekörpers herrscht. Nach 24 Stunden Aushärtung glichen sich beide Temperaturwerte weitestgehend an. Dennoch lässt sich ein Temperaturgradient vom Inneren zur Oberfläche nicht gänzlich ausschließen. Zudem müssen die Toleranzen der Temperaturmessverfahren, deren komplette Peripherie und Messkette Beachtung finden. Neben der Temperatur können weitere Aspekte die Dehnungsmessung beeinflussen:

- Die Messachse der Faseroptik liegt 7 mm versetzt zur Achse der Vergleichsmessung (vgl. Abbildung 4.11), was zu geringfügigen Unterschieden führen kann.
- Die Teflonschläuche zum Schutz der Faser, die in den Endbereichen ca. 10 mm hineinragen, können in diesem Bereich die Schwindverformungen nicht aufnehmen. Die Vergleichsmessung dagegen misst die Längenänderung des gesamten Probekörpers. Die Unterschiede der Mittelwerte der Zeilenvektoren unter Einbezug der Endbereiche sind marginal im Vergleich zu den Mittelwerten der Zeilenvektoren im Validierungsbereich.
- Trotz regelmäßiger Überprüfung der Messuhren können Messabweichungen bei ihnen nicht ausgeschlossen werden.
- Qualitätsunterschiede der Komponenten der Fasersensoren (Spleißstellen, Pigtail, Terminierung) können das Ergebnis beeinflussen. Trotz sorgfältiger Bereitstellung und Reinigung der Komponenten lassen sich Fehlstellen oder Verschmutzungen an den Verbindungsstellen nicht ausschließen.

- Trotz nachträglichem Spannen der Fasersensoren nach dem Füllen der Schalungen können Abweichungen hinsichtlich der Position der Faser nicht ausgeschlossen werden.
- Die Lage der Fasersensoren lässt sich nach dem Aushärten des Betons weder verändern noch kontrollieren.
- Die Sensoren wurden vor der Positionierung mittels Isopropanol gereinigt und entfettet. Dennoch können Schalölrückstände den Verbund zum Beton negativ beeinflussen.

6.5.2 Stellenwert der Vergleichsmesstechnik

Die eingesetzte Dehnungsmesstechnik unterliegt Messunsicherheiten, die sich aus systematischen und zufälligen Abweichungen zusammensetzen [30, 31]. Während die systematischen Messabweichungen einseitig gerichtet sind, können zufällige Messabweichungen in beide Richtungen um den wahren Wert streuen. Auch wenn es sich bei den Vergleichsmessverfahren um „etablierte“ Messsysteme handelt, können sie niemals frei von jeglichen Messabweichungen sein. Hinsichtlich der Vertrauenswürdigkeit der Vergleichsmessverfahren werden in diesem Abschnitt mögliche systematische Abweichungen diskutiert, mit dem Ziel, geringe Divergenzen zwischen Faser- und Vergleichsmessung zu relativieren.

Wie bei jeder anderen Messgröße handelt es sich bei den Dehnungswerten – unabhängig vom gewählten Messverfahren – um eine Approximation an einen unbekannten wahren Wert. Verschiedene Einflüsse können dazu führen, dass das Messergebnis systematisch vom wahren Wert abweicht. Einige Einflüsse wurden bereits in den vorherigen Abschnitten erläutert, beispielsweise die örtliche Auflösung der photogrammetrischen Punktverfolgung, die den Durchhang zwischen den Messpunkten nicht berücksichtigt (Abschnitt 6.2). Darüber hinaus können veränderte Lichtverhältnisse zu Messabweichungen führen. Bei der VSt ließen sich Abweichungen dieser Art durch künstliches Licht und Verschattungen minimieren. Das Messverfahren der Photogrammetrie kam trotz des vergleichsweise hohen Messrauschens zur Anwendung. Zur objektiven Beurteilung der Dehnungsübertragungsverluste sollten die Vergleichsdehnungen nicht durch eine Klebefuge bedingt sein, denn sie kann laut den Ausführungen in Abschnitt 2.3 zu erheblichen Messabweichungen führen.

In Anlehnung an Abschnitt 2.1 und Tabelle 2.1 zählen die IWA zu den robusten und zuverlässigen Messmitteln zur Ermittlung von Längenänderungen. Dennoch können auch bei Messungen mit diesem Verfahren Abweichungen auftreten. IWA übermitteln eine elektrische Größe, deren Genauigkeit neben dem Aufnehmer von der Messleitung und dem Messverstärker abhängt. Zudem können elektromagnetische Felder nicht nur die

Messleitung, sondern auch das induktive Feld innerhalb der Wegaufnehmer beeinflussen. Darüber hinaus kann der Widerstand des Tauchankers zu Abweichungen der angezeigten Dehnungen führen. IWA benötigen zur Dehnungsmessung an Betonzylindern einen Montageblock und ein Auflager für den Tauchanker (Abbildung 4.7), deren Ausrichtung zueinander und zur Schnittfläche des Zylinders Auswirkungen auf das Messergebnis hat. Trotz der möglichen Fehlerpotentiale sollte innerhalb der VBe eine Vergleichsmesstechnik gewählt werden, welche keine Interferenzen mit einer Klebefuge erfährt.

Die Messuhren, die innerhalb der VMa zur Anwendung kamen, sind ebenfalls robuste und einfache Messmethoden zur Ermittlung von Längenänderungen. Mit digitalen Messuhren sollten Ungenauigkeiten durch Ablesen ausgeschlossen werden. Dennoch können mit dieser Messmethode Abweichungen auftreten. Beispielsweise gelten auch dabei die obigen Ausführungen bezüglich des Tauchankers. Die Vergleichsmesstechnik innerhalb der VMa zeigte nach Einschätzung des Autors die geringsten Potentiale für Messabweichungen unter allen genutzten Messmethoden.

Hinsichtlich der möglichen Messunsicherheiten aus Versuchsdesign, VFOS und Vergleichsmesstechnik stellt sich die Frage, ab welchem Quotienten die Übertragungsverluste relevant sind und demnach die faseroptischen Dehnungswerte korrigiert werden müssen. Die Anzahl möglicher Einflüsse auf die angezeigten Dehnungen ist immens, besonders bei der Applikation auf der Betonoberfläche. Schlussendlich muss der Anwender entscheiden, inwiefern die Dehnungswerte einem wahren Wert entsprechen. Die Ergebnisse der Validierungsversuche vermitteln, dass Verluste $< 5\%$ als vernachlässigbar einzustufen sind.

6.6 Forschungsbedarf

Unter Einbeziehen des Forschungsstands und der Erkenntnisse aus den Versuchen ergeben sich verschiedene Anregungen für weiteren Forschungsbedarf: Neben der Validierung weiterer Coating-Klebstoff-Kombinationen muss die Variation der Betonmatrix in zukünftigen Untersuchungen implementiert werden. Darüber hinaus existiert eine Vielzahl von Klebstoffarten, die bisher nicht beachtet wurden, v.a. unter dem Aspekt der Langzeitstabilität der Klebefuge und der Robustheit gegenüber äußeren Einflüssen, darunter Feuchtigkeit, das alkalische Milieu des Betons oder Korrosionsprozesse der Stahlbewehrung. Für den Fall der Applikation auf Betonoberflächen sind weitere Untersuchungen zu den Grundierungsmitteln notwendig.

Die Auswahl der verschiedenen Coatings muss nicht nur hinsichtlich der Messgenauigkeit, sondern auch der Robustheit untersucht werden. Die in dieser Studie verwendeten Fasersensoren sind anfällig für Faserbruch; im Falle einer Beschädigung lassen sich keine

Dehnungswerte mehr anzeigen. Diesbezüglich werden auch Abdeckungen zum Schutz der Fasern und deren mögliche Einflüsse auf die übermittelten Dehnungen relevant. Sensorkabel oder polymere optische Fasern (POF) könnten hierbei einen Beitrag leisten. Erstere wurden bereits beim Stand der Forschung hinsichtlich ihrer geringeren Dehnungssensitivität erwähnt (Abschnitt 3). In Bezug auf Sensorkabel und POF müssen die Konfektionierung der Sensoren wie auch die Kosten ergänzende Beachtung finden.

Bei den Versuchen dieser Arbeit handelte es sich um statische Belastungsversuche sowie Schwindversuche. Ungeklärt ist diesbezüglich der Einfluss dynamischer Lasten auf die Stabilität der Klebefuge und des Coatings. Vor allem Lastwechsel, die sowohl Dehnungen als auch Stauchungen bewirken, sollten im Zuge einer Anwendung im SHM untersucht werden.

Darüber hinaus ist ungeklärt, wie sich die Klebefuge und die optischen Fasern bei Belastungen oberhalb der Streckgrenze des Bewehrungsstahls verhalten. Weitere Validierungen sind notwendig, um den Einfluss plastischer Verformungen auf die übermittelten Dehnungen zu beurteilen.

Das Auswertungsverfahren mag bei kleinen Laborversuchen eher eine untergeordnete Rolle spielen, bei Großversuchen oder dem Einsatz im SHM ist die Anwendung automatisierter Datenverarbeitung aber unabdingbar. Beurteilungen von Verformungen oder gar Bauteilschäden könnten mithilfe künstlicher Intelligenz und Machine-Learning-Verfahren optimiert werden. Smarte Bauwerke mit integrierten FOS, kombiniert mit einer automatisierten Auswertung, könnten Schäden zeitnah übermitteln und dazu beitragen, Katastrophen zu verhindern.

6.7 Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen

Mithilfe der Versuche wurde der Einsatz der VFOS für ausgewählte Szenarien validiert: Die Applikation auf Stahloberflächen zur Simulation der Anwendung auf der Bewehrung, die Applikation auf Betonoberflächen sowie die Integration in die Betonmatrix. In allen drei Szenarien ließen sich mit der ORMOCER®-Faser gute Ergebnisse erzielen. Als Klebstoff eignet sich sowohl auf Stahl- als auch auf Betonoberflächen Cyanacrylat – insbesondere der M-BOND 200. Darüber hinaus wird bei Applikation auf Betonoberflächen mindestens das Abschleifen der Zementhaut und Freilegen der Gesteinskörnung empfohlen. Bessere Ergebnisse konnten jedoch mit einer zusätzlichen Grundierung realisiert werden.

Neben den Material- und Handlungsempfehlungen lassen sich aus den Validierungsversuchen wesentliche Schlussfolgerungen zu drei Bereichen ableiten:

- Sinnhaftigkeit der Dehnungsübertragungsmodelle für den Einsatz der VFOS in der Praxis

- Notwendigkeit einer Validierung
- Einfluss des Faseraufbaus und aller Aspekte der Klebefuge (Vorbehandlung, Klebstofftyp) auf die Dehnungsübertragung

Dehnungsübertragungsmodelle Die Dehnungsübertragungsmodelle aus Abschnitt 2.2.1 ermöglichen einen Anhaltspunkt zu Dehnungsübertragungsverlusten ausgewählter Systeme, können aber eine Validierung nicht ersetzen. Für eine Praxisanwendung sind die Modelle nur geringfügig nutzbar, da viele Einflüsse hinsichtlich der Dehnungsübertragung nicht beachtet werden können. Allein die unterschiedlichen Vorbereitungen und Ausführungen der Klebefuge können zu enormen Abweichungen bei den erzielten Dehnungen führen. Die Bandbreite der in der Literatur aufgeführten Dehnungsverluste faseroptischer Sensoren unterstreichen diesen Aspekt (vgl. Abschnitt 3). Darüber hinaus wird v.a. die Langzeitstabilität einen enormen Einfluss auf die Haftungseigenschaften der Klebstoffe haben, was sich direkt auf die Dehnungsübertragung auswirken kann.

Validierung Aus der vorhergehenden Schlussfolgerung lässt sich die Notwendigkeit einer Validierung für das jeweilige Einsatzgebiet ableiten. Durch eine Vielzahl von Validierungsversuchen lassen sich eventuelle Dehnungsübertragungsverluste und somit eine Approximation der realen Dehnungen ableiten. Neben der Validierung des Faseraufbaus und aller Komponenten hinsichtlich der Klebefuge ist auch eine Validierung möglicher Auswerteverfahren und Automatisierungsstrategien – v.a. für den Einsatz im SHM – notwendig. Die in dieser Arbeit vorgestellten Coating-Klebstoff-Kombinationen und Auswertestrategien bieten einen ersten Ansatz für zukünftige Untersuchungen mit dieser Messtechnik.

Faseraufbau und Klebefuge Die Ergebnisse der Validierungsversuche verdeutlichen den Stellenwert des Faseraufbaus und aller Komponenten der Klebefuge (Vorbehandlung, Klebstoff, Grundierung) für die Dehnungsübertragung. Beispielsweise zeigte der Unterschied zwischen dem Acrylatcoating und den beiden anderen Coatingmaterialien, dass die Wandstärke und der E-Modul des Coatings einen erheblichen Einfluss haben. Für die Klebefuge, deren Vorbehandlung und die Klebstoffschichtdicke müssen Handlungsabfolgen und Materialempfehlungen bereitgestellt werden, die in der Praxisanwendung zu ausreichend genauen Qualitäten führen.

Für weiterführende Untersuchungen und die im nächsten Kapitel vorgestellten Bauteilversuche lassen sich folgende Vorzugsvarianten und Handlungsempfehlungen ableiten: Für den Einsatz auf Stahloberflächen und Bewehrungen sollte die Klebefuge entsprechend vorbehandelt werden (vgl. Abschnitt 4.1.2). Als Coatingmaterial eignet sich ORMOCER[®] in

Tabelle 6.2: Vorzugskombinationen aus Fasercoating, Klebstoff, Grundierung und die zugehörigen mittlere Dehnungsquotienten (q_{VST} , q_{VBe} , q_{VMa}) für den jeweiligen Einsatzort der Bauteilversuche

Einsatzort	Coatingtyp	Klebstoff	Grundierung	Dehnungsquotient
Bewehrung	ORMOCER®	M-BOND 200	/	1,01
Betonoberfläche	ORMOCER®	M-BOND 200	SIKADUR 330	0,96
Matrix	ORMOCER®	/	/	0,97

Kombination mit dem Cyanacrylatklebstoff M-BOND 200. Für die Applikation auf einer Betonoberfläche wird eine Grundierung mit dem Epoxidharz SIKADUR 330 und vorherigem Abschleifen der Zementhaut empfohlen. Zur Vorbehandlung der Klebefuge empfiehlt der Autor die Arbeitsschritte aus Abschnitt 4.2.2. Die Kombinationen aus ORMOCER®-Coating und M-BOND 200 zeigten die geringsten Dehnungsübertragungsverluste. In der Betonmatrix empfiehlt sich ebenfalls der Einsatz des ORMOCER®-Coatings. Die Zusammenstellung der Vorzugskombinationen und die zugehörigen Dehnungsquotienten (q_{VST} , q_{VBe} , q_{VMa}) zeigt Tabelle 6.2.

7 Bauteilversuche

In den folgenden Abschnitten wird die Evaluierung der Validierungsergebnisse anhand von Bauteilversuchen dargestellt. Die im Zuge der Validierung ermittelten Kombinationen aus Fasercoating, Klebstoff und Grundierungsmittel sollen für die Anwendung im Betonbau getestet und bewertet werden. Im ersten Abschnitt geht es um Erläuterungen zum Prüfkörper sowie Prüfaufbau und -ablauf. Im weiteren Verlauf finden sich Informationen zur analytischen Berechnung der Versuche, bevor die Ergebnisse im letzten Abschnitt präsentiert werden.

7.1 Prüfkörper, Prüfaufbau und -ablauf

Zur Evaluierung der Validierungsergebnisse kamen drei identische Stahlbetonbalken mit einer Breite und Höhe von 0,15 m und einer Länge von 0,70 m zum Einsatz [34]. Als Bewehrung wurden zwei Bewehrungsstäbe mit einem Durchmesser von 10 mm platziert; auf die Anordnung als Bügelbewehrung wurde im Zuge dieser Versuchsreihe verzichtet. Die Mischrezeptur des Betons ist identisch mit der aus den Validierungsversuchen und findet sich in Tabelle 4.3. Zu jedem Balken wurden drei Druckzylinder mit einem Durchmesser von 0,1 m und einer Höhe von 0,2 m hergestellt, die zur Ermittlung der Baustoffkennwerte und somit zur Versuchsnachrechnung dienen.

Jeder Balken wurde mit drei Fasersensoren an unterschiedlichen Positionen ausgestattet. Gemäß den Validierungsversuchen sind die Faserpositionen folgendermaßen definiert:

- Bewehrungsstahl
- Betonoberfläche Druckzone, 10 mm von der Oberkante
- Betonmatrix Druckzone, 10 mm von der Oberkante

Abbildung 7.1 stellt die Position der Sensoren in und am Probekörper dar.

Nach Maßgabe der Validierungsergebnisse setzen sich die verwendeten Kombinationen aus Fasercoating, Klebstoff und Grundierung für den jeweiligen Einsatzort der Faser wie in Tabelle 6.2 zusammen. Die Verfahrensweise der Applikation fand gemäß den

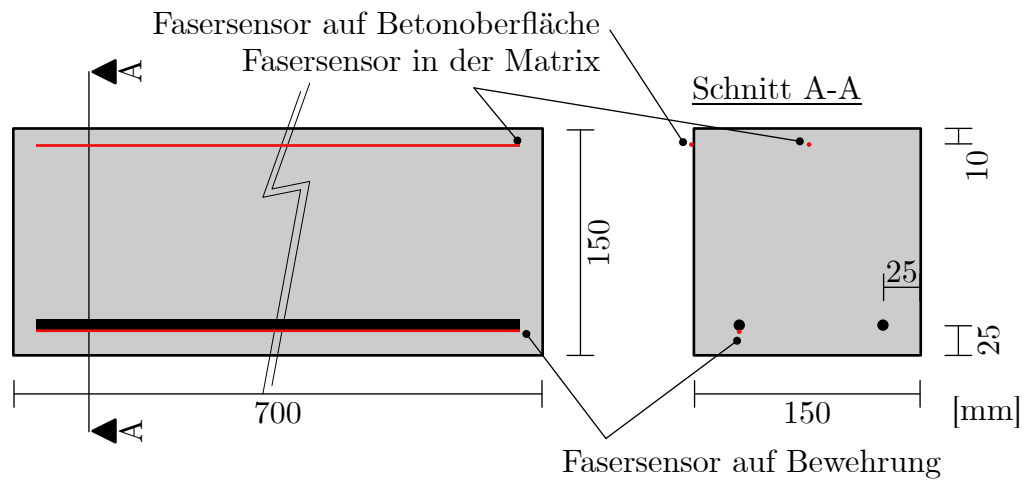


Abbildung 7.1: Probekörper für Bauteilversuche, Bewehrungsanordnung und Lage der Fasersensoren

Erläuterungen zu den jeweiligen Validierungsversuchen statt, die in den Abschnitten 4.1.2, 4.2.2 und 4.3.2 angegeben sind.

Die drei Betonbalken wurden im 3-Punkt-Biegeversuch geprüft. Dabei handelt es sich um ein Standardverfahren zur Ermittlung der Biegetragfähigkeit von Werkstoffen [36]. Als Auflager und Lasteinleitung kamen Stahlbleche mit einer Dicke und Breite von 18 mm bzw. 50 mm zum Einsatz, die jeweils frei drehbar und horizontal verschiebbar sind. Die effektive Stützweite beträgt 0,60 m; die Last greift im Mittelpunkt des Balkens an. Der Versuchsaufbau und alle relevanten Informationen sind in Abbildung 7.2 zu finden.

Die Betonbalken wurden nach der Betonage acht Tage lang unter kontrollierten klimatischen Bedingungen von 20° und 60 % Luftfeuchte gelagert und anschließend geprüft. Die Prüfung fand in sechs Laststufen statt (Tabelle 7.2); die maximale Last von 71 kN ist im Bereich der rechnerischen Querkrafttragfähigkeit. Vor dem Anfahren des ersten Lastschritts wurde eine Vorlast von ca. 3 kN aufgebracht, um den Versuchsaufbau zu überprüfen und eine ordnungsgemäße Durchführung zu gewährleisten. Zu jeder Laststufe zeichneten die Fasersensoren fünf Sekunden lang den Dehnungszustand auf, was es ermöglicht, systembedingte Messschwankungen im Nachgang zu minimieren.

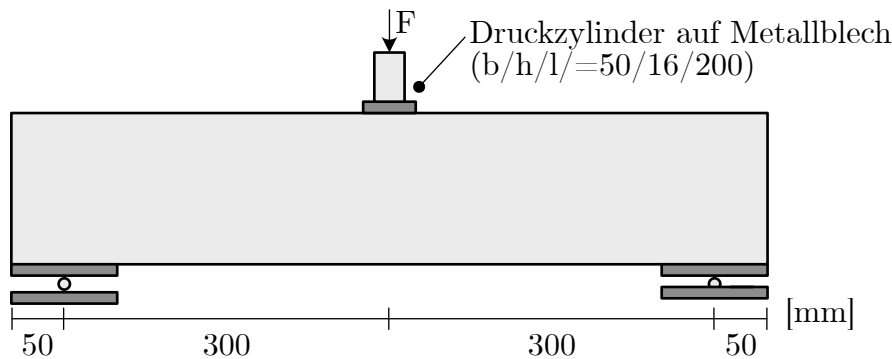


Abbildung 7.2: Versuchsaufbau 3-Punkt-Biegeversuch, Lagerungsbedingungen und Lasteinleitung

7.2 Versuchsnachrechnung, analytische Berechnung

Hinsichtlich der analytischen Berechnung der Bauteilversuche wird die maximale Druckfestigkeit aus den Druckzylindern herangezogen. Die Messwerte und daraus resultierenden Mittelwerte aus den Druckversuchen sind in Tabelle 7.1 aufgelistet. Anhand der mittleren Druckfestigkeit f_c lässt sich der Elastizitätsmodul E_c der eingesetzten Betonmischung approximativ bestimmen. In Anlehnung an [37] kann der Sekantenmodul wie folgt berechnet werden:

$$E_c = 22000 \cdot (f_c/10)^{0,3} \quad (7.1)$$

Der Elastizitätsmodul des Betons unterliegt, je nach verwendeter Gesteinskörnung, starken Schwankungen und kann im Bereich $\pm 20\%$ bis 30% im Vergleich zum mit Gleichung 7.1 ermittelten E-Modul ausfallen [56]. Für die weitere Berechnung wird daher ein E-Modul von $E_c = 45\,000\text{ N/mm}^2$ angenommen.

Für die beiden Längsbewehrungsstäbe, welche eine Querschnittsfläche von $A_s = 157\text{ mm}^2$ aufweisen, wurde ein E-Modul von $E_s = 200\,000\text{ N/mm}^2$ angenommen.

Für die analytische Berechnung der Dehnung in der jeweiligen Ebene der drei angeordneten Fasersensoren ist die Ermittlung der geometrischen Größen im Zustand I und II notwendig. Bei allen drei Balken setzte die Rissbildung zwischen Lastschritt zwei und drei ein. Dementsprechend wurde für die ersten beiden Lastschritte die Dehnung mithilfe der Querschnittswerte für Zustand I nach [83] wie folgt ermittelt.

Mit dem Bewehrungsgrad ρ_I im Zustand I, dem Verhältnis der E-Moduln von Beton und Bewehrung α_e sowie der Höhe h und der statischen Nutzhöhe d (Abbildung 7.1)

Tabelle 7.1: Kraft- und Spannungswerte aus dem Druckversuch

Nr.	Kraft in [kN]	Spannung in [N/mm ²]
EBt-1-1	898	114
EBt-1-2	879	112
EBt-1-3	896	114
Mittelwert	891	113
EBt-2-1	832	106
EBt-2-2	890	113
EBt-2-3	867	110
Mittelwert	863	110
EBt-3-1	874	111
EBt-3-2	888	113
EBt-3-3	861	110
Mittelwert	874	111

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_c} \quad (7.2)$$

$$\rho_I = \frac{A_s}{b \cdot h} \quad (7.3)$$

lassen sich die beiden Hilfsgrößen A_I und B_I berechnen:

$$A_I = \alpha_e \cdot \rho_I \cdot \left(\frac{d}{h} \right) \quad (7.4)$$

$$B_I = \alpha_e \cdot \rho_I \quad (7.5)$$

Mithilfe von $k_{x,I}$ wird die Lage der Nulllinie im Zustand I von der Oberkante des Balkens durch x_I definiert.

$$k_{x,I} = \frac{0,5 + A_I}{1 + B_I} \quad (7.6)$$

$$x_I = k_{x,I} \cdot h \quad (7.7)$$

Durch die Berechnung einer weiteren Hilfsgröße k_I lässt sich das Flächenträgheitsmoment I_I des Balkens im Zustand I wie folgt ermitteln:

$$k_I = 1 + 12 \cdot (0,5 - k_{xI})^2 + 12 \cdot \alpha_e \cdot \rho_I \cdot \left(\frac{d}{h} - k_{x,I} \right)^2 \quad (7.8)$$

$$I_I = \frac{k_I \cdot b \cdot h^3}{12} \quad (7.9)$$

Für den Zustand II ab Lastschritt drei ändert sich die Herleitung der geometrischen Größen nach [83] wie folgt:

$$\rho_{II} = \frac{A_s}{b \cdot d} \quad (7.10)$$

$$A_{II} = \alpha_e \cdot \rho_I I \quad (7.11)$$

$$B_{II} = \alpha_e \cdot \rho_I \quad (7.12)$$

$$k_{x,II} = -B_{II} + \sqrt{B_{II}^2 + 2 \cdot A_{II}} \quad (7.13)$$

$$x_I I = k_{x,II} \cdot d \quad (7.14)$$

$$k_{II} = 4 \cdot k_{x,II}^3 + 12 \cdot \alpha_e \cdot \rho_{II} \cdot (1 - k_{x,II})^2 \quad (7.15)$$

$$I_{II} = k_{II} \cdot \frac{b \cdot d^3}{12} \quad (7.16)$$

Zusammen mit der Momentenbelastung M_y (Gleichung 7.17) aus den einzelnen Lastschritten werden die Dehnungen ε_s und ε_c je nach Lage der Faser im Abstand zur Nulllinie gemäß Gleichung 7.18 berechnet. Tabelle 7.2 fasst die aufgebrachten Lasten, die dazugehörigen Momente und die sich daraus ergebenden Dehnungen zusammen.

$$M_{y,i} = \frac{F_i \cdot l}{4} \quad (7.17)$$

mit:

F ... aufgebrachte Last je Lastschritt nach Tabelle 7.2

l ... effektive Stützweite nach Abbildung 7.2

Tabelle 7.2: Lastschritte, zugehöriges Moment in der Feldmitte und ermittelte Dehnung nach [83]

Lastschritt	Kraft in [kN]	Moment in [kN m]	Dehnung Druckzone in[$\mu\epsilon$]	Dehnung Bewehrung
1	12	1,8	-61	52
2	24	3,6	-121	104
3	36	5,4	-321	1562
4	48	7,2	-428	2082
5	60	9,0	-535	2603
6	71	10,65	-633	3080

$$\varepsilon_{s/c} = \frac{M_{y,i}}{E_c \cdot I_{I/II}} \cdot z \cdot 10^6 \quad \text{in } [\mu\epsilon] \quad (7.18)$$

7.3 Auswertung und Ergebnisse

Nach der Prüfung der Probekörper wurden die Rohdaten der Fasersensoren gemäß Abschnitt 5.1 aufbereitet. Es folgt die Auswertung der drei bzw. zwei Fasern getrennt nach den einzelnen Probekörpern; die Faser in der Matrix von Probekörper EBt-3 fiel aus und konnte keine Messdaten aufzeichnen. Grundsätzlich zeigte sich v.a. für die Messung auf der Bewehrung eine gute Übereinstimmung beim Vergleich mit der analytischen Bemessung. Im Zuge der Messung auf der Betonoberfläche und in der Matrix führte die Lasteinleitung zu einer Störung im Gefüge des Betons, welche sich unmittelbar auf die Dehnungsmessung auswirkte.

Dehnungsmessung auf der Bewehrung Abbildung 7.3 zeigt die Dehnungsverläufe der einzelnen Probekörper getrennt nach den Lastschritten eins bis sechs. Während auf den Y-Achsen die Dehnung in $\mu\epsilon$ abgebildet ist, zeigen die X-Achsen die Position der Fasern auf dem Bewehrungsstab. Da an den Stirnseiten ebenfalls eine Betondeckung zur Bewehrung eingehalten wurde, konnte in diesem Bereich keine Dehnungsmessung durchgeführt werden. Die gestrichelte Linie stellt die maximale Dehnung der analytischen Bemessung entsprechend der Laststufe dar; die durchgehenden Linien (blau, orange, grün) zeigen die Dehnungsverläufe der einzelnen Probekörper (EBt-1, EBt-2, EBt-3). Der Probekörper EBt-3 (grün) versagte vor dem Erreichen des sechsten Lastschritts, sodass

an dieser Stelle keine Messergebnisse vorliegen.

Die Dehnungsverläufe in Abbildung 7.3 zeigen, insbesondere für die Lastschritte vor Beginn der Rissbildung (LS 1 und LS 2), eine genaue Übereinstimmung mit den berechneten Werten aus Abschnitt 7.2. Im zweiten Lastschritt zeigt sich bei EBt-1 im Bereich der Faserposition 610 mm eine Messabweichung, die in den anderen Lastschritten nicht festgestellt werden konnte. Unmittelbar vor Erreichen des dritten Lastschritts setzte die Rissbildung ein, die deutlich an der Dehnungsspitze in der Mitte der Fasersensoren zu sehen ist (Abbildung 7.3, Diagramm LS 3). An der Stelle der maximalen Dehnung zeigen alle drei Fasersensoren eine höhere Dehnung im Vergleich zur analytischen Berechnung aus Abschnitt 7.2. Für die Lastschritte vier bis sechs ist die Abweichung zwischen Fasermessung und Bemessung geringer. Beim vierten Lastschritt ist v.a. innerhalb der Messung von EBt-1 (blau) die Rissverteilung zu den Auflagern erkennbar. Ab dem fünften Lastschritt zeigt sich die Rissverteilung auch bei den anderen Probekörpern.

Dehnungsmessung auf der Betonoberfläche Abbildung 7.5 zeigt die Dehnungsverläufe der einzelnen Probekörper getrennt nach den Lastschritten eins bis fünf. Sämtliche Dehnungsmessungen auf der Betonoberfläche im sechsten Lastschritt fielen aus, da abplatzende Betonschollen im Bereich der Lasteinleitung die Messfasern entweder zerstörten oder den Dehnungsverlauf zu sehr verzerrten (Abbildung 7.4). Während auf den Y-Achsen die Dehnung in $\mu\epsilon$ abgebildet ist, zeigen die X-Achsen die Position der Faser auf der Betonoberfläche des Balkens. Die Klebefuge wurde bis zum Auflager geführt, weshalb die Dehnungsverläufe nach 0 mm beginnen und vor 700 mm enden. Die gestrichelte Linie stellt wie bei der Messung auf der Bewehrung die maximale Dehnung der analytischen Berechnung der entsprechenden Laststufe dar; die durchgehenden Linien (blau, orange, grün) zeigen die Dehnungsverläufe der einzelnen Probekörper (EBt-1, EBt-2, EBt-3).

Die Dehnungsverläufe in Abbildung 7.5 zeigen insbesondere beim Probekörper EBt-3 eine sehr gute Übereinstimmung der maximalen Dehnung im mittleren Bereich des Probekörpers mit der analytischen Bemessung. Im Falle von EBt-1 und EBt-2 verursachte die Lasteinleitung (Probekörpermitte, 350 mm) Gefügestörungen an der Betonoberfläche, die zu Messabweichungen und Oszillationen im Dehnungsverlauf führten. Außerhalb des Lasteinleitungsbereichs zeigen alle drei Messungen nahezu identische Dehnungsverläufe.

Dehnungsmessung in der Betonmatrix Abbildung 7.6 zeigt die Dehnungsverläufe der Messungen in der Betonmatrix der Lastschritte eins bis fünf. Die Faser in der Matrix des Probekörpers EBt-3 fiel aus, sodass dafür keine Messungen vorliegen. Ähnlich wie bei den Messungen auf der Betonoberfläche zeigten sich im letzten Lastschritt aufgrund der Gefügestörungen im Bereich der Lasteinleitung sehr starke Verzerrungen, die eine

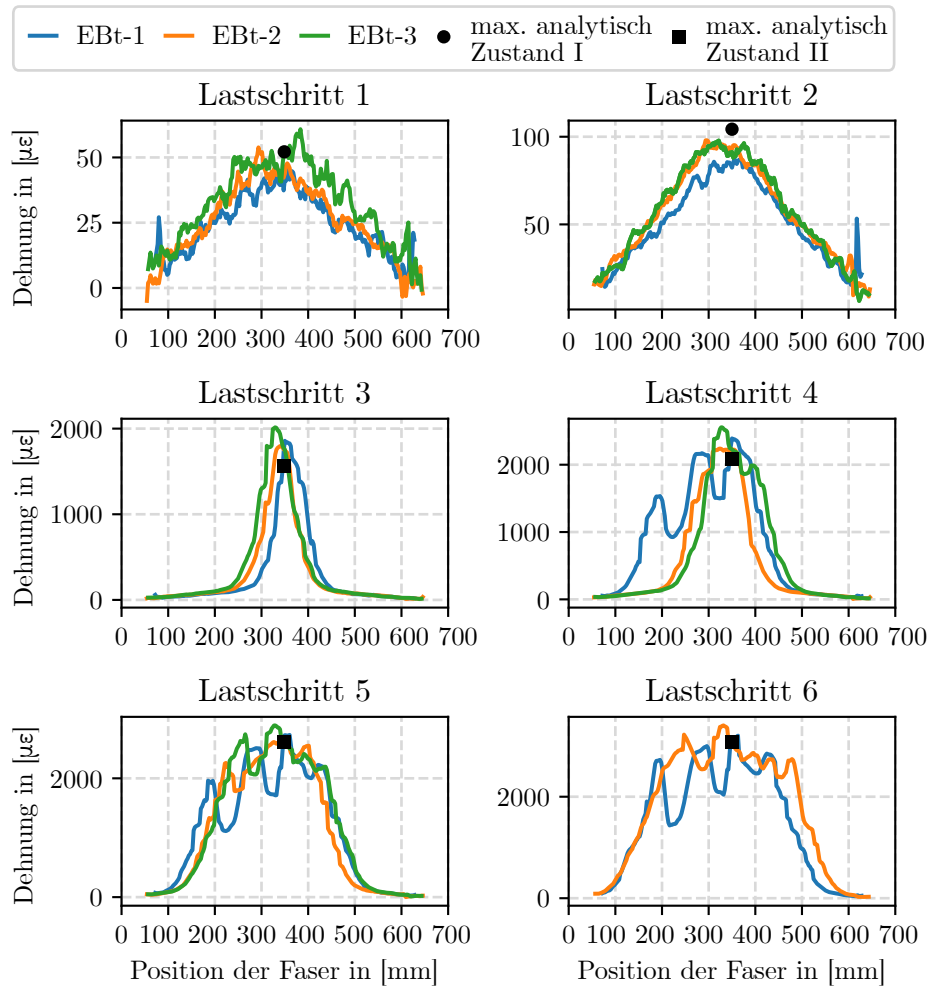


Abbildung 7.3: Dehnungsverläufe der Messungen auf der Bewehrung im Vergleich zur maximalen Dehnung der analytischen Bemessung für die Lastschritte 1-6

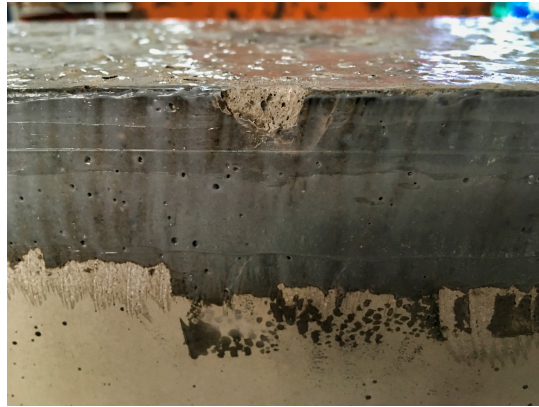


Abbildung 7.4: Abplatzungen im Bereich der Lasteinleitung bei EBt-1

adäquate Auswertung nicht ermöglichten. Die Y-Achsen repräsentieren die Dehnung in $\mu\epsilon$ gegenüber der auf der X-Achse dargestellten Position der Faser. Die Installationshilfe der Faser führt dazu, dass die Messungen nicht bis an den Probekörperrand möglich waren. Auch in diesem Fall zeigt die gestrichelte Linie den berechneten Dehnungswert an. Die durchgehenden Linien (blau, orange) stellen die Dehnungsverläufe der Probekörper EBt-1 und EBt-2 dar.

Anhand der Verläufe zeigen sich sowohl hohe Übereinstimmungen mit der analytischen Bemessung als auch Abweichungen durch Gefügestörungen, verursacht durch die Lasteinleitung. Die Ergebnisse von EBt-2 korrelieren mit der analytischen Bemessung in allen fünf dargestellten Lastschritten. Ab LS 4 werden erste Oszillationen in einem kleinen Bereich nahe der Lasteinleitung sichtbar, die auf eine Störung der Messung durch diese hindeuten. Im Rahmen der Messung von EBt-1 zeigen sich in der Mitte des Probekörpers Abweichungen zur analytischen Dehnung, die dazu führen, dass die maximale Dehnung sich nicht feststellen lässt; außerhalb der Lasteinleitung sind die Dehnungsverläufe von EBt-1 und EBt-2 in allen Lastschritten nahezu identisch.

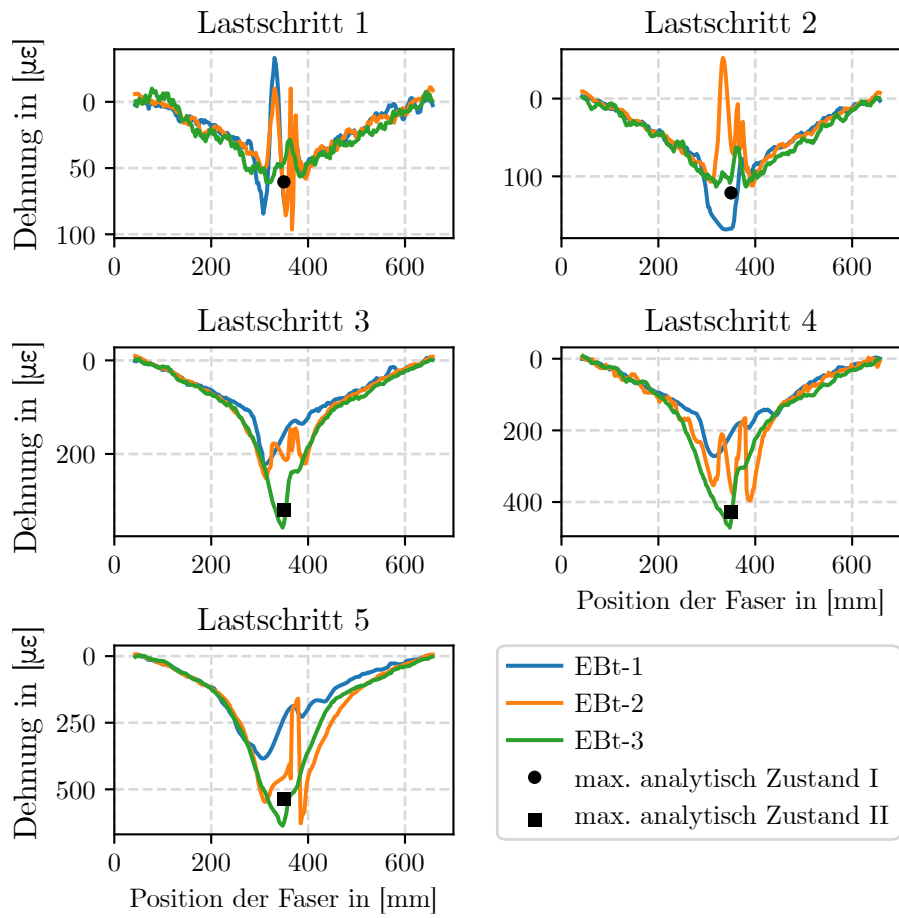


Abbildung 7.5: Dehnungsverläufe der Messungen auf der Betonoberfläche im Vergleich zur maximalen Dehnung der analytischen Bemessung für die Lastschritte 1-5

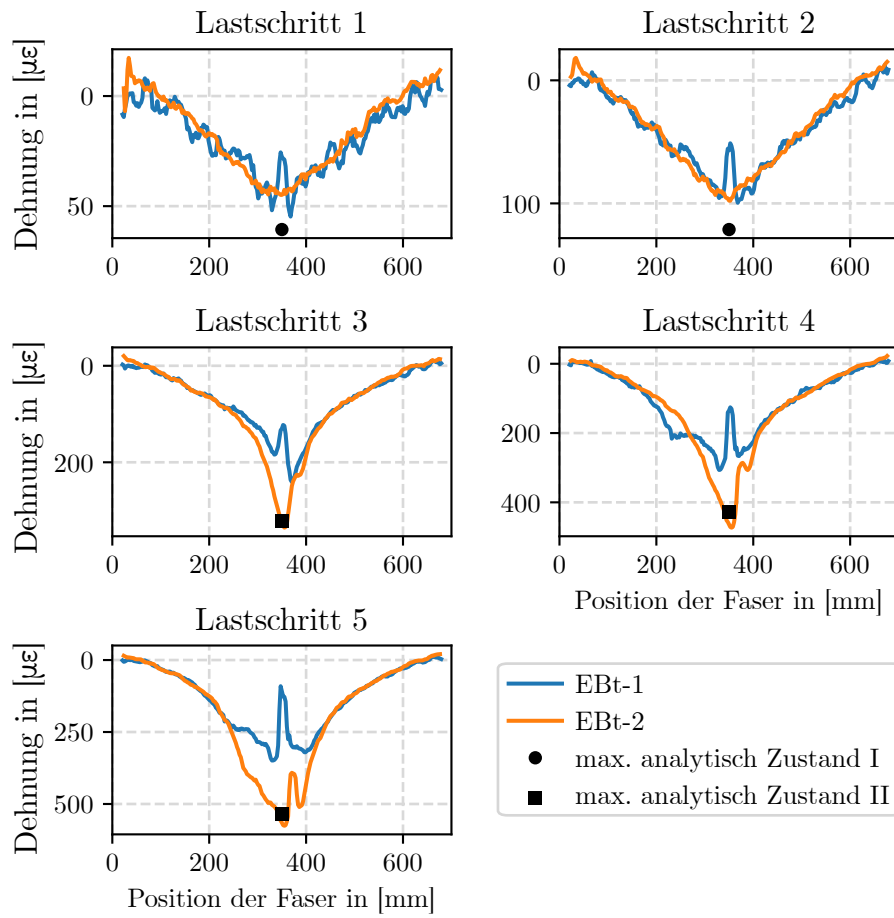


Abbildung 7.6: Dehnungsverläufe der Messungen in der Betonmatrix im Vergleich zur maximalen Dehnung der analytischen Bemessung für die Lastschritte 1-5

7.4 Zusammenfassung Bauteilversuche

Die Ergebnisse der Bauteilversuche zeigen allgemein eine gute Übereinstimmung zwischen der Dehnungsmessung mit VFOS und der analytischen Bemessung. Besonders die Ergebnisse auf der Stahlbewehrung verdeutlichen das enorme Potential dieser Messmethode für die Dehnungsmessung im Betonbau und SHM. Aber auch die Resultate der Messungen auf der Betonoberfläche und der Betonmatrix in der Druckzone des Betons weisen auf die Leistungsfähigkeit des Messverfahrens hin. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass mit den aus den Validierungsversuchen abgeleiteten Handlungs- und Materialempfehlungen ausreichend exakte Ergebnisse erzielt werden können.

Mögliche Ursachen der Abweichungen zwischen Fasermessung und der analytischen Berechnung könnten beispielsweise die Inhomogenität und Unschärfe des Betons sein. Hierunter zählen alle Aspekte, die die Herstellung der Probekörper betreffen, wie Schwan- kungen in der Zusammensetzung, Verdichtung und Aushärtung des Betons. Darüber hinaus wurde der E-Modul des Betons und des Betonstahls nur näherungsweise definiert. Gleichmaßen gilt die analytische Berechnung nur als Näherungslösung, bei der Dehnungsspitzen unberücksichtigt bleiben. Trotz der erwähnten Unschärfe auf Seiten des Materials und der Bemessung konnte eine gute Übereinstimmung erzielt werden, insbesondere bei den ersten beiden Lastschritten.

Wie bei nahezu allen Dehnungsmessverfahren stellt die Planung hinsichtlich Applika- tion und Messort eine besondere Herausforderung dar. Die Ursachen für Messausfälle, Abweichungen und Oszillationen sind vielfältig. Neben den im Zuge der Validierungs- versuche bereits genannten Herausforderungen zur Anwendung der VFOS im Betonbau lassen sich weitere Erkenntnisse nach den Bauteilversuchen wie folgt benennen:

- Faserverläufe nahe an punktuellen Lasteinleitungen oder Auflagern sollten vermie- den werden oder in der Auswertung unberücksichtigt bleiben.
- Die Applikation und Vorbehandlung der Klebefuge stellt eine besondere Herausfor- derung dar und sollte mit höchster Expertise und Sorgfalt durchgeführt werden.

8 Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit behandelt die Validierung der VFOS auf Basis von Rayleighstreuung zur Anwendung im Betonbau und im SHM. Durch die verteilte Messung entlang einer optischen Faser, kombiniert mit einer örtlichen Auflösung im Millimeterbereich, bietet die VFOS hervorragende Möglichkeiten zur Dehnungsmessung in und an Bauteilen. Jedoch ist eine Validierung des Messverfahrens für die vorgesehene Anwendung notwendig. Im direkten Vergleich mit anderen Dehnungsmessmethoden gibt es in der Literatur sehr widersprüchliche Aussagen. In drei Szenarien sollte daher die Dehnungsübertragung im Vergleich zu einem etablierten Messverfahren untersucht werden:

- Applikation auf der Stahloberfläche
- Applikation auf der Betonoberfläche
- Integration in die Betonmatrix

Zur Untersuchung der Dehnungsübertragungsverluste war es zunächst erforderlich, Methoden zur Validierung zu entwickeln. Untersuchungsgegenstand für die Applikation auf der Stahloberfläche war neben dem Fasercoating die Vor- und Nachbehandlung der Klebefuge sowie der Klebstoff selbst. Für die Applikation auf der Betonoberfläche wurde zusätzlich die Grundierung der Betonoberfläche untersucht. Bei den Messungen in der Betonmatrix waren lediglich die Coatingmaterialien Validierungsgegenstand. Als Ergebnis wurden Material- und Handlungsempfehlungen für weitere Untersuchungen mit dieser Messtechnik festgelegt. Mit einem ORMOCER[®]-Coating konnten in allen drei Szenarien gute Ergebnisse erzielt werden; als Klebstoff eignet sich ein Cyanacrylat. Für die Applikation auf der Betonoberfläche wird ein Abschleifen der Zementhaut, Freilegung der Gesteinskörnung sowie eine nachträgliche Grundierung mittels Epoxidharz empfohlen.

Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeit beinhaltete die Rohdatenaufbereitung und Auswertung der gewonnenen Daten. Aufgrund der enormen Datenmenge, die eine verteilte Messung mit sich bringt, mussten Möglichkeiten erörtert werden, sie schnell und automatisiert aufzubereiten. Darüber hinaus war es notwendig systematische Messabweichungen

mit approximierten Dehnungswerten zu substituieren. Zu diesem Zweck wurden vier verschiedene Interpolationsmethoden näher untersucht und nach ihrer Approximationsgüte verglichen. Mithilfe der Programmiersprache PYTHON wurde eine Software entwickelt, die die Rohdaten mit einer Akima-Interpolation aufbereitet und entsprechend auswertet.

Den letzten Schwerpunkt stellt die Evaluierung der Validierungsergebnisse dar. Ziel dieser Untersuchungen war es die Handlungs- und Materialempfehlungen aus den Validierungsversuchen anhand von Bauteilversuchen zu bewerten. Dazu wurden drei identische Betonbalken mit Fasersensoren ausgestattet und im 3-Punkt-Biegeversuch geprüft. Neben einigen Ausfallerscheinungen im Bereich der Lasteinleitung maßen die optischen Fasern Dehnungen, die mit denen einer analytischen Bemessung weitestgehend übereinstimmen.

Mit den vorliegenden Ergebnissen konnten erstmals Unterschiede zu Vergleichsmessmethoden in den drei Anwendungsszenarien eindeutig quantifiziert werden. Der Einfluss der Vorbehandlung von Betonoberflächen im Zusammenhang mit einer faseroptischen Dehnungsmessung ist einzigartig. Gleichermäßen existierte eine große Forschungslücke zu Erkenntnissen hinsichtlich der Dehnungsübertragung FOS in der Betonmatrix, die diese Arbeit nun endlich schließt. Innovativ ist auch die Entwicklung einer Software zur Aufbereitung der gewonnenen Dehnungswerte, die gleichzeitig Messabweichung erfasst und approximiert. Vor allem im Hinblick auf eine Anwendung im SHM, kombiniert mit einer automatisierten Messdatenerfassung und Auswertung, stellt diese Entwicklung einen enormen Meilenstein dar. Schlussendlich bestätigt die Evaluierung der Material- und Handlungsempfehlungen die hervorragenden Möglichkeiten der VFOS zur Dehnungsmessung im Betonbau. Erstmals konnten gleichzeitig die Dehnungen auf der Bewehrung, auf der Betonoberfläche und in der Matrix über die gesamte Bauteillänge gemessen werden.

8.2 Ausblick

Die VFOS kann die Dehnungsmessung gegenüber punktuellen Messmethoden beachtlich erweitern. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit deuten auf ein enormes Potential dieses Messverfahren im SHM sowie Betonbau hin. Neben der Beurteilung der Verformung eines Bauteils lassen sich auch gezielt Risse vorhersagen und detektieren sowie Aushärtungsprozesse an jeder Stelle der Messfaser überwachen. Die Bandbreite der Einsatzmöglichkeiten ist enorm: Brücken- und Ingenieurbauwerke, Kanäle, Pipelines und Wasserbauwerke wie auch Straßen könnten gezielter überwacht werden. Damit ließen sich nicht nur die vorhandenen Ressourcen sicherer und nachhaltiger nutzen, sondern auch Schäden im Zuge von Katastrophen oder Havarien besser beurteilen.

Neben dem Forschungsbedarf aus Abschnitt 6.6, der sich aus den Validierungsergebnissen ableitet, sollten zukünftige Forschungsaktivitäten im Besonderen dem Schutz

der Sensoren vor mechanischen Einflüssen gelten. Zwar existieren bereits Faserkabel, die wesentlich robuster sind als allein durch ein Coating geschützte Glasfaser, jedoch sinken damit gleichzeitig die Flexibilität bei der Konfektionierung der Sensoren, der Kostenvorteil und die Dehnungssensitivität. Darüber hinaus sollten Anstrengungen im Bereich der Klebefuge einen hohen Stellenwert einnehmen. Vor allem im Hinblick auf die Dehnungsübertragung und die Langzeitstabilität gegenüber Feuchtigkeit oder chemischen Einflüssen sind weitere Untersuchungen notwendig. Des Weiteren ist ungeklärt, wie sich die Klebefuge und das Fasercoating bei Lastbereichen oberhalb der Streckgrenze oder bei dynamischen Einwirkungen verhält.

9 Literatur

- [1] H. Akima. »A New Method of Interpolation and Smooth Curve Fitting Based on Local Procedures«. In: *Journal of the ACM* 17.4 (Okt. 1970), S. 589–602. DOI: 10.1145/321607.321609.
- [2] F. Ansari und Y. Libo. »Mechanics of Bond and Interface Shear Transfer in Optical Fiber Sensors«. In: *Journal of Engineering Mechanics* 124.4 (Apr. 1998), S. 385–394. DOI: 10.1061/(asce)0733-9399(1998)124:4(385).
- [3] M. Bado, J. Casas und A. Barrias. »Performance of Rayleigh-Based Distributed Optical Fiber Sensors Bonded to Reinforcing Bars in Bending«. In: *Sensors* 18.9 (Sep. 2018), S. 3125. DOI: 10.3390/s18093125.
- [4] X. Bao und L. Chen. »Recent Progress in Distributed Fiber Optic Sensors«. In: *Sensors* 12.7 (Juni 2012), S. 8601–8639. DOI: 10.3390/s120708601.
- [5] Y. Bao et al. »Distributed fiber optic sensor-enhanced detection and prediction of shrinkage-induced delamination of ultra-high-performance concrete overlay«. In: *Smart Materials and Structures* 26.8 (Juli 2017), S. 085009. DOI: 10.1088/1361-665x/aa71f4.
- [6] Y. Bao et al. »Measuring mortar shrinkage and cracking by pulse pre-pump Brillouin optical time domain analysis with a single optical fiber«. In: *Materials Letters* 145 (Apr. 2015), S. 344–346. DOI: 10.1016/j.matlet.2015.01.140.
- [7] J. Baqersad et al. »Photogrammetry and optical methods in structural dynamics – A review«. In: *Mechanical Systems and Signal Processing* 86 (März 2017), S. 17–34. DOI: 10.1016/j.ymssp.2016.02.011.
- [8] A. Barrias. »Fatigue testing of reinforced concrete beam instrumented with distributed optical fiber sensors (DOFS)«. In: *Training in Reducing Uncertainty in Structural Safety (TRUSS) Workshop*. TRUSS ITN. 2018, S. 65.
- [9] A. Barrias, J. Casas und S. Villalba. »A Review of Distributed Optical Fiber Sensors for Civil Engineering Applications«. In: *Sensors* 16.5 (Mai 2016), S. 748. DOI: 10.3390/s16050748.

- [10] A. Barrias, J. Casas und S. Villalba. »Embedded Distributed Optical Fiber Sensors in Reinforced Concrete Structures—A Case Study«. In: *Sensors* 18.4 (März 2018), S. 980. DOI: 10.3390/s18040980.
- [11] A. Barrias, J. R. Casas und S. Villalba. »SHM of Reinforced Concrete Elements by Rayleigh Backscattering DOFS«. In: *Frontiers in Built Environment* 5 (März 2019). DOI: 10.3389/fbuil.2019.00030.
- [12] A. Barrias et al. »Application of distributed optical fiber sensors for the health monitoring of two real structures in Barcelona«. In: *Structure and Infrastructure Engineering* 14.7 (Feb. 2018), S. 967–985. DOI: 10.1080/15732479.2018.1438479.
- [13] F. Bastianini et al. »Discontinuous Brillouin strain monitoring of small concrete bridges: comparison between near-to-surface and smart FRP fiber installation techniques«. In: *Smart Structures and Materials 2005: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems*. Hrsg. von M. Tomizuka. SPIE, Mai 2005. DOI: 10.1117/12.594760.
- [14] A. Bauer und C. Bischof. »Haftfestigkeitsuntersuchungen an Metall-Polymer-Verbunden. VI: Über die Aussagefähigkeit der Prüfmethode zur Ermittlung der Haftung im Metall-Polymer-Verbund«. In: *Plaste und Kautschuk* 34.9 (1987), S. 338–340.
- [15] A. Billon et al. »Qualification of a distributed optical fiber sensor bonded to the surface of a concrete structure: a methodology to obtain quantitative strain measurements«. In: *Smart Materials and Structures* 24.11 (Sep. 2015), S. 115001. DOI: 10.1088/0964-1726/24/11/115001.
- [16] C. Bischof und W. Possart. *Adhäsion: theoretische und experimentelle Grundlagen*. Berlin: Akademie-Verlag, 1983.
- [17] A. Bjørgum et al. »Anodising as pre-treatment for structural bonding«. In: *International Journal of Adhesion and Adhesives* 23.5 (Jan. 2003), S. 401–412. DOI: 10.1016/s0143-7496(03)00071-x.
- [18] K. Bobzin. *Oberflächentechnik für den Maschinenbau*. Wiley-VCH, 24. Sep. 2013. 462 S. URL: https://www.ebook.de/de/product/22514884/kirsten_bobzin_oberflaechentechnik_fuer_den_maschinenbau.html.
- [19] W. Brockmann et al. »Das Kleben texturierter Stahlfeinbleche«. In: *Adhäsion-kleben u. dichten* 44.3 (2000), S. 36–40.
- [20] W. Brockmann. »Adhäsion zwischen Metallen und Nichtmetallen—seit langem genutzt, noch immer nicht verstanden? Tagung „Haftung als Basis f. Stoffverbunde u. Verbundwerkstoffe“«. In: *Dt. Ges. f. Materialprüf* (1983), S. 105–122.

- [21] W. Brockmann et al. *Kleben von Kunststoff mit Metall*. Springer Berlin Heidelberg, 29. Mai 1989. 252 S. ISBN: 3540191151. URL: https://www.ebook.de/de/product/17970821/walter_brockmann_lutz_dorn_helmut_kaeufer_reinhard_bischoff_reiner_chemnitius_kleben_von_kunststoff_mit_metall.html.
- [22] W. Brockmann et al. *Klebtechnik*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Mai 2008. DOI: 10.1002/3527605851.
- [23] C.-C. Cheng et al. »An investigation of bonding-layer characteristics of substrate-bonded fiber Bragg grating«. In: *Journal of lightwave technology* 23.11 (2005), S. 3907.
- [24] J. Czarske und H. Müller. »Heterodyne detection technique using stimulated Brillouin scattering and a multimode laser«. In: *Optics Letters* 19.19 (Okt. 1994), S. 1589. DOI: 10.1364/ol.19.001589.
- [25] M. A. Davis, D. G. Bellemore und A. D. Kersey. »Distributed fiber Bragg grating strain sensing in reinforced concrete structural components«. In: *Cement and Concrete Composites* 19.1 (Jan. 1997), S. 45–57. DOI: 10.1016/s0958-9465(96)00042-x.
- [26] M. Davis, N. A. Hoult und A. Scott. »Distributed strain sensing to assess corroded RC beams«. In: *Engineering Structures* 140 (Juni 2017), S. 473–482. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.03.013.
- [27] M. Davis, N. A. Hoult und A. Scott. »Distributed strain sensing to determine the impact of corrosion on bond performance in reinforced concrete«. In: *Construction and Building Materials* 114 (Juli 2016), S. 481–491. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.205.
- [28] M. B. Davis et al. »Distributed Sensing for Shrinkage and Tension Stiffening Measurement«. In: *ACI Structural Journal* 114.3 (Mai 2017). DOI: 10.14359/51689463.
- [29] S. Delepine-Lesoille et al. »Quasi-distributed optical fibre extensometers for continuous embedding into concrete: design and realization«. In: *Smart Materials and Structures* 15.4 (Mai 2006), S. 931–938. DOI: 10.1088/0964-1726/15/4/005.
- [30] DIN 1319-1:1995-01, Grundlagen der Meßtechnik - Teil 1: Grundbegriffe (DIN 1319-1:1995).
- [31] DIN 1319-3:1996-05, Grundlagen der Meßtechnik - Teil 3: Auswertung von Messungen einer einzelnen Meßgröße, Meßunsicherheit (DIN 1319-3:1996).

- [32] DIN 52450:08-1985, Prüfung anorganischer nichtmetallischer Baustoffe; Bestimmung des Schwindes und Quellens an kleinen Probekörpern. (DIN 52450:1985).
- [33] DIN EN 10025-2:2019, Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen - Teil 2: Technische Lieferbedingungen für unlegierte Baustähle (EN 10025-2:2019).
- [34] DIN EN 12390-2:2019-10, Prüfung von Festbeton - Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen (EN 12390-2:2019).
- [35] DIN EN 12390-3:2019-10, Prüfung von Festbeton - Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern (EN 12390-3:2019).
- [36] DIN EN 12390-5:2019-10, Prüfung von Festbeton - Teil 5: Biegezugfestigkeit von Probekörpern (EN 12390-5:2019).
- [37] DIN EN 1992-1-1:2011-01, Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau (EN 1992-1-1:2004).
- [38] DIN EN ISO 7438:2016-07, Metallische Werkstoffe - Biegeversuch (ISO 7438:2016).
- [39] Dyckerhoff GmbH. *C3 Carbon Concrete Composite. Bindemittel für hochfeste Carbonbetone*. 1. Feb. 2017. URL: https://www.dyckerhoff.com/documents/209745/0/423C3Bindemittel_D_.pdf/3c690cdd-7df8-c292-83e5-02423d8f2f5d (besucht am 17.09.2019).
- [40] D. Eberlein. *Lichtwellenleiter-Technik*. ger. 10. Aufl. Kontakt & Studium Band 596. Renningen: expert verlag, 2018. ISBN: 3816934234.
- [41] W. Eickhoff und R. Ulrich. »Optical frequency domain reflectometry in single-mode fiber«. In: *Applied Physics Letters* 39.9 (Nov. 1981), S. 693–695. DOI: 10.1063/1.92872.
- [42] FBGS International N.V. *DTG coatingOrmocer®-T for Temperature Sensing Applications*. 1. Feb. 2015. URL: https://fbgs.com/wp-content/uploads/2019/03/Introducing_and_evaluating_Ormocer-T_for_temperature_sensing_applications.pdf (besucht am 16.09.2019).
- [43] P. Ferdinand. »The Evolution of Optical Fiber Sensors Technologies During the 35 Last Years and Their Applications in Structure Health Monitoring«. In: *EWSHM - 7th European Workshop on Structural Health Monitoring*. Hrsg. von L. Cam et al. IFFSTTAR, Inria, Université de Nantes. Nantes, France, Juli 2014. URL: <https://hal.inria.fr/hal-01021251>.

-
- [44] O. Fischer, S. Thoma und S. Crepaz. »Quasikontinuierliche faseroptische Dehnungsmessung zur Rissdetektion in Betonkonstruktionen«. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 114.3 (Jan. 2019), S. 150–159. DOI: 10.1002/best.201800089.
- [45] E. Foremska. »Kinetik der Reinigung von harten Oberflächen«. In: *SÖFW. Seifen, Öle, Fette, Wachse* 114.15 (1988), S. 627–632.
- [46] H. Friedrich und F. Pietschmann. *Numerische Methoden*. De Gruyter, Jan. 2010. DOI: 10.1515/9783110218077.
- [47] M. Froggatt und J. Moore. »High-spatial-resolution distributed strain measurement in optical fiber with Rayleigh scatter«. In: *Applied Optics* 37.10 (1998), S. 1735–1740.
- [48] T. G. Giallorenzi et al. »Optical Fiber Sensor Technology«. In: *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 30.4 (1982), S. 472–511. DOI: 10.1109/tmtt.1982.1131089.
- [49] D. K. Gifford et al. »Distributed fiber-optic temperature sensing using Rayleigh backscatter«. In: *2005 31st European Conference on Optical Communication, ECOC 2005*. Bd. 3. IET. 2005, S. 511–512.
- [50] D. K. Gifford et al. »Swept-wavelength interferometric interrogation of fiber Rayleigh scatter for distributed sensing applications«. In: *Fiber Optic Sensors and Applications V*. Hrsg. von E. Udd. SPIE, Sep. 2007. DOI: 10.1117/12.734931.
- [51] H. Gleich und H. Hansmann. »Niederdruck-Plasmabehandlung zur gezielten Modifizierung thermoplastischer Fügeflächen«. In: *Adhäsion* 35.1 (1991), S. 2.
- [52] B. Glisic und D. Inaudi. »Development of method for in-service crack detection based on distributed fiber optic sensors«. In: *Structural Health Monitoring: An International Journal* 11.2 (Aug. 2011), S. 161–171. DOI: 10.1177/1475921711414233.
- [53] B. Glišić et al. »Damage detection and characterization using long-gauge and distributed fiber optic sensors«. In: *Optical Engineering* 52.8 (Aug. 2013), S. 087101. DOI: 10.1117/1.oe.52.8.087101.
- [54] J. H. L. Grave, M. L. Håheim und A. T. Echtermeyer. »Measuring changing strain fields in composites with Distributed Fiber-Optic Sensing using the optical backscatter reflectometer«. In: *Composites Part B: Engineering* 74 (Juni 2015), S. 138–146. DOI: 10.1016/j.compositesb.2015.01.003.
- [55] A. Groß und P. Theuerkauff. *Praxis des Klebens*. Springer Berlin Heidelberg, 23. Dez. 1988. 196 S. ISBN: 3540503528. URL: https://www.ebook.de/de/product/17970971/andreas_gross_petra_theuerkauff_praxis_des_klebens.html.
-

- [56] P. Grübl, H. Weigler und S. Karl. *Beton: Arten, Herstellung und Eigenschaften. Handbuch für Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbau*. Berlin: Ernst & Sohn, 2002. ISBN: 3433013403. Germany.
- [57] H. Guo et al. »Fiber Optic Sensors for Structural Health Monitoring of Air Platforms«. In: *Sensors* 11.4 (März 2011), S. 3687–3705. DOI: 10.3390/s110403687.
- [58] W. R. Habel, D. Hofmann und B. Hillemeier. »Deformation measurements of mortars at early ages and of large concrete components on site by means of embedded fiber-optic microstrain sensors«. In: *Cement and Concrete Composites* 19.1 (Jan. 1997), S. 81–102. DOI: 10.1016/s0958-9465(96)00044-3.
- [59] W. Habel. *Faseroptische Sensoren für hochaufgelöste Verformungsmessungen in der Zementsteinmatrix*. Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW, Verl. für Neue Wiss, 2003. ISBN: 9783897015678.
- [60] G. Habenicht. *Kleben - erfolgreich und fehlerfrei*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016. DOI: 10.1007/978-3-658-14696-2.
- [61] G. Habenicht. *Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendungen*. Springer Berlin Heidelberg, 2009. DOI: 10.1007/978-3-540-85266-7.
- [62] A. Hartwig, O. Schorsch und W.-D. Stohrer. »Härtung von Epoxidharzen mit Nanopartikeln«. In: *adhäsion KLEBEN & DICHTEN* 49.4 (2005), S. 22–26.
- [63] J. M. Henault et al. »Analysis of the strain transfer mechanism between a truly distributed optical fiber sensor and the surrounding medium: JM Henault, J. Salin & G. Moreau M. Quiertant, F. Taillade & K. Benzarti«. In: *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting III*. CRC Press, 2012, S. 288–289.
- [64] J.-M. Henault et al. »Quantitative strain measurement and crack detection in RC structures using a truly distributed fiber optic sensing system«. In: *Construction and Building Materials* 37 (Dez. 2012), S. 916–923. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.05.029.
- [65] J.-M. Henault et al. »Truly Distributed Optical Fiber Sensors for Structural Health Monitoring: From the Telecommunication Optical Fiber Drawling Tower to Water Leakage Detection in Dikes and Concrete Structure Strain Monitoring«. In: *Advances in Civil Engineering* 2010 (2010), S. 1–13. DOI: 10.1155/2010/930796.
- [66] S.-C. Her und C.-Y. Huang. »Effect of Coating on the Strain Transfer of Optical Fiber Sensors«. In: *Sensors* 11.7 (Juli 2011), S. 6926–6941. DOI: 10.3390/s110706926.

- [67] J. Hoffmann. *Taschenbuch der Messtechnik*. Hanser Fachbuchverlag, 3. Sep. 2015. 685 S. ISBN: 3446442715. URL: https://www.ebook.de/de/product/24113105/taschenbuch_der_messtechnik.html.
- [68] T. Horiguchi et al. »Development of a distributed sensing technique using Brillouin scattering«. In: *Journal of Lightwave Technology* 13.7 (Juli 1995), S. 1296–1302. DOI: 10.1109/50.400684.
- [69] N. A. Hoult, O. Ekim und R. Regier. »Damage/Deterioration Detection for Steel Structures Using Distributed Fiber Optic Strain Sensors«. In: *Journal of Engineering Mechanics* 140.12 (Dez. 2014), S. 04014097. DOI: 10.1061/(asce)em.1943-7889.0000812.
- [70] R. Hui und M. O’Sullivan. *Fiber Optic Measurement Techniques*. Elsevier Science, 2009. ISBN: 9780080920436. URL: <https://books.google.de/books?id=4Ga2ioaf48cC>.
- [71] D. Inaudi und B. Glisic. »Application of distributed fiber optic sensory for SHM«. In: *Proceedings of the ISHMII-2 1* (2005), S. 163–169.
- [72] G. Kaliske. »Zu Problemen der Oberflächenvorbehandlung metallischer Füge-teile in der Klebtechnik unter besonderer Berücksichtigung der mechanischen Vorbehandlung«. In: *Plaste u. Kautsch* 18 (1971), S. 446–452.
- [73] R. Kashyap. *Fiber Bragg Gratings*. Optics and Photonics. Elsevier Science, 2009. ISBN: 9780080919911. URL: <https://books.google.de/books?id=qTWe5aHi8d0C>.
- [74] S. Keil. *Dehnungsmessstreifen*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017. DOI: 10.1007/978-3-658-13612-3.
- [75] H. Kollek und C. Matz. »Die Adhäsion chemisch betrachtet«. In: *Fertigungssystem Kleben ’89*. Fachtagung Fertigungssystem Kleben (1989). Hrsg. von A. Groß, W. Brockmann und R. Henkhaus. Deutsche Gesellschaft für Chemisches Apparatewesen, Chemische Technik und Biotechnologie e.V. -DECHEMA-. Bremen: VCH Verlagsgesellschaft, 1989, S. 3–13.
- [76] H. Kollek. *Reinigen und Vorbehandeln : Erfolgsgrundlage für Lackierprozesse*. Hannover: Vincentz, 1996. ISBN: 9783878704348.
- [77] G. Kötting. »Untersuchung der Klebschichtmorphologie und der beanspruchungs-abhängigen Deformations-und Versagensmechanismen in der Klebfuge von Metall-klebverbindungen«. Diss. Universität Paderborn, 1984.

- [78] R. Krüger. »Haftungsbestimmende Einflußgrößen beim Lackieren und Kleben von Thermoplasten«. Diss. RWTH Aachen, 1980.
- [79] C. K. Y. Leung et al. »Review: optical fiber sensors for civil engineering applications«. In: *Materials and Structures* 48.4 (Nov. 2013), S. 871–906. DOI: 10.1617/s11527-013-0201-7.
- [80] H.-N. Li et al. »Strain Transfer Coefficient Analyses for Embedded Fiber Bragg Grating Sensors in Different Host Materials«. In: *Journal of Engineering Mechanics* 135.12 (Dez. 2009), S. 1343–1353. DOI: 10.1061/(asce)0733-9399(2009)135:12(1343).
- [81] Q. Li, G. Li und G. Wang. »Effect of the plastic coating on strain measurement of concrete by fiber optic sensor«. In: *Measurement* 34.3 (Okt. 2003), S. 215–227. DOI: 10.1016/s0263-2241(03)00052-6.
- [82] Q. Li et al. »Elasto-Plastic Bonding of Embedded Optical Fiber Sensors in Concrete«. In: *Journal of Engineering Mechanics* 128.4 (Apr. 2002), S. 471–478. DOI: 10.1061/(asce)0733-9399(2002)128:4(471).
- [83] H.-U. Litzner. *Beton-Kalender. Grundlagen der Bemessung nach Eurocode 2 - Vergleich mit DIN 1045 und DIN 4227*. 1995. Kap. M.
- [84] J. M. López-Higuera et al. »Fiber optic sensors in structural health monitoring«. In: *Journal of lightwave technology* 29.4 (2011), S. 587–608.
- [85] K. Loupos und A. Amditis. »Structural Health Monitoring Fiber Optic Sensors«. In: *Smart Sensors, Measurement and Instrumentation*. Springer International Publishing, Nov. 2016, S. 185–206. DOI: 10.1007/978-3-319-42625-9_9.
- [86] H. Lucke. *Kunststoffe und ihre Verklebung*. Brunke Garrels, 1967.
- [87] Luna Inc. *ODiSI Fiber Optic Sensor Installation Guide*. 2017. URL: https://lunainc.com/wp-content/uploads/2017/01/TN_Applying-Strain-Sensors_RevB_v1.pdf.
- [88] Luna Inc. *ODiSi-B Datasheet*. 2. Feb. 2017. URL: https://lunainc.com/wp-content/uploads/2016/07/ODB5_DataSheet_Rev13_020217.pdf (besucht am 11. 11. 2019).
- [89] M. Majumder et al. »Fibre Bragg gratings in structural health monitoring—Present status and applications«. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 147.1 (Sep. 2008), S. 150–164. DOI: 10.1016/j.sna.2008.04.008.
- [90] H. Mang und G. Hofstetter. *Festigkeitslehre*. Springer Vienna, 2000. DOI: 10.1007/978-3-7091-3761-1.

-
- [91] Marston-Domsel GmbH. *Technical data sheet MS MEGABOND 2000*. 2016. URL: http://www.marstondomsel.de/images/downloads/TDB_DE_GB/GB_TDB_MD_MMB2000_Megabond.pdf (besucht am 02.03.2020).
- [92] A. Méndez. *Specialty optical fibers handbook*. Amsterdam Boston: Academic Press, 2007. ISBN: 9780123694065.
- [93] M. Michel. »Kriterien zur Klebstoffauswahl«. In: *TUB-Dokumentation Kongresse und Tagungen* 21 (1984).
- [94] Y. P. Michel et al. »Mechanical Characterisation of the Four Most Used Coating Materials for Optical Fibres«. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology*. SCITEPRESS - Science, 2015. DOI: 10.5220/0005336700960102.
- [95] Micro-Measurements. *Surface Preparation for Strain Gage Bonding. Instruction Bulletin B-129-8*. 19. Nov. 2011. URL: http://www.vishaypg.com/docs/11129/11129_b1.pdf.
- [96] Micro-Measurements. *DMS-Installation mit dem Schnellklebstoff M-Bond 200. Instruction Bulletin B-127-14*. 31. März 2010. URL: https://www.me-systeme.de/produkte/dehnungsmessstreifen/dms-zubehoer/dms-klebstoffe/Anleitungen_DE/M_Bond_200_Anleitung_B-127-14_DE.pdf.
- [97] F. Mitschke. *Glasfasern: Physik und Technologie*. Spektrum Akademischer Verlag, 2005. ISBN: 9783827416292. URL: <https://books.google.de/books?id=ZUJoAAAACAAJ>.
- [98] A. Momber und R.-R. Schulz. *Handbuch der Oberflächenbearbeitung Beton*. Birkhäuser Basel, 2006. DOI: 10.1007/3-7643-7373-3.
- [99] W.-D. Muschard. »Festigkeitsverhalten und Gestaltung geklebter und schrumpfgeklebter Wellen-Naben-Verbindungen«. Diss. Paderborn, Univ., Diss., 1983. URL: <https://www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT%3A024627607>.
- [100] J. Nakayama, K. Iizuka und J. Nielsen. »Optical fiber fault locator by the step frequency method«. In: *Applied Optics* 26.3 (Feb. 1987), S. 440. DOI: 10.1364/ao.26.000440.
- [101] A. Nanni et al. »Fiber-optic sensors for concrete strain/stress measurement«. English. In: *ACI Materials Journal* 88.3 (Mai 1991), S. 257–264. ISSN: 0889-325X.
- [102] M. Naumann. *Meß- und Prüftechnik*. Vieweg + Teubner Verlag, 1974. DOI: 10.1007/978-3-663-06862-4.
-

- [103] T. Neeb. »Adhäsionsmechanismen an mechanisch vorbehandelten Metalloberflächen«. Diss. Kaiserslautern, 2000. ISBN: 9783925178436.
- [104] H. Ohno et al. »Industrial Applications of the BOTDR Optical Fiber Strain Sensor«. In: *Optical Fiber Technology* 7.1 (Jan. 2001), S. 45–64. DOI: 10.1006/ofte.2000.0344.
- [105] Y. E. Pak. »Longitudinal shear transfer in fiber optic sensors«. In: *Smart Materials and Structures* 1.1 (März 1992), S. 57–62. DOI: 10.1088/0964-1726/1/1/008.
- [106] T. R. Parker et al. »A fully distributed simultaneous strain and temperature sensor using spontaneous Brillouin backscatter«. In: *IEEE Photonics Technology Letters* 9.7 (Juli 1997), S. 979–981. DOI: 10.1109/68.593372.
- [107] J. Pietschmann. »Oberflächenvorbehandlung von Metallen«. In: *Industrielle Pulverbeschichtung*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013, S. 209–294. DOI: 10.1007/978-3-8348-2585-8_5.
- [108] M. Pomykala. *New Highly Flexible Cyanoacrylates: LOCTITE® 4902TM and LOCTITE® 4903TM*. 2015. URL: https://www.ellsworth.com/globalassets/literature-library/manufacturer/henkel-loctite/henkel-loctite-white-paper_flexible-cyanoacrylates-loctite-4902-and-4903.pdf (besucht am 02.03.2020).
- [109] M. Quiertant et al. »Deformation Monitoring of Reinforcement Bars with a Distributed Fiber Optic Sensor for the SHM of Reinforced Concrete Structures«. In: *NDE* 2012 (Mai 2012).
- [110] R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH. *Verarbeitungshinweise Harzsysteme*. 2018. URL: http://www.ezentrumbilder.de/rg/pdf/td_de_Verarbeitungshinweise%20Harze.pdf.
- [111] R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH. *Vergleichsdaten Epoxydharzsysteme*. 12. Feb. 2019. URL: https://www.r-g.de/wiki/Vergleichsdaten_Epoxydharzsysteme (besucht am 16.05.2019).
- [112] M. Rasche. *Handbuch Klebtechnik*. Hanser Fachbuchverlag, 1. Sep. 2012. ISBN: 3446424024. URL: https://www.ebook.de/de/product/11300040/manfred_rasche_handbuch_klebtechnik.html.
- [113] J. F. K. Rausch. *Entwicklung und Anwendung miniaturisierter piezoresistiver Dehnungsmesselemente*. EMK-Dissertationsreihe Bd. 25. [Darmstadt, TU, Dissertation, 2012] Druckausg.: München: Verl. Dr. Hut, 2012, ISBN 978-3-8439-0553-4. Darmstadt: TU Darmstadt, Inst. für Elektromechan. Konstruktionen, Juli 2012. URL: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/3003/>.

- [114] G. Rodriguez et al. »Monitoring of shear cracking in partially prestressed concrete beams by distributed optical fiber sensors«. In: (2016).
- [115] A. Rudolf et al. »Korrosion an geklebten Aluminiumwerkstoffen«. In: *adhäsion KLEBEN & DICHTEN* 47.3 (2003), S. 40–44.
- [116] D. Samiec. »Verteilte faseroptische Temperatur-und Dehnungsmessung mit sehr hoher Ortsauflösung«. In: *Photonik* 6.2011 (2011), S. 34–37.
- [117] H. Schaumburg. *Sensoren*. Vieweg+Teubner Verlag, 1992. DOI: 10.1007/978-3-322-99927-6.
- [118] C. Schilder et al. »Structural health monitoring of composite structures by distributed fibre optic sensors«. In: *Proceedings of the 5th International Symposium on NDT in Aerospace, Singapore, Republic of Singapore*. 2013, S. 13–15.
- [119] V. G. Schlüter. »Entwicklung eines experimentell gestützten Bewertungsverfahrens zur Optimierung und Charakterisierung der Dehnungsübertragung oberflächenapplizierter Faser-Bragg-Gitter-Sensoren«. Diss. Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), 2010.
- [120] G. Schmidt-Thrö, W. Scheufler und O. Fischer. »Kontinuierliche faseroptische Dehnungsmessung im Stahlbetonbau«. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 111.8 (Aug. 2016), S. 496–504. DOI: 10.1002/best.201600026.
- [121] M. Schuth und W. Buerakov. *Handbuch Optische Messtechnik*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, Sep. 2017. DOI: 10.3139/9783446436619.
- [122] Sika Schweiz AG. *Produktdatenblatt Sikadur®-330: 2-Komponentiger, Thixotroper Epoxidharzkleber*. 2018. URL: https://che.sika.com/dms/getdocument.get/6c0c08f7-84ad-3c9f-956a-6a347bc03e0d/PDS_Sikadur-330_DECH.pdf.
- [123] A. Skontorp, K. Levin und M. Benmoussa. »Surface-mounted optical strain sensors for structural health monitoring of composite structures«. In: *Proceedings of the 16th Annual Technical Conference of the American Society for Composites*. Blacksburg, VA, USA, 2001, S. 970–982.
- [124] B. J. Soller et al. »High resolution optical frequency domain reflectometry for characterization of components and assemblies«. In: *Optics Express* 13.2 (2005), S. 666. DOI: 10.1364/opex.13.000666.
- [125] K. Y. Song et al. »Time-Domain Distributed Fiber Sensor With 1 cm Spatial Resolution Based on Brillouin Dynamic Grating«. In: *Journal of Lightwave Technology* 28.14 (Juli 2010), S. 2062–2067. DOI: 10.1109/JLT.2010.2050763.

- [126] K. Speck et al. »Faseroptische Sensoren zur kontinuierlichen Dehnungsmessung im Beton«. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 114.3 (Jan. 2019), S. 160–167. DOI: 10.1002/best.201800105.
- [127] M. Stelter. *Untersuchung des Dehnungsübertragungsverhaltens geklebter faseroptischer Sensoren*. GRIN Verlag, 3. Nov. 2005. 54 S. URL: https://www.ebook.de/de/product/16173231/marcus_stelter_untersuchung_des_dehnungsuebertragungsverhaltens_geklebter_faseroptischer_sensoren.html.
- [128] E. Udd. *Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists*. Wiley-Blackwell, 5. Aug. 2011. 512 S. ISBN: 0470126841. URL: https://www.ebook.de/de/product/13230722/eric_udd_fiber_optic_sensors.html.
- [129] S. Villalba und J. R. Casas. »Application of optical fiber distributed sensing to health monitoring of concrete structures«. In: *Mechanical Systems and Signal Processing* 39.1-2 (Aug. 2013), S. 441–451. DOI: 10.1016/j.ymssp.2012.01.027.
- [130] M. Weisbrich und K. Holschemacher. »Comparison between different fiber coatings and adhesives on steel surfaces for distributed optical strain measurements based on Rayleigh backscattering«. In: *Journal of Sensors and Sensor Systems* 7.2 (Nov. 2018), S. 601–608. DOI: 10.5194/jsss-7-601-2018.
- [131] M. Weisbrich, K. Holschemacher und T. Bier. »Comparison of different fiber coatings for distributed strain measurement in cementitious matrices«. In: *Journal of Sensors and Sensor Systems* 9.2 (Juli 2020), S. 189–197. DOI: 10.5194/jsss-9-189-2020.
- [132] M. Weisbrich, K. Holschemacher und S. Kaeseberg. »Comparison between different Fiber Optical Strain Measurement Systems Based on the Example of Reinforcing Bars«. In: *Procedia Engineering* 172 (2017), S. 1235–1242. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.145.
- [133] B. Weisz und LOCTITE-Deutschland-GmbH. *Der Loctite: Ausgabe 1992/93*. Loctite Deutschland GmbH, 1992. URL: <https://books.google.de/books?id=jLHBngEACAAJ>.
- [134] L. Yuan und L. Zhou. »Sensitivity coefficient evaluation of an embedded fiber-optic strain sensor«. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 69.1 (Juni 1998), S. 5–11. DOI: 10.1016/S0924-4247(97)01742-1.

- [135] X. Zeng et al. »Strain measurement in a concrete beam by use of the Brillouin-scattering-based distributed fiber sensor with single-mode fibers embedded in glass fiber reinforced polymer rods and bonded to steel reinforcing bars«. In: *Applied Optics* 41.24 (Aug. 2002), S. 5105. DOI: 10.1364/ao.41.005105.

A Applikation auf der Stahloberfläche

Tabelle A.1: Mittelwerte der Zeilenvektoren der Acrylatfasern, getrennt nach Klebstoff und Lastschritt (VSt)

Nr.	LS	MB	HY	EA	Z70	MD	L
A1	1	457	458	458	457	460	450
	2	921	919	924	921	923	909
	3	1383	1379	1386	1387	1389	1365
A2	1	461	457	498	457	468	458
	2	921	913	997	916	934	916
	3	1376	1363	1487	1365	1391	1369
A4	1	475	475	491	467	479	463
	2	946	949	983	938	960	928
	3	1421	1422	1476	1408	1444	1394

Tabelle A.2: Mittelwerte der Zeilenvektoren der Polyimidfasern, getrennt nach Klebstoff und Lastschritt (VSt)

Nr.	LS	MB	HY	EA	Z70	MD	L
P1	1	519	523	522	522	530	522
	2	1052	1056	1061	1067	1065	1052
	3	1585	1596	1591	1597	1593	1582
P2	1	496	499	500	499	504	498
	2	1022	1025	1029	1029	1032	1025
	3	1549	1555	1557	1555	1564	1549
P3	1	529	532	534	530	538	533
	2	1059	1064	1067	1066	1068	1059
	3	1587	1591	1601	1615	1612	1593
P4	1	542	544	543	530	542	544
	2	1088	1089	1090	1076	1092	1086
	3	1632	1630	1637	1622	1643	1629

Tabelle A.3: Mittelwerte der Zeilenvektoren der Ormocer[®]-Fasern, getrennt nach Klebstoff und Lastschritt (VSt)

Nr.	LS	MB	HY	EA	Z70	MD	L
O1	1	530	528	526	529	535	532
	2	1056	1057	1055	1050	1054	1052
	3	1582	1583	1580	1571	1586	1576
O2	1	521	525	519	520	519	522
	2	1042	1048	1038	1038	1041	1043
	3	1559	1566	1557	1556	1559	1558
O3	1	533	536	534	535	532	532
	2	1066	1072	1070	1065	1068	1068
	3	1600	1608	1604	1596	1606	1595
O4	1	537	540	536	538	538	536
	2	1074	1077	1074	1072	1076	1072
	3	1607	1614	1608	1607	1613	1609

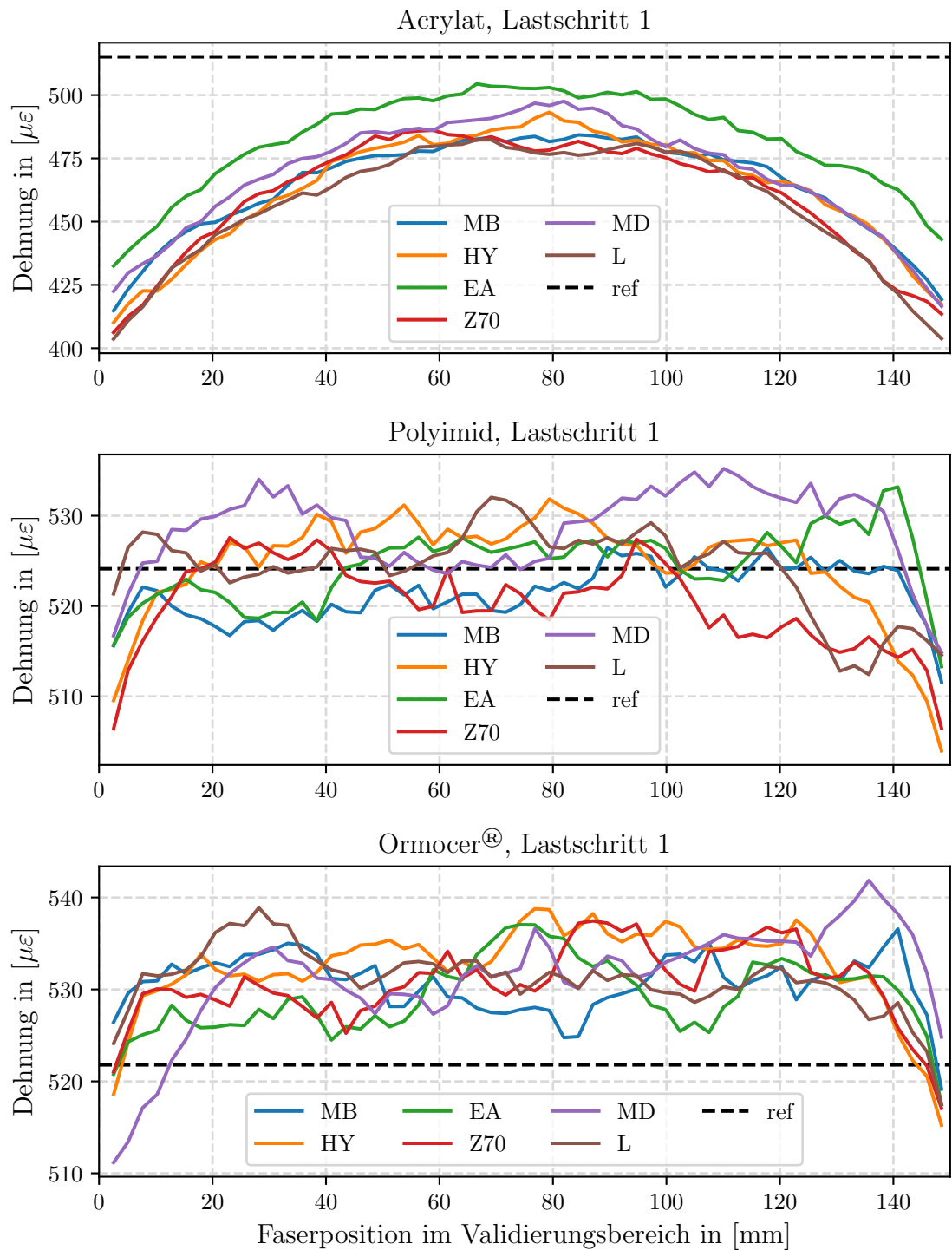


Abbildung A.1: Vergleich der mittleren Dehnungskurven der einzelnen Klebstoffe und der dazugehörigen Vergleichsmessung im Lastschritt 1 (VSt)

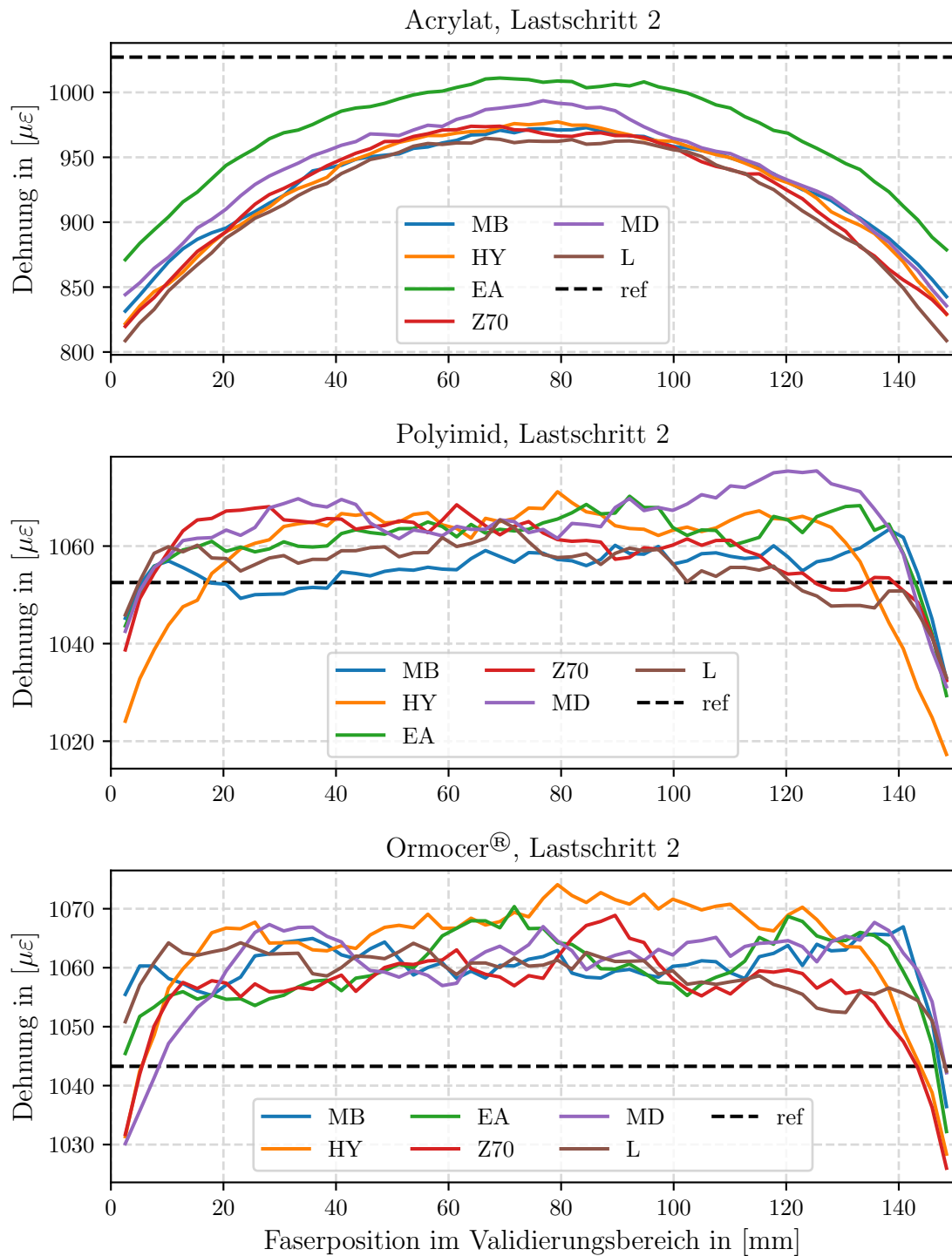


Abbildung A.2: Vergleich der mittleren Dehnungskurven der einzelnen Klebstoffe und der dazugehörigen Vergleichsmessung im Lastschritt 2 (VSt)

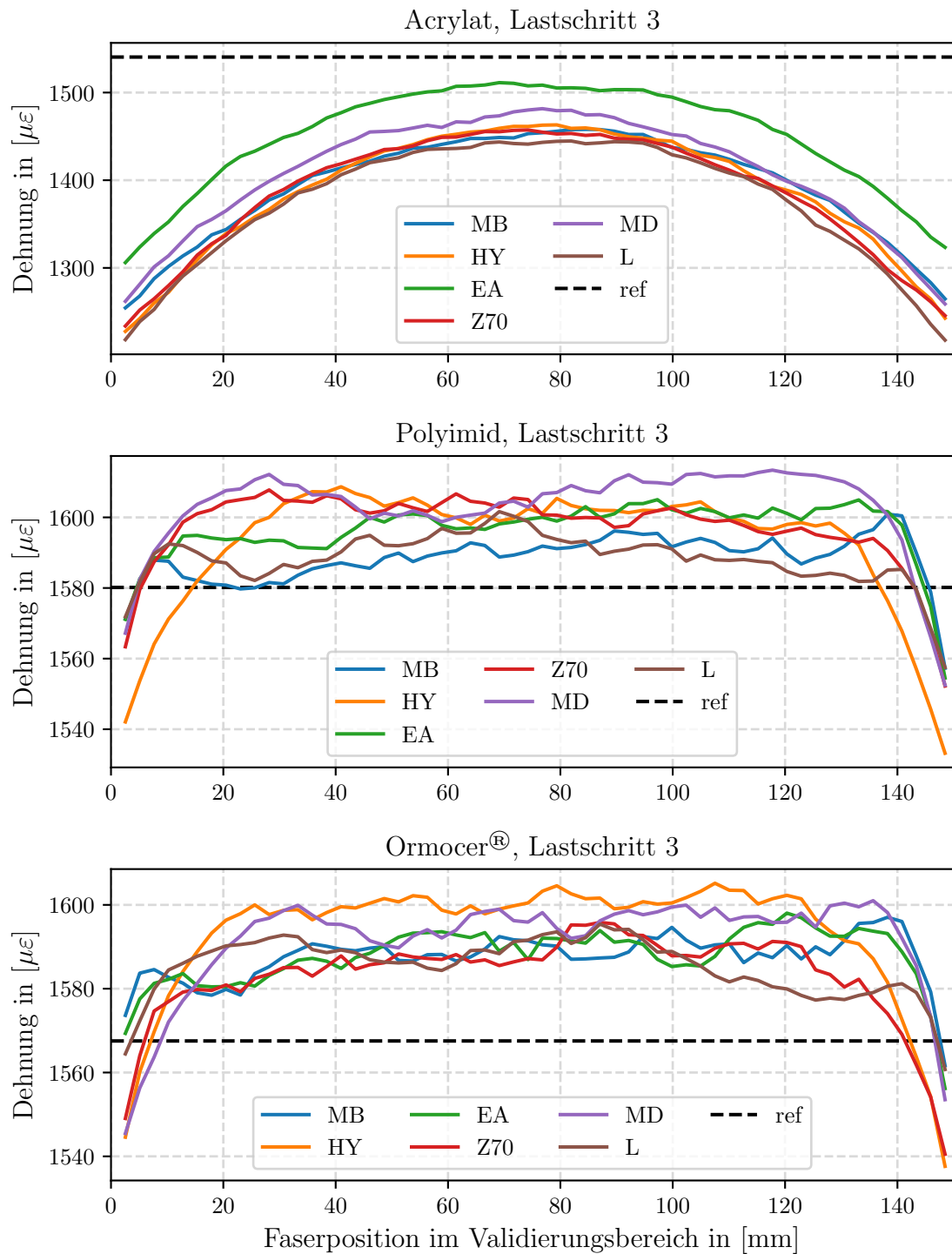


Abbildung A.3: Vergleich der mittleren Dehnungskurven der einzelnen Klebstoffe und der dazugehörigen Vergleichsmessung im Lastschritt 3 (VSt)

Tabelle A.4: Einzelwerte der Dehnungsquotienten der Acrylatfasern, getrennt nach Klebstoff und Lastschritt (VSt)

Nr.	LS	MB	HY	EA	Z70	MD	L
A1	1	0.867	0.868	0.868	0.867	0.872	0.854
	2	0.873	0.870	0.875	0.872	0.874	0.861
	3	0.878	0.876	0.880	0.880	0.882	0.866
A2	1	0.940	0.931	1.016	0.932	0.954	0.935
	2	0.932	0.924	1.009	0.927	0.945	0.927
	3	0.916	0.908	0.990	0.910	0.927	0.912
A4	1	0.900	0.901	0.931	0.886	0.909	0.878
	2	0.912	0.915	0.948	0.904	0.925	0.894
	3	0.920	0.921	0.956	0.911	0.935	0.902

Tabelle A.5: Einzelwerte der Dehnungsquotienten der Polyimidfasern, getrennt nach Klebstoff und Lastschritt (VSt)

Nr.	LS	MB	HY	EA	Z70	MD	L
P1	1	1.037	1.045	1.043	1.043	1.060	1.043
	2	1.035	1.039	1.044	1.050	1.048	1.036
	3	1.026	1.033	1.030	1.034	1.032	1.025
P2	1	0.991	0.998	0.999	0.998	1.006	0.996
	2	1.000	1.003	1.006	1.007	1.010	1.003
	3	1.005	1.008	1.010	1.009	1.015	1.005
P3	1	0.981	0.985	0.989	0.982	0.996	0.987
	2	0.990	0.996	0.998	0.997	0.999	0.991
	3	0.997	1.000	1.006	1.015	1.013	1.001
P4	1	0.975	0.980	0.976	0.953	0.975	0.978
	2	0.987	0.987	0.988	0.975	0.990	0.985
	3	0.993	0.992	0.996	0.987	0.999	0.991

Tabelle A.6: Einzelwerte der Dehnungsquotienten der Ormocer® Fasern, getrennt nach Klebstoff und Lastschritt (VSt)

Nr.	LS	MB	HY	EA	Z70	MD	L
O1	1	1.008	1.005	1.001	1.007	1.018	1.012
	2	1.012	1.013	1.011	1.006	1.010	1.008
	3	1.008	1.008	1.006	1.000	1.010	1.004
O2	1	1.033	1.041	1.028	1.030	1.028	1.034
	2	1.032	1.037	1.027	1.028	1.030	1.032
	3	1.029	1.034	1.028	1.027	1.029	1.029
O3	1	1.036	1.041	1.039	1.039	1.034	1.035
	2	1.023	1.028	1.026	1.021	1.024	1.025
	3	1.017	1.022	1.020	1.015	1.021	1.014
O4	1	0.992	0.998	0.991	0.994	0.994	0.992
	2	0.999	1.002	0.999	0.997	1.001	0.997
	3	0.998	1.003	0.999	0.999	1.003	1.000

Tabelle A.7: Standardabweichung der Zeilenvektoren der Acrylatfasern, getrennt nach Klebstoff und Lastschritt (VSt)

Nr.	LS	MB	HY	EA	Z70	MD	L
A1	1	22	24	24	23	21	23
	2	44	47	49	45	47	49
	3	65	75	71	68	70	70
A2	1	17	25	16	23	24	26
	2	38	50	36	48	46	51
	3	56	72	54	69	67	73
A4	1	18	20	18	23	20	22
	2	36	40	36	45	42	44
	3	56	61	55	66	59	65

Tabelle A.8: Standardabweichung der Zeilenvektoren der Polyimidfasern, getrennt nach Klebstoff und Lastschritt (VSt)

Nr.	LS	MB	HY	EA	Z70	MD	L
P1	1	4	9	3	6	5	7
	2	6	17	8	8	10	6
	3	8	22	9	12	13	7
P2	1	5	7	7	7	8	6
	2	6	12	6	7	9	7
	3	8	17	8	11	11	11
P3	1	5	7	7	10	7	5
	2	8	15	10	13	10	7
	3	8	18	11	14	15	10
P4	1	4	6	5	5	7	6
	2	6	10	6	6	9	5
	3	8	15	9	10	14	7

Tabelle A.9: Standardabweichung der Zeilenvektoren der Ormocer[®]-Fasern, getrennt nach Klebstoff und Lastschritt (VSt)

Nr.	LS	MB	HY	EA	Z70	MD	L
O1	1	5	3	6	6	7	7
	2	7	6	10	9	9	6
	3	9	11	11	12	11	10
O2	1	7	10	10	6	10	5
	2	8	14	13	7	11	8
	3	9	19	12	10	19	8
O3	1	3	6	3	9	6	5
	2	4	12	4	12	7	8
	3	6	16	6	17	13	10
O4	1	4	4	5	5	6	4
	2	6	9	7	8	8	5
	3	8	15	7	12	8	6

B Applikation auf der Betonoberfläche

Tabelle B.1: Nulllängen der Vergleichsmesstechnik in [mm] (VBe)

Nr.	IWA 1	IWA 2	IWA 3	IWA 4
A1	108,65	55,10	105,30	106,95
SA2	104,60	55,00	104,75	103,85
EA3	107,20	57,50	106,80	108,45
A2	108,10	54,50	109,05	109,10
SA2	111,60	58,70	109,60	108,50
EA2	107,30	59,00	104,80	105,10
A3	109,25	59,90	109,30	109,15
SA3	107,50	58,90	109,10	108,25
EA3	110,20	57,80	110,25	110,80
P1	103,90	54,50	104,85	104,90
SP1	104,70	55,60	105,85	105,70
EP1	102,55	53,35	105,60	105,90
P2	112,90	59,80	111,20	111,35
SP2	104,20	56,10	106,80	107,10
EP2	108,70	56,10	109,70	110,90
P3	104,00	55,30	104,55	104,60
SP3	110,75	61,15	109,75	109,70
EP3	111,80	58,55	111,80	111,40
O1	109,60	59,40	110,90	109,90
SO1	102,45	53,00	103,25	104,15
EO1	105,85	56,25	105,75	106,35
O2	112,10	58,80	113,10	112,45
SO2	107,50	59,35	107,90	109,25
EO2	109,65	56,50	108,70	108,40
O3	108,80	58,00	106,80	108,10
SO3	101,70	53,30	102,10	102,40
EO3	108,20	58,80	108,80	110,35

Tabelle B.2: Einzelwerte der Dehnungsquotienten der Acrylatfasern, getrennt nach Klebstoff, Grundierung und Lastschritt (VBe)

Nr.	LS	MB	HY	EA	Z70	MD	L
A1	1	0.77	0.63	0.62	0.68	0.65	0.73
	2	0.78	0.65	0.63	0.70	0.66	0.75
	3	0.79	0.66	0.63	0.71	0.67	0.76
SA1	1	0.88	0.70	0.80	0.77	0.71	0.68
	2	0.82	0.68	0.73	0.77	0.73	0.71
	3	0.80	0.68	0.71	0.78	0.74	0.72
EA1	1	0.74	0.68	0.68	0.78	0.70	0.69
	2	0.74	0.66	0.65	0.78	0.70	0.71
	3	0.74	0.66	0.64	0.79	0.70	0.72
A2	1	0.64	0.66	0.57	0.80	0.64	0.69
	2	0.66	0.66	0.58	0.80	0.66	0.69
	3	0.68	0.67	0.59	0.80	0.66	0.69
SA2	1	0.82	0.74	0.72	0.75	0.70	0.69
	2	0.82	0.72	0.70	0.77	0.71	0.72
	3	0.83	0.72	0.69	0.78	0.72	0.74
EA2	1	0.82	0.72	0.76	0.72	0.71	0.70
	2	0.81	0.70	0.72	0.72	0.72	0.71
	3	0.80	0.70	0.71	0.73	0.72	0.72
A3	1	0.64	0.61	0.63	0.74	0.67	0.68
	2	0.67	0.62	0.63	0.74	0.69	0.70
	3	0.68	0.63	0.64	0.74	0.70	0.71
SA3	1	0.88	0.71	0.75	0.87	0.71	0.67
	2	0.83	0.69	0.69	0.85	0.73	0.70
	3	0.82	0.69	0.68	0.84	0.74	0.72
EA3	1	0.65	0.76	0.77	0.77	0.77	0.72
	2	0.69	0.75	0.76	0.78	0.77	0.75
	3	0.71	0.75	0.75	0.78	0.78	0.76

Tabelle B.3: Einzelwerte der Dehnungsquotienten der Polyimidfasern, getrennt nach Klebstoff, Grundierung und Lastschritt (VBe)

Nr.	LS	MB	HY	EA	Z70	MD	L
P1	1	0.81	0.79	0.77	1.10	0.91	1.10
	2	0.82	0.79	0.67	0.97	0.89	0.98
	3	0.82	0.79	0.61	0.93	0.88	0.94
SP1	1	0.85	0.80	0.81	0.88	0.86	0.85
	2	0.86	0.81	0.82	0.88	0.87	0.85
	3	0.85	0.82	0.82	0.88	0.88	0.85
EP1	1	1.03	0.85	0.87	0.90	0.87	0.78
	2	0.94	0.82	0.79	0.89	0.87	0.81
	3	0.92	0.81	0.77	0.88	0.87	0.83
P2	1	0.94	0.85	0.82	0.95	0.93	0.92
	2	0.92	0.84	0.80	0.91	0.92	0.91
	3	0.91	0.84	0.79	0.91	0.91	0.91
SP2	1	0.97	0.86	0.80	0.83	0.81	0.80
	2	0.92	0.84	0.78	0.85	0.84	0.82
	3	0.90	0.83	0.78	0.86	0.85	0.83
EP2	1	1.01	0.85	0.86	1.05	0.96	0.94
	2	0.96	0.84	0.82	1.00	0.94	0.93
	3	0.94	0.85	0.81	0.97	0.94	0.93
P3	1	0.88	0.87	0.81	0.76	0.79	0.75
	2	0.88	0.83	0.77	0.82	0.82	0.78
	3	0.88	0.81	0.75	0.83	0.83	0.81
SP3	1	0.81	0.80	0.71	0.91	0.86	0.94
	2	0.84	0.81	0.74	0.90	0.87	0.91
	3	0.85	0.82	0.74	0.88	0.87	0.90
EP3	1	0.88	0.82	0.81	1.02	0.92	0.89
	2	0.89	0.82	0.80	0.95	0.91	0.89
	3	0.89	0.83	0.80	0.92	0.90	0.89

Tabelle B.4: Einzelwerte der Dehnungsquotienten der Ormocer®-Fasern, getrennt nach Klebstoff, Grundierung und Lastschritt (VBe)

Nr.	LS	MB	HY	EA	Z70	MD	L
O1	1	0.89	0.79	0.78	0.77	0.80	0.76
	2	0.84	0.77	0.72	0.79	0.82	0.80
	3	0.84	0.76	0.71	0.81	0.83	0.82
SO1	1	0.92	0.89	0.93	0.93	0.87	0.72
	2	0.89	0.85	0.85	0.90	0.87	0.78
	3	0.88	0.85	0.82	0.89	0.87	0.80
EO1	1	0.83	0.81	0.78	0.81	0.82	0.82
	2	0.86	0.80	0.76	0.83	0.84	0.84
	3	0.87	0.80	0.75	0.84	0.84	0.85
O2	1	0.97	0.85	0.85	0.96	0.89	0.85
	2	0.93	0.84	0.82	0.93	0.90	0.87
	3	0.93	0.84	0.80	0.92	0.90	0.87
SO2	1	1.01	0.84	0.95	0.79	0.82	0.80
	2	0.96	0.85	0.87	0.81	0.85	0.84
	3	0.95	0.84	0.84	0.83	0.86	0.86
EO2	1	0.90	0.83	0.84	0.95	0.90	0.89
	2	0.90	0.84	0.82	0.93	0.91	0.91
	3	0.91	0.84	0.81	0.91	0.91	0.91
O3	1	0.91	0.83	0.81	0.82	0.84	0.92
	2	0.89	0.83	0.79	0.83	0.86	0.91
	3	0.90	0.83	0.79	0.84	0.87	0.91
SO3	1	1.06	0.92	0.90	1.05	0.88	0.78
	2	1.01	0.90	0.84	0.99	0.89	0.83
	3	0.98	0.88	0.82	0.95	0.89	0.84
EO3	1	0.91	0.84	0.83	0.79	0.80	0.88
	2	0.90	0.83	0.80	0.82	0.83	0.88
	3	0.90	0.82	0.79	0.83	0.84	0.87

Tabelle B.5: Standardabweichung der Zeilenvektoren der Acrylatfasern, getrennt nach Klebstoff, Grundierung und Lastschritt (VBe)

Nr.	LS	MB	HY	EA	Z70	MD	L
A1	1	24	29	36	57	54	45
	2	60	70	47	107	103	85
	3	95	107	104	148	153	121
SA1	1	16	29	34	36	50	47
	2	40	68	68	52	86	92
	3	67	103	100	70	113	123
EA1	1	27	25	40	33	39	22
	2	64	62	83	52	76	51
	3	106	94	125	72	110	82
A2	1	48	48	50	22	43	42
	2	91	90	99	55	92	89
	3	128	131	142	90	142	142
SA2	1	14	22	30	38	34	31
	2	36	53	69	55	69	61
	3	63	87	110	80	105	94
EA2	1	26	28	24	36	43	35
	2	55	60	57	65	82	77
	3	84	94	85	95	125	120
A3	1	43	48	51	31	34	43
	2	88	95	96	54	78	79
	3	132	141	171	81	122	126
SA3	1	59	31	46	42	42	35
	2	71	68	83	67	74	70
	3	95	105	113	88	103	107
EA3	1	32	26	34	30	25	22
	2	76	55	69	60	54	54
	3	114	86	98	82	84	89

Tabelle B.6: Standardabweichung der Zeilenvektoren der Polyimidfasern, getrennt nach Klebstoff, Grundierung und Lastschritt(VBe)

Nr.	LS	MB	HY	EA	Z70	MD	L
P1	1	25	47	36	56	50	13
	2	39	64	252	55	55	18
	3	58	88	439	62	62	26
SP1	1	20	26	13	28	16	18
	2	34	40	20	37	26	31
	3	64	50	28	40	34	49
EP1	1	54	38	31	20	16	42
	2	65	47	32	28	16	40
	3	75	53	39	48	27	55
P2	1	13	23	8	9	18	16
	2	35	22	13	47	28	26
	3	51	28	27	61	42	34
SP2	1	70	76	35	12	31	71
	2	73	88	37	19	39	81
	3	90	106	47	28	49	81
EP2	1	34	22	14	23	29	9
	2	44	36	11	23	33	14
	3	59	50	26	32	45	20
P3	1	29	76	86	78	86	53
	2	45	105	101	94	104	73
	3	75	138	131	114	116	96
SP3	1	19	23	27	38	29	24
	2	22	29	32	38	32	27
	3	51	38	53	42	41	39
EP3	1	43	35	17	39	45	18
	2	48	43	24	53	52	25
	3	58	54	33	66	55	28

Tabelle B.7: Standardabweichung der Zeilenvektoren der Ormocer[®]-Fasern, getrennt nach Klebstoff, Grundierung und Lastschritt (VBe)

Nr.	LS	MB	HY	EA	Z70	MD	L
O1	1	40	26	11	33	23	25
	2	41	28	21	53	29	30
	3	47	35	37	83	35	37
SO1	1	39	24	35	34	10	27
	2	45	25	44	45	14	24
	3	51	34	62	59	20	32
EO1	1	10	18	21	26	11	9
	2	12	23	27	32	23	13
	3	19	29	42	33	31	31
O2	1	60	14	37	23	38	27
	2	70	30	54	32	45	21
	3	75	42	56	46	48	37
SO2	1	15	16	22	52	37	23
	2	16	22	33	59	52	35
	3	14	36	40	68	59	55
EO2	1	56	14	24	70	14	21
	2	67	18	34	84	18	33
	3	72	18	57	113	26	45
O3	1	56	64	79	71	52	41
	2	79	84	97	91	71	71
	3	100	106	114	107	100	95
SO3	1	72	37	22	49	17	29
	2	92	45	19	67	30	21
	3	93	48	27	64	41	22
EO3	1	30	54	44	61	67	47
	2	34	72	57	67	79	54
	3	31	88	71	81	101	64

C Integration in die Betonmatrix

Tabelle C.1: Einzelwerte der mittleren Dehnungen und Standardabweichungen aller Probekörper, getrennt nach Fasertyp und Messzeitpunkt (VMa)

Coating	Nr.	in [$\mu\epsilon$]			
		mittlere Dehnung		Standardabweichung	
		t_1	t_2	t_1	t_2
Acrylat	1	-583	-682	15	11
	2	-552	-662	26	28
	3	-523	-628	20	22
Polyimid	1	-580	-677	17	18
	2	-600	-710	14	14
	3	-549	-652	7	9
Ormocer [®]	1	-569	-682	20	19
	2	-585	-702	11	13
	3	-549	-662	23	25

Versicherung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskripts habe ich Unterstützungsleistungen von folgenden Personen erhalten:

- Prof. Dr.-Ing. Thomas A. Bier
- Prof. Dr.-Ing. Klaus Holschemacher

Weitere Personen waren an der Abfassung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Die Hilfe eines Promotionsberaters habe ich nicht in Anspruch genommen. Weitere Personen haben von mir keine geldwerten Leistungen für Arbeiten erhalten, die nicht als solche kenntlich gemacht worden sind.

Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Leipzig, den 03.11.2020

Martin Weisbrich