
REPORTS ON MEASUREMENT AND SENSOR SYSTEMS

Strukturüberwachung mittels eingebetteter
Faser-Bragg-Gitter

Klaus Weraneck



Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

Strukturüberwachung mittels eingebetteter Faser-Bragg-Gitter

Klaus Weraneck

Vollständiger Abdruck der von der
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktor – Ingenieurs genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Ralph Kennel

Prüfende/-r der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Alexander W. Koch
2. Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk

Die Dissertation wurde am 14.06.2017 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik am 21.11.2017 angenommen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Forschungsaufgabe	1
1.1.1	In-situ Dehnungsmessung beim Gießen von Aluminiumlegierungen	1
1.1.2	Erfassung von Materialdegradation in Naturstein	3
1.2	Gliederung der Arbeit	5
2	Theoretische Grundlagen	6
2.1	Stand der Technik	6
2.1.1	Überwachung von Materialspannungen in Gussbauteilen	6
2.1.2	Überwachung von Bauwerken	9
2.2	Strukturüberwachung	14
2.3	Faseroptische Sensorik	16
2.3.1	Aufbau und Eigenschaften	16
2.3.2	Faser-Bragg-Gitter-Typen	22
2.3.3	Nutzung von Faser-Bragg-Gittern als Sensoren	26
2.3.4	Verhalten von Faser-Bragg-Gittern unter Querbelastung	30
2.4	Materialspannungen in Aluminiumlegierungen	32
2.4.1	Entdeckung des Aluminiums als Gussmaterial	32
2.4.2	Geometrie der Gussform	33
2.4.3	Erstarrungsprozess der Schmelze	36
2.4.4	Eigenschaften der Aluminiumlegierung $AlSi_9Cu_3$	41
2.4.5	Arten von Eigenspannungen	43
2.5	Eigenschaften von Sandstein	46
2.5.1	Grundbegriffe	46
2.5.2	Zusammensetzung und Aufbau	48

2.5.3	Thermische Eigenschaften	52
2.5.4	Hygrische Eigenschaften	55
2.5.5	Verwitterungsschäden	58
3	Experimentelle Anordnung	60
3.1	Abguss der $AlSi_9Cu_3$ -Legierung	60
3.1.1	Versuchsaufbau	60
3.1.2	Einfluss der Gitterlänge	64
3.1.3	Matrix-Faser-Interaktion	66
3.2	Integration der Sensorik in Sandstein	69
3.2.1	Aufbau der Sensoranordnung	69
3.2.2	Versuchsaufbau	75
4	Messergebnisse	78
4.1	Temperaturkalibrierung der verwendeten FBGs	78
4.2	Dehnungen während des Erstarrungsvorgangs der $AlSi_9Cu_3$ -Legierung	86
4.2.1	Messergebnisse Typ-I-FBGs	86
4.2.2	Messergebnisse FS-FBGs	90
4.2.3	Diskussion	98
4.3	Dehnungen bei Belastung von Sandstein	99
4.3.1	Kalibrierung des Sensors unter thermischer und mechani- scher Belastung	100
4.3.2	Erfassung thermischer Belastung	105
4.3.3	Erfassung mechanischer Belastung	111
4.3.4	Erfassung hygrischer Belastung	115
4.3.5	Diskussion	117
5	Zusammenfassung und Ausblick	119
5.1	In-situ Dehnungsmessung beim Gießen von Aluminiumlegierungen	119
5.2	Erfassung von Materialdegradation in Naturstein	121
A	Anhang	123

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Forschungsaufgabe

Nachfolgend werden die Ziele der einzelnen Projekte vorgestellt. Beide Teile beinhalten die Untersuchung von Faser-Bragg-Gittern (FBGs) in Hinsicht auf deren Anwendbarkeit zur Strukturüberwachung bei rauen Umgebungsbedingungen.

1.1.1 In-situ Dehnungsmessung beim Gießen von Aluminiumlegierungen

Die Überwachung der Produktion von Bauteilen ist in den letzten Jahren immer wichtiger geworden. Im Bereich der Faserverbundwerkstoffe ist der Einsatz von Glasfasersensoren, besonders von FBGs, zur Strukturüberwachung derzeit Stand der Forschung. Die Erfassung von mechanischen Spannungen und von Temperaturen ist auch in anderen Bereichen, wie dem Gießereiwesen von Interesse, wobei hier vor allem der Abkühlprozess nach dem Guss im Vordergrund steht. Ein Einsatz von temperaturstabilen FBGs während des Abkühlvorgangs in Metallschmelzen könnte eine aufwendige Analyse mittels Neutronendiffraktometrie ersetzen. Die ermittelten Messdaten ermöglichen eine Aussage über Spannungen und Temperaturen im Material während des Abkühlvorgangs. In Vorversuchen konnte bereits gezeigt werden, dass solche Messungen prinzipiell möglich sind. Für eine verlässliche Messung mittels FBGs müssen jedoch noch adäquate Sensoren entwickelt und charakterisiert werden.

Ziel des Projektes ist die Entwicklung und der Einsatz eines faseroptischen Sensors

bis zu einer Temperatur von 800°C , um diesen erstmals in eine Aluminiumschmelze einzubetten. Als Grundlage für die Eingussversuche wurde die Form aus Abbildung 1.1 verwendet, da deren Verhalten während des Gusses bereits bekannt ist. Auf die Geometrie und den damit einhergehenden Erstarrungsprozess der Schmelze wird in in Kapitel 2 noch genauer eingegangen.

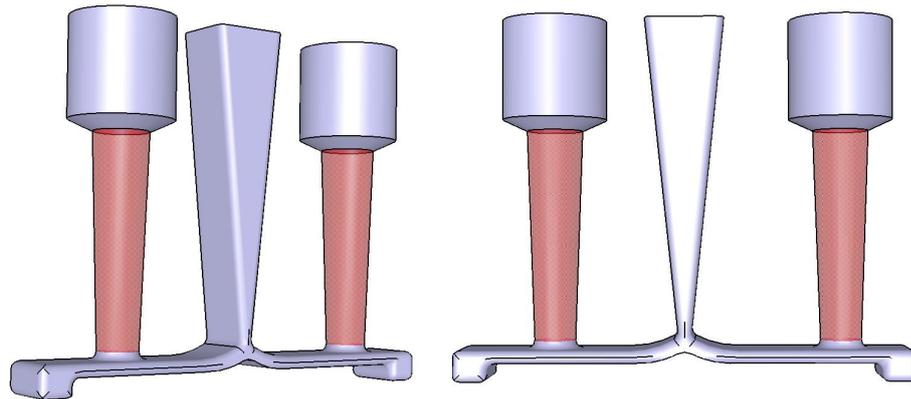


Abbildung 1.1: Verwendete Gussform zur Überprüfung der Dehnungen im Aluminiumguss.

Das eigentliche Nutzteil des Abgusses ist in der Abbildung 1.1 rot dargestellt und die restlichen Komponenten werden lediglich für den Gießprozess benötigt. Im ersten Schritt muss eine geeignete Positionierung und Befestigungsmethode der Glasfaser in der Gussform gefunden werden. Sie muss so gewählt werden, dass der Sensor durch das Eingießen und Abkühlen der Schmelze nicht beschädigt wird. Der Erstarrungsprozess der verwendeten Schmelze verursacht einen Materialschwund von ungefähr 1 %, wodurch sowohl Belastungen axial als auch radial zur Faser auftreten. Da Glasfasern bei Querbelastung weitaus fragiler sind als bei Längsdehnung, muss nach einer geeigneten Position der Faser gesucht werden, bei der die Faser weder während des Gießvorgangs noch während des Erstarrungsprozesses bricht. Die Glasfaser bildet im Gussbauteil einen Fremdkörper und somit eine Fehlstelle, die mittels Schliffbildern überprüft werden muss. Induziert die Sensorposition vermehrt Schwachstellen im Guss, so können die Ergebnisse in erheblichen Maß von

dem Original-Bauteil abweichen. In diesem Fall muss entweder der Sensoraufbau oder der Gießprozess verändert werden. Zuletzt wird der Einfluss der Temperatur auf den Sensor untersucht, da hohe Temperaturen zu einer Degradation des Sensors und einer Verfälschung der Messergebnisse führen können. Hierfür wird eine Fehlerabschätzung mittels Referenzmessungen mit alternativer Sensorik durchgeführt. Darüber hinaus wird ein weiterer Glasfasersensor verwendet, der sich durch seine Herstellung und seiner Spezifikation unterscheidet.

Das Ergebnis dieser Arbeit ist eine geeignete Positionierung, die sich für Langzeitmessungen in dem gezeigten Gussbauteil eignet. Zudem kann eine Aussage über die Eignung des eingebetteten Sensortyps getroffen werden.

1.1.2 Erfassung von Materialdegradation in Naturstein

Naturstein dient bei vielen neuen als auch antiken Gebäuden als Baumaterial. Jedoch beeinträchtigen physikalische, chemische und biologische Verwitterungsprozesse das Natursteingefüge. Insbesondere Feuchte- und Temperaturwechsel generieren Spannungen und Drücke im Gestein. Das hochfrequente Auftreten umweltbedingter Spannungen beansprucht das Gefüge trotz ihrer geringen Magnitude. Chemische Verwitterung, Materialauslösung und -umbildung im Gestein wird zusätzlich zur physikalischen Beanspruchung durch Feuchtigkeit, Salze, Schadstoffe und Mikroorganismen initiiert. Diese Verwitterung und die damit einhergehende Veränderungen der Materialeigenschaften trägt zu einer Spannungsänderung im Gestein bei, da sie punktuell die Festigkeit herabsetzt. Bedingt durch die Entstehungsgeschichte der Gesteine, sind stets Mikrorisse und Inhomogenitäten vorhanden. Aufgrund der permanenten Beanspruchung (Belastung und Entlastung) entstehen weitere Mikrorisse, die sich fortpflanzen, sich zu größeren Rissen verbinden und letztendlich zum Bruch des Festgesteins führen können.

Es besteht eine starke Interaktion zwischen den umweltbedingten Spannungen und der Verwitterung und es kann davon ausgegangen werden, dass das Ursachen - Wirkungsgefüge der Verwitterungsprozesse durch das Spannungssystem verstärkt wird bzw. positiv rückgekoppelt ist. Das Monitoring von Verwitterungsprozessen und Spannungszuständen im Gestein wird in der Forschung jedoch oft getrennt beobachtet. Bei subkritischer Risserweiterung und Verwitterung wird davon ausgegangen, dass eine graduelle Degradation der Festigkeit unter relativ geringer konstanter bzw. zyklischer Last stattfindet, die besonders sensibel auf Umwelteinflüsse wie

Feuchtigkeit reagiert. Für ein beschleunigtes Risswachstum wird das Zusammenwirken subkritischer Spannungen in einem korrosiven Milieu verantwortlich gemacht und in den Materialwissenschaften als Spannungskorrosion bezeichnet. In Kulturgütern aus Naturstein sowie Fassaden lassen sich die Bedingungen für Spannungskorrosion ubiquitär finden. Solche subkritischen Prozesse können somit die dominanten konditionierenden Prozesse darstellen, die die Gesteinsmassen degradieren und zum Versagen zentraler Kulturgüter führen. Ein Beispiel für ein solches Gebäude bietet die Lorenzkirche in Nürnberg aus Abbildung 1.2. Der Schadensbericht der betreuenden Architekten Conn und Giersch aus dem Jahr 2014 beschreibt erhebliche Rissbildung und Materialdegradation an der Burgsandsteinkirche. Aktuelle Messverfahren für Naturstein arbeiten oft destruktiv oder sind für eine kontinuierliche Messung vor Ort nicht geeignet, da die Umgebungsbedingungen zu widrig sind. Somit muss in regelmäßigen Abständen eine Befahrung des Gebäudes durchgeführt werden, um diese manuell zu besichtigen. Mit dieser Besichtigung gehen oft Sperrungen der Lorenzkirche und Kosten einher.



Abbildung 1.2: Die Lorenzkirche in Nürnberg zeigt vermehrt Risse und Beschädigungen in der Bausubstanz auf [1].

Kontinuierlich erfasste Messdaten würden helfen, die auftretenden Einflüsse genauer zu verstehen und das Schadensbild zu definieren. Beispiele für derartig auftretenden Einflüsse sind Frost-Tau-Zyklen, Sonneneinstrahlung, Temperaturzyklen

über den Tag usw.. Die faseroptische Messtechnik bietet eine Alternative zu den verwendeten Messmethoden, da sie resistent gegen viele der Einflüsse ist, die alternative Sensorik versagen lassen. Ziel dieser Arbeit ist die Anwendbarkeit der faseroptischen Messtechnik im Bereich der Gebäudeüberwachung am Beispiel der Lorenzkirche zu zeigen. Dafür wird ein Sensoraufbau angefertigt, der mit geringer Beeinflussung des Messobjekts eingebettet werden kann. Bei den zu testenden Einflüssen wird sich auf Temperaturzyklen, Feuchtigkeitstests und mechanische Beanspruchung beschränkt, weil viele Faktoren, wie Sonneneinstrahlung oder Pflanzenbefall, nicht unter Laborbedingungen nachgestellt werden können.

Das Ergebnis dieser Arbeit ist somit der Entwurf eines geeigneten Sensoraufbaus, der unter Laborbedingungen hinsichtlich Temperatur, Feuchtigkeit und mechanischer Belastung evaluiert werden soll.

1.2 Gliederung der Arbeit

Die beschriebenen Aufgabenstellungen werden in dieser Arbeit parallel abgearbeitet und somit ist jedes Kapitel zweigeteilt. Zu Beginn wird der Begriff Strukturüberwachung vorgestellt und auf die genaue Definition eingegangen. Im Anschluss wird der Einsatz von Strukturüberwachung in den beiden Forschungsgebieten vorgestellt und auf die aktuellen Messverfahren eingegangen. Darauf folgend werden die technischen Grundlagen für die beiden Projekte geschaffen. Die experimentellen Anordnungen für die durchgeführten Messungen werden im darauf folgendem Kapitel erläutert, beginnend mit der Anordnung für den Gießprozess bis hin zur Anbindung der Faser in der erstarrten Schmelze. Bei der Anordnung zur Messung in Sandstein wird explizit auf den Aufbau des Sensors, bestehend aus mehreren faseroptischen Sensoren, eingegangen, da hier der Schwerpunkt der Aufgabe liegt. Generell unterscheiden sich die beiden Lösungen hier stark, da die Faser im Gussbauteil direkt Kontakt mit dem Messobjekt hat und im Sandstein die Sensoranordnung so gewählt wurde, dass der Dehnungsaufnehmer das Messobjekt nicht direkt berührt.

Im Kapitel „Messergebnisse“ werden die Ergebnisse der beiden Teilprojekte vorgestellt. Abschließend werden die erzielten Ergebnisse zusammengefasst und jeweils ein Ausblick auf mögliche zukünftige Arbeiten gegeben.

Kapitel 2

Theoretische Grundlagen

Für die beiden betrachteten Problemstellungen werden sowohl die Grundlagen der Strukturüberwachung und der faseroptischen Sensorik benötigt. Somit wird auf diese Aspekte nach einem Überblick über den aktuellen Stand der Technik eingegangen. Abschließend werden zum einen die Grundlagen für die Messung in der Aluminiumschmelze und zum anderen in Sandstein erläutert.

2.1 Stand der Technik

In beiden Forschungsbereichen gibt es bereits Ansätze zur Strukturüberwachung, jedoch weist jeder spezifische Schwächen auf. Die folgenden Betrachtungen geben einen Überblick über den Stand der Technik.

2.1.1 Überwachung von Materialspannungen in Gussbauteilen

Aufgrund von Temperaturunterschieden bzw. -änderungen entstehen in Gussteilen Eigenspannungen, die als innere Belastungen zu verstehen sind und ohne das Vorhandensein äußerer Kräfte und Momente existieren [2]. Darüber hinaus befinden sich diese im inneren Gleichgewicht. Liegen in einem Bauteil unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten vor, so entstehen solche Eigenspannungen in hohem Maße. Als Beispiel hierfür kann als Verbundgussteil ein Aluminium-Motorblock mit eingegossenem Zylinderlaufbuchsen aus Grauguss genannt werden. Eigenspannungen beeinflussen die Lebensdauer und das Bauteilverhalten erheblich, weswegen die Kenntnis über das Zustandekommen und das Vorliegen die-

ser von großem Interesse ist. Zur Analyse von Eigenspannungen werden oftmals zerstörende Verfahren eingesetzt, bei denen das innere Gleichgewicht des Bauteils durch Materialabtrag mittels Sägen oder Bohren geändert wird. Dieser Materialabtrag führt zu Verformungen des Bauteils und somit zu einer Verfälschung der Eigenspannungsanalyse. Für die Erfassung der dabei auftretenden oberflächlichen Dehnungen können Dehnungsmessstreifen (DMS) eingesetzt werden [3]. Mittels den erfassten Dehnungen wird auf vormals vorliegenden Spannungen zurück gerechnet. Durch die Applikation der DMS an der Bauteiloberfläche ist eine Eigenspannungsanalyse im Inneren des Materials nur eingeschränkt bzw. gar nicht möglich.

Veränderungen der Gitterabstände können auch mit zerstörungsfreien Methoden wie der Röntgenbeugung oder Neutronendiffraktometrie untersucht werden [4, 5]. Bei der konventionellen Röntgenbeugung werden die Gitterparameter in verschiedenen Richtungen in einem oberflächlichen Bereich ermittelt. Es wird dabei angenommen, dass die Gitterdehnungen in Richtung der Oberflächennormalen wegen der geringen Eindringtiefe der Röntgenstrahlung nicht beachtet werden müssen. Auch bei der Neutronendiffraktometrie werden die Gitterebenenabstände in kristallinen Festkörpern analysiert. Über ein Blendensystem werden die Neutronen auf das zu messende Bauteil fokussiert. Diese werden an den Gitterebenen gebeugt und anschließend die Streuwinkel gemessen. Durch Korrelation der Wellenlänge der einfallenden Neutronen über die Bragg'sche Gleichung mit dem Streuwinkel können die Eigenspannungen bestimmt werden. Neben makroskopischen Untersuchungen wird vermehrt das Verhalten von Mikro eigenspannungen untersucht [6, 7]. In zahlreichen Untersuchungen stehen die Eigenspannungen durch unterschiedliche Fertigungsprozesse wie Gießen, Schweißen oder Oberflächenbehandlungen im Fokus [8, 9, 10, 11]. Neben physischen Tests wird auch der Ansatz der Simulation der Eigenspannungen, die während der Prozesse auftreten, verfolgt [12, 13]. Die Vorhersagegenauigkeit des simulativen Ansatzes muss jedoch noch verbessert werden, da noch Messdaten zu Validierung fehlen und dies vor allem bei temperaturabhängigen Verfahren wie dem Gießen [14, 15].

Für die genaue Bestimmung wird eine Messmethode benötigt, die es ermöglicht, in der erstarrten Schmelze zu messen und die das Bauteil nicht schädigt. Darüber hinaus ist ein Sensor erwünscht, der auch nach dem Produktionsprozess verwendet werden kann. Die zuvor vorgestellten Methoden erfüllen diese Kriterien

nur teilweise, weswegen faseroptische Sensoren für die Anwendung in diesem Bereich untersucht werden. Für den Einsatz von faseroptischen Sensoren bei hohen Temperaturen gibt es zahlreiche Ansätze zur Modifizierung der Sensoren. Die standardmäßig verwendeten FBGs werden Typ-I-FBGs genannt und basieren auf einem UV-Laser-Belichtungsverfahren. Jedoch zeigen diese Sensoren oberhalb von Temperaturen von 300 °C Degradationserscheinungen, weswegen sie nur eingeschränkt im Gießereiwesen eingesetzt werden können [16]. Für den Einsatz dort kommen Typ-II-Gitter oder regenerierte FBGs (RFBGs) in Betracht [17, 18]. Bei Typ-II-Gittern wird, im Gegensatz zu Typ-I, die Brechungsindexmodulation durch strukturelle Zerstörung der Glasfaser erzeugt, was sie bei weitem unempfindlicher gegenüber Degradationen bei hohen Temperaturen macht. RFBGs haben gegenüber Typ-II den Vorteil, dass mit ihnen ein Wellenlängenmultiplex möglich ist und geringere Diffusionserscheinungen auftreten [19, 20]. Mit RFBGs konnte bereits eine Langzeitstabilität von 5,4 pm über eine Messdauer von 1000 Stunden bei konstanten 650 °C erreicht werden, was einem Fehler bei der Umrechnung zur Temperatur von ca. 0,4 °C entsprechen würde [20]. Um RFBGs herzustellen, werden in meist wasserstoffbeladene Glasfasern Typ-I-Gitter eingeschrieben. Im Anschluss werden diese Sensoren mittels spezieller Temperaturbehandlung in RFBGs umgewandelt [18]. Jedoch sind die genauen Mechanismen zur Herstellung von RFBGs sowie deren thermischen, mechanischen und optischen Eigenschaften noch nicht genau verstanden. Eine mögliche Erklärung ist, dass es durch Diffusion des vorliegenden molekularen Wasserstoffs innerhalb der Glasfasermatrix zu einer periodischen Änderung der durch den Faserziehprozess vorliegenden faserinternen Spannungen kommt, insbesondere nahe der Kern-Mantel-Grenzschicht [21]. Bei Fasern ohne Wasserstoffbeladung kann mit dieser Theorie jedoch nicht die Entstehung der RFBGs erklärt werden. Bereits 2002 wurden erste Versuche zur Einbettung von FBGs zur Temperaturmessung in eine erstarrende Aluminiumschmelze durchgeführt [22]. Jedoch wurden hierbei keine Spannungen erfasst, die in der erstarrenden Schmelze auftreten. Ein erhebliches Problem bei dem Einsatz von RFBGs ist deren fragile Struktur. Während des Regenerierungsprozesses werden die RFBGs hohen Temperaturen ausgesetzt und somit wird die Glasfaser spröde. Bei dem Einsatz in erstarrenden Schmelzen kann die gestiegene Sprödigkeit zu einem Bruch der Faser führen.

Am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen (UTG) in Garching wur-

den in Zusammenarbeit mit der Forschungs-Neutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz (FRM) bereits durch Vorarbeiten umfangreiche Messungen mit konventionellen Methoden zur Entstehung und Ausprägung von Eigenspannungen in Gussteilen durchgeführt [23, 8]. Im Zuge dieser Untersuchung wurde ein Verbundbauteil während des Gießprozess und der Abkühlung mit Hilfe von Neutronenbeugung überwacht. Bereits hier zeigte sich, dass das Materialverhalten signifikant von der elastisch-plastischen Standard-Simulation abweicht. Für Prozesse mittels Kokillenguss wurden vergleichbare Ergebnisse und Charakteristika erzielt [24]. Im Rahmen des DFG-Projektes „Eigenspannungsanalyse an Verbundgusskörpern mittels Neutronendiffraktometrie“ wurde zudem die Entstehung der mechanischen Dehnungen im Aluminium während des Abkühlens untersucht. Die Neutronendiffraktometrie erfasst die gesamte elastische, mechanische und thermische Dehnung, weswegen eine getrennte Untersuchung der thermischen Ausdehnung der Aluminium-Silizium-Legierung nötig war. Im Rahmen verschiedener Dissertationen am UTG wurden weitere Untersuchungen zur Bestimmung von Gusseigenspannungen und Verzügen durchgeführt [25, 14, 26].

2.1.2 Überwachung von Bauwerken

Im Bereich der Überwachung von Bauwerken gibt es bereits Ansätze, die auf verschiedensten Messprinzipien basieren. Im nachfolgenden werden einige Beispiele gezeigt, mit denen eine Überwachung von Bauwerken und im speziellen von Naturstein ermöglicht wird. In [27] wird ein möglicher Aufbau für den Einsatz zur Strukturüberwachung an Bauteilen aus Beton gezeigt. Mittels eines FBGs, das zur Dehnungskompensation in ein Metallröhrchen gepackt ist, wird die Temperatur erfasst. Das zweite FBG ist zwischen zwei Schichten von Verbundwerkstoffen gelagert. Mit Hilfe des Temperatursensors kann der Einfluss dieser auf den Dehnungssensor kompensiert und auf die Dehnung rückgeschlossen werden. Versuche an Betonträgern zeigten, dass dieser Sensoraufbau bei akkurater Befestigung Dehnungen, Vibrationen und Temperaturen erfassen kann. Eine weitere Anwendung ist die Überwachung der Wu-Zi-Brücke in Taiwan. Hierfür wurden 60 FBG-Sensoren an Bewehrungsstäben für die Deckenplatte und Bodenplatte befestigt. Für jedes der befestigten FBGs wurde in der unmittelbaren Nähe ein weiterer dehnungsentkoppelter Temperatursensor installiert. Zur Aufzeichnung der kompletten Verformungshistorie des Betons wurde bereits bei dem Eingießen begonnen [28]. Wegen

unvorhergesehenen Problemen beim Bau der Brücke wurde jedoch das Einbringen des selbstverdichtenden Betons um etwa sechs Monate verzögert und die Sensoren wurden dem feuchten Klima ausgesetzt. Die zusätzlich installierten Dehnungsmessstreifen (DMS) wurden mit der selben Sorgfalt wie die faseroptischen Komponenten angebracht, erlitten jedoch immense Schäden durch die Lagerung unter feuchten Bedingungen. Die Messergebnisse der DMS lieferten keine verlässlichen Ergebnisse, wohingegen sich die FBGs als zuverlässliche Sensorik bewies. Eine weitere Methode zur Überwachung von Brücken wird in [29] aufgezeigt. Hier werden die Brückenseile überwacht, um Schäden wie Korrosion, Materialermüdung und Spannungumlagerungen frühzeitig zu erkennen. Es wird hierbei ausgenutzt, dass Korrosionsprodukte eine geringe thermische Leitfähigkeit besitzen und somit die Übertragung von Wärme, die durch eine aktive Thermosonde erzeugt wird, verhindern. Durch die Temperaturantwort nach der Anregung an der Kontaktfläche zur Betonbewehrung kann somit auf Korrosion geschlossen werden. Die Thermosonde besteht aus einer dünnwandigen Stahlkanüle mit einem Außendurchmesser von 0,9 mm und einer Länge von 30 mm. Als Heizelemente werden in das Röhrchen Karbonfasern eingebracht und in der Mitte der Anordnung wird ein FBG platziert. Die Enden des Röhrchens werden mit Epoxidharz verklebt, um das Eindringen von Wasser zu verhindern. In Abbildung 2.1 ist links der Versuchsaufbau zu sehen. Die Thermosonde wurde an dem Bewehrungsstab befestigt und in die Probe eingebettet. Rechts in Abbildung 2.1 ist der gebrochene Zementblock und die Thermosonde zu sehen. Die Ergebnisse aus dem Versuchsaufbau aus Abbildung 2.1 zeigen, dass dieser Ansatz zur Korrosionsüberwachung und somit ebenfalls zur Gebäudeüberwachung geeignet ist. In [30] wird eine Methode zur FBG-Integration in Betonstahl vorgestellt, der Teil eines Stahlbetonhohlträgers ist. Die Fasern wurden wie in Abbildung 2.2 gezeigt mit Hilfe von Epoxidharz entlang des Betonstahls eingebettet. Ein FBG-Beschleunigungsmesser wurde verwendet, um die Antwort des Trägers auf erzwungene Vibrationen zu überprüfen. In einem weiteren Versuch wurde der Träger in einem Vier-Punkt-Biegetest bis zum Bruch belastet. Die Ergebnisse beider Messungen zeigen, dass das System, basierend auf FBGs, die Belastungen erfasst und auch das plastische Verhalten des Trägers nachbilden.

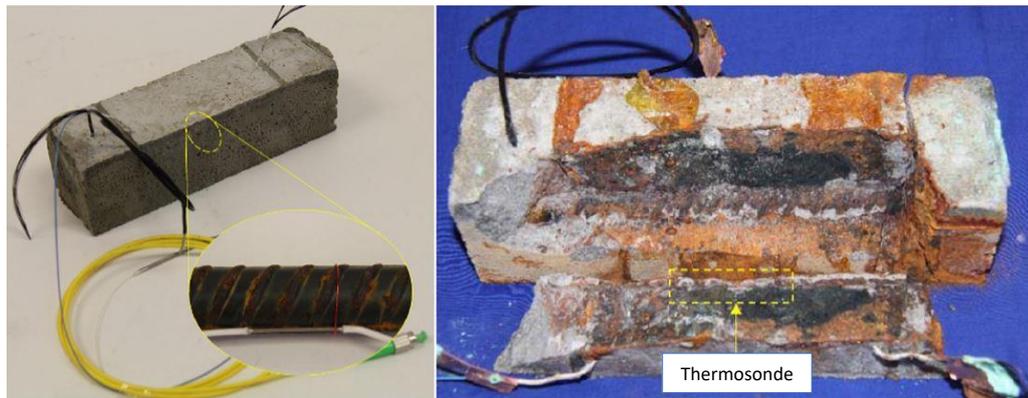


Abbildung 2.1: Die Thermosonde wird an einem Bewehrungsstab fixiert und in das Testmaterial eingebettet (links). Rechts ist die zerbrochene Messprobe und die Thermosonde gezeigt [29].

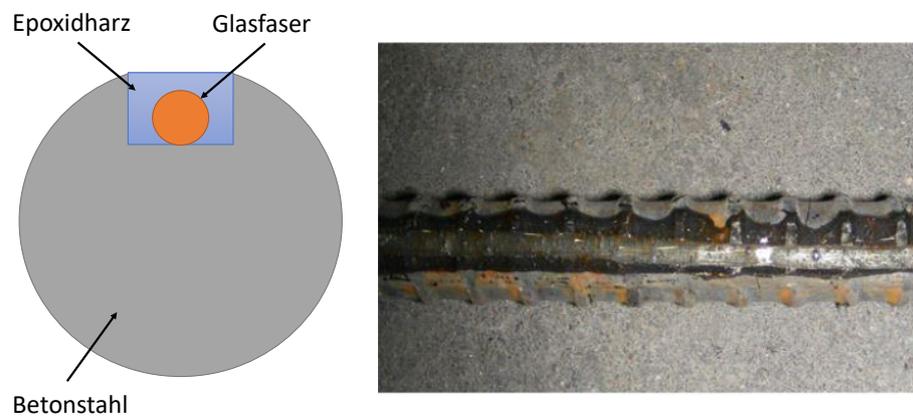


Abbildung 2.2: Betonstahl mit eingebetteter Glasfaser [30].

Die dargestellten Beispiele zeigen, dass sich die Anwendung von faseroptischen Messsystemen im Bereich der Gebäudeüberwachungen zunehmend profilieren. Jedoch werden je nach Baumaterial spezielle Lösungen benötigt, um die Sensorik

anzubringen. Nachfolgend werden noch Beispiele für Messsysteme basierend auf alternativer Sensorik als Vergleich aufgezeigt. Da sich für die geschilderte Anwendung destruktive Methoden nicht eignen, wird nur auf nicht-destruktive oder minimal-invasive eingegangen.

Eine einfache Methode zur Überwachung des Zustands eines Bauwerks aus Naturstein ist die Ultraschallmessung. Dichteanomalien in der Messprobe beeinflussen die Ultraschallgeschwindigkeit und so ist deren Laufzeit vom Sender zum Empfänger größer. Die Laufzeit kann somit verwendet werden, um auf Inhomogenitäten im Steingefüge zu folgern und somit auf Risse oder Hohlräume [31]. Auf der Senderseite wird ein Ultraschallimpuls ins Gestein emittiert, der aus verschiedenen Arten von Ultraschallwellen besteht. Die Longitudinalwelle besitzt im Vergleich zu anderen Wellen die höchste Ausbreitungsgeschwindigkeit, weswegen sie üblicherweise zur Messung beim Transmissionsverfahren benutzt wird. Die Empfängerseite nimmt die Wellen, die durch die Messprobe geschickt werden, auf und so kann deren Laufzeit ermittelt werden. Gesteinsdicken von 20 mm bis 15 m eignen sich für dieses Verfahren. Bei kurzen Messstrecken werden Frequenzen von 82 kHz - 200 kHz und bei langen Frequenzen von 10 kHz - 40 KHz verwendet. Neben der Messung mit Ultraschallwellen kann auch eine Radarmessung durchgeführt werden [32]. Im Gegensatz zur Ultraschallmessung wird hierbei nicht die Transmission, sondern die Reflexion detektiert. Neben der Laufzeit des eingekoppelten Signals wird hier zudem noch die Intensität ausgewertet. Mit dieser zusätzlichen Information kann nicht nur bestimmt werden, ob Inhomogenitäten vorliegen, sondern auch ob es sich um Wasserstauungen, Lufteinschlüsse oder Materialübergänge handelt. Der Sender gibt sehr kurze Radar-Impulse mit einer Frequenz über 1 GHz in das Gestein ab und an den Grenzflächen der Struktur wird das Signal reflektiert. Durch die Laufzeit kann die Position der Störstelle und mit der Intensität auf die Art geschlossen werden. Bei der Infrarot-Thermographie wird der Effekt genutzt, dass Lufteinschlüsse im Stein die Wärmeleitfähigkeit senken und somit zu einer stärkeren Aufheizung bzw. Abkühlung in dem Bereich führen [32, 31]. Es kann zwischen der aktiven und passiven Infrarot-Thermographie unterschieden werden. Bei der aktiven Form wird dem Messobjekt zusätzliche Wärme zugeführt, damit auch über tiefer liegende Bereiche Aussagen getroffen werden können. Aus diesem Grund können bei der passiven Form nur oberflächliche Schichten untersucht werden. Bei der aktiven Variante wird mittels einer Heizquelle, wie einem Infrarot-

Strahler, das Messobjekt erwärmt. Über die Dauer und Intensität der Erwärmung kann die Messtiefe im Gestein bestimmt werden. Wird bei besonders zerbrechlichen Strukturen jedoch mehr Wärme zugefügt als die über den Jahresverlauf üblich ist, kann es zu Spannungen und somit zu Schäden im Gestein kommen. Nach der Erwärmung müssen Störquellen aus dem Messumfeld entfernt werden, um parasitäre Einflüsse zu vermeiden. Während sich die Temperatur des Messobjekts wieder an die Umgebungstemperatur angleicht, wird dies von einer Infrarot-Kamera aufgezeichnet. Bereiche mit Hohlstellen heizen sich bei der Erwärmung stärker auf, da die enthaltene Luft als Wärmeisolator wirkt. Bei der Abkühlung hingegen sinkt die Temperatur in diesen Bereichen langsamer ab. Materialbereiche ohne Störstellen leiten die Wärme schneller an die Umgebung ab. Somit werden oberflächennahe Hohlstellen sofort erkannt, wohingegen sich tiefer gelegene Inhomogenität erst zu einem späteren Zeitpunkt zeigen. Werden die Ergebnisse im Frequenzbereich betrachtet, dann können diese als Amplituden- und Phasenbilder dargestellt werden. In [33] wird eine Methode zur Bestimmung der Feuchte mittels Impedanzmessung vorgestellt. Die Fähigkeit, Wasser durch Böden, Niederschlag und Luftfeuchte aufzunehmen, wird durch die poröse Struktur gestärkt. Dies betrifft beispielsweise die absolute Porosität, die Porenvernetzung, die Porengröße und die Benetzbarkeit. Eindringendes Wasser kann zu Schädigungen der Struktur in Form von Materialverlust durch Auswaschung oder Abplatzungen bei Gefrieren führen. Um solche Schäden zu vermeiden, ist es wichtig, frühzeitig eine zu große Feuchtigkeit zu detektieren und Gegenmaßnahmen zu ergreifen. Die Impedanzmessung arbeitet mit einer Zwei-Elektroden-Anordnung. In Abbildung 2.3 ist auf der linken Seite eine einzelne Elektrode und rechts ein installiertes Elektrodenpaar gezeigt. Die Leitfähigkeit in einem Naturstein hängt stark von der aufgenommenen Wassermenge ab. Je mehr Wasser aufgenommen wurde, desto geringer ist der elektrische Widerstand bzw. die Impedanz. Ohne Wasserzufuhr ist Naturstein nicht leitend und so kann nur von außen aufgenommene Feuchtigkeit für die elektrische Leitfähigkeit verantwortlich sein. Bei der Zwei-Elektroden-Anordnung werden zwei Elektroden in der Messprobe befestigt. Die ermittelte Impedanz kann als Indikator für vorhandene Feuchtigkeit gesehen werden. Problematisch bei der Impedanzmessung ist, dass nicht zwischen unterschiedlichen Elektrolyten unterschieden wird. Eingelagertes Salz führt schon bei geringer Materialfeuchte ebenso zu einer Erhöhung der Leitfähigkeit. Nach jedem Trocknungsvorgang bleiben Salze im Stein zurück, die bei

der nächsten Messung das Ergebnis verfälschen. Somit kann nur schwer auf die absolute Feuchte geschlossen werden. Die Messmethode ist zudem nicht gänzlich zerstörungsfrei, da für die Anbringung der Elektroden Bohrlöcher angebracht werden müssen. Als letztes Beispiel sollen DMS erwähnt werden. Diese können auf den Naturstein aufgeklebt werden und da sie ihren Widerstand ändern, wenn sie Dehnung erfahren, können sie Aufschluss über auftretende Materialdehnungen geben [34]. Als problematisch zeigt sich jedoch die Alterung des DMS und der Klebung, die die Messung verfälscht. Zudem muss die Temperatur mit einem weiteren Sensor erfasst werden, da deren Einfluss auf die Messung kompensiert werden muss. Die besprochenen Methoden besitzen zwar jeweils Vorteile, doch kann keines dieser Systeme die Anforderungen an das Messsystem für die Überwachung der Lorenzkirche gänzlich erfüllen.

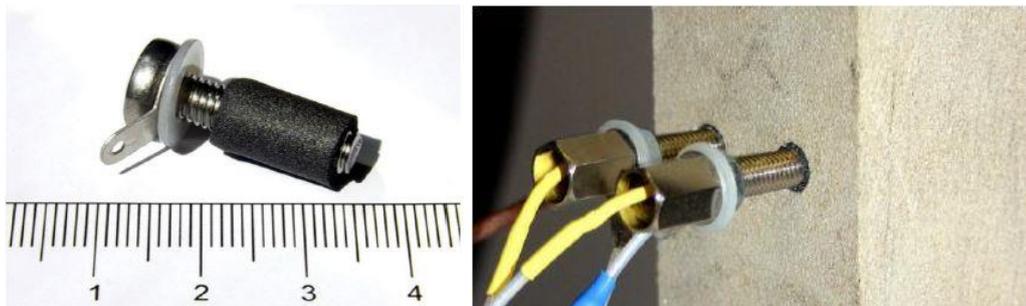


Abbildung 2.3: Links ist eine einzelne Elektrode und rechts ein installiertes Elektrodenpaar gezeigt [33].

2.2 Strukturüberwachung

Die Strukturüberwachung beschreibt die Überwachung einer Struktur über deren gesamte Lebensdauer und die Möglichkeit einer Diagnose deren Zustandes. Dies betrifft sowohl die Einzelteile einer Struktur als auch eine Betrachtung der Struktur als Ganzes. Der Zustand des zu überwachenden Objekts muss innerhalb eines

bestimmten Bereiches bleiben, der Alterung und Umwelteinflüsse miteinbezieht. Durch eine zeitkontinuierliche Beobachtung ist es möglich, eine Prognose über zu erwartende Schäden und somit den Lebenszyklus zu machen. Für die Zustandsüberwachung können verschiedene physikalische Größen in die Analyse miteinbezogen werden. Jedoch erweist es sich als schwierig, einen Schwellwert oder eine Kombination verschiedener Schwellwerte unterschiedlicher Sensorsysteme festzulegen und ist somit oft nur empirisch zu ermitteln. Eine solche Überwachung ist mit einem hohen Aufwand verbunden und erfordert sowohl Software- als auch Hardwarekomponenten. Dieses System erhöht zudem die Komplexität des Gesamtsystems, da es eine zusätzliche Systemebene darstellt [35]. Die kontinuierliche Überwachung von Bauteilen bietet dem Hersteller und dem Endnutzer immense Vorteile. Das Wissen über den aktuellen Zustand einer Struktur optimiert deren Nutzung, da Ausfälle verringert und katastrophale Schäden verhindert werden können. Zudem können Wartungsintervalle angepasst werden, so dass keine periodische Wartung nötig ist oder zumindest deren Intervalle vergrößert werden. Der Wandel hin zu größeren und Bedarfs-Wartungsintervallen wird in aktuellen Forschungen sowohl für militärische als auch zivile Anwendungen beobachtet [36, 37, 38, 39].

In [40] wird der Prozess der Strukturüberwachung in vier Teilen beschrieben, die operative Einschätzung, die Datenerfassung und Datenzusammenführung, die Merkmalsextrahierung und Informationsverdichtung, sowie die Entwicklung eines statistischen Modells.

Die operative Einschätzung beantwortet vier Fragen bezüglich der Implementierung eines Systems zur Strukturüberwachung. Es wird bestimmt wie ein Schaden für das System definiert ist, unter welchen operativen Einflüssen und Umweltbedingungen das zu beobachtende System arbeitet, welche Grenzen es für die Datenerfassung gibt und welche Sicherheitsrichtlinien für die Überwachung gültig sind. In [41] wird nicht nur die Art des Schaden beschrieben, sondern quantifiziert auch das Ausmaß des detektierbaren Mangels. [42] gibt ein Beispiel für die Studie bezüglich der Ökonomie und Sicherheit. Die Datenerfassung umfasst die Art der Sensoren, ihre Anzahl und Platzierung. Ein andere notwendige Überlegung umfasst die Anzahl der Messungen. Es muss berücksichtigt werden, dass Messdaten unter verschiedenen Umgebungstemperaturen erfasst werden können und somit die Fähigkeit dies zu normieren enorm wichtig ist. Die Zusammenführung der Messdaten aus einer Vielzahl von Sensoren macht die Aussage über mögliche Schadensfälle zuverlässiger als

mit nur einer Messstelle. Oftmals wird diese Fusion auf eine naive Form durchgeführt, z. B. wenn es darum geht, relative Werte zwischen unterschiedlichen Sensoren auszutauschen [40]. Weitaus anspruchsvoller wird es, wenn Daten aus neuronalen Netzen zur Datenfusion benutzt werden [43]. Darüber hinaus wird in diesem Schritt noch eine Filterung und Dezimierung der Messdaten durchgeführt, um die Aussagekraft zu stärken und die Datenmengen zu reduzieren. Der Arbeitsschritt, der die größte Aufmerksamkeit erfordert, ist die Merkmalsextrahierung. Hierbei werden Eigenschaften der zu überwachenden Struktur identifiziert, die sensitiv auf Schäden reagieren. Diese werden von den Messdaten abgeleitet und erlauben zwischen Schadensbildern zu differenzieren. Da es sich zu diesem Zeitpunkt einer Strukturüberwachung um eine immense Datenmenge handeln kann, muss eine Methode gefunden werden, die Daten zu komprimieren. Ein Beispiel für die Komprimierung ist die Speicherung des Fehlers zwischen Vorhersage und aktueller Messung in einem Vektor [44]. Am Ende der Prozesskette steht die Entwicklung eines statistischen Modells zur Optimierung der Strukturüberwachung.

2.3 Faseroptische Sensorik

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen bezüglich Herstellung und Funktionsweise von FBGs geschaffen. Zudem wird gesondert auf das Verhalten bei hohen Temperaturen und Querbelastungen eingegangen.

2.3.1 Aufbau und Eigenschaften

Die Grundlage für FBGs bilden Glasfasern, die immer mehr Bedeutung in der Telekommunikation und Sensorik gewinnen. Charles Kao und Manfred Börner gelten als die Erfinder der optischen Nachrichtentechnik. Ihre Idee war es, eine Glasfaser als Transmitter, eine Lichtquelle als Sender und eine Diode als Fotodetektor zu verwenden. Zur damaligen Zeit lag die Dämpfung einer Glasfaser noch in der Größenordnung von 1000 dB/km und somit wäre nach einem Kilometer nur noch ein um 100 Dekaden geschwächtes Signal vorhanden. Die Werte für die Dämpfung liegen heutzutage weit unter diesem Wert und betragen weniger als 0,2 dB/km. Somit liegt nach 100 Kilometern Lichtleitung immer noch mehr als 1 Prozent Strahlleistung vor. Dieser technische Fortschritt ist einer der Aspekte, der die faseroptische

Signalübertragung attraktiv gegenüber konventionellen Systemen macht [45]. Ein faseroptischer Lichtleiter besitzt einen Kern, in dem auf Grund von Totalreflexion der Großteil des Lichts geführt wird. Um den Kern herum ist der Mantel, dessen Brechungsindex kleiner sein muss als der des Kerns, um die Verluste gering zu halten. Durch eine Germanium-Dotierung des Kerns von 1 Mol % - 30 Mol % wird im Kern eine Brechungsindexerhöhung von 0,001 bis 0,04 erreicht. Der Mantel wird hingegen nicht dotiert und besteht aus reinem Quarzglas [46]. Je nach Kerndurchmesser können in einer Faser eine Vielzahl von Lichtmoden geführt werden. Wird von einer Stufenprofil-Glasfaser ausgegangen, also von einem konstanten Brechungsindex in den einzelnen Bereichen, bietet die Ausbreitungsgleichung 2.1 von Licht mehrere Lösungen [47]. ϵ_0 bezeichnet darin die Dielektrizitätskonstante im Vakuum, μ_0 die Vakuum-Permeabilität und \vec{E} die elektrische Feldstärke. Der Vektor \vec{P} beinhaltet die Polarisierung, die für eine Vielzahl von physikalischen Effekten, die die Signalqualität mindern, verantwortlich ist. Wendet man diese Lösungen auf das geometrische Modell an, so entsprechen diese Lösungen den transversalen Moden, also Lichtstrahlen, die sich mit unterschiedlichen Einfallswinkeln zwischen Mantel und Kern fort bewegen[48].

$$\vec{\nabla}^2 \vec{E} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\delta^2}{\delta t^2} \vec{E} + \mu_0 \frac{\delta^2}{\delta t^2} \vec{P} \quad (2.1)$$

Die Anzahl der Moden lässt sich durch den Kerndurchmesser beschränken. Wird der Radius bis zu einem bestimmten Grenzwert verringert, dann kann sich im Glasfaserkern nur noch ein Mode ausbreiten und es wird von Single-Mode-Fasern gesprochen. Ob nur eine Mode im Kern geführt wird, kann durch den Strukturparameter V abgeschätzt werden. Dieser kann mit der Gleichung 2.2 beschrieben werden.

$$V = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} k_0 a \quad (2.2)$$

n_1 gibt den Brechungsindex des Kerns und n_2 den des Mantels an. Die Wellenzahl wird mit k_0 bezeichnet und der Kernradius mit a . Bei einem Wert für V unter 2,405 breitet sich in der Faser nur eine Mode aus [49].

In eine Glasfaser kann eine periodische Indexmodulation eingebracht werden. Dies kann mittels verschiedener Methoden realisiert werden und wird in dem nachfolgenden Punkt detailliert erörtert. Der einfachste Fall einer solchen Modulation ist deren rechtwinklige Position in Bezug auf die longitudinale Faserachse und mit einer festen Gitterperiode Λ . Abbildung 2.4 zeigt eine Glasfaser in deren Kern

zwei FBGs eingeschrieben wurden. Ein FBG bezieht sich hierbei jeweils auf eine Ansammlung von periodischen Brechzahlmodulationen. Wird in eine Faser eine breitbandige Lichtquelle eingekoppelt, so wird an jeder einzelnen Modulation ein Teil des Spektrums reflektiert [50]. Dies geschieht jedoch nur, wenn die Bragg-Bedingung erfüllt ist, da sich sonst die Reflexionen der einzelnen Modulationen gegenseitig aufheben [51]. Sobald die Bragg-Bedingung erfüllt ist, addieren sich die Reflexionen konstruktiv auf und können an dem Faserende, das auch zur Einkopplung des Lichts dient, erfasst werden.

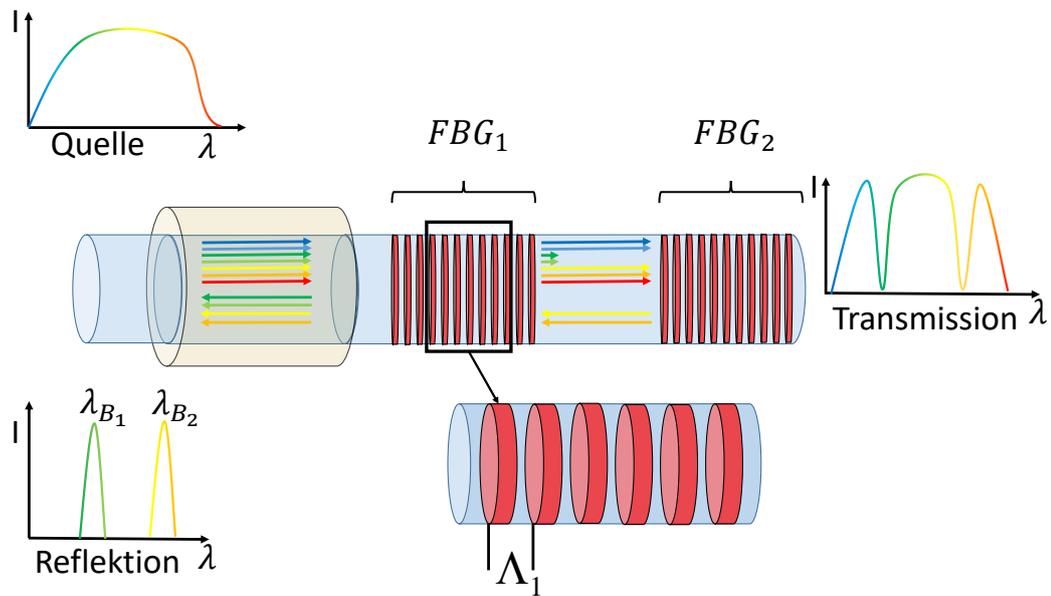


Abbildung 2.4: Wird breitbandiges Licht in eine Faser eingekoppelt wirken FBGs als Filter, die einen bestimmten Teil des Spektrum reflektieren [52].

Die Bragg Bedingung erfordert, dass die Energie- und Impulserhaltung erfüllt werden. Die Energieerhaltung aus Gleichung 2.3 besagt, dass die Frequenz der einfallenden Strahlung gleich der reflektierten Strahlung sein muss [53].

$$\hbar\omega_f = \hbar\omega_i \quad (2.3)$$

Bei der Impulserhaltung wird gefordert, dass der Wellenvektor der einfallenden Welle, k_i , addiert um den Gitter-Wellenvektor, K , gleich dem Wellenvektor der Streustrahlung k_f sein muss. Hierbei hat der Gitter-Wellenvektor eine orthogonale Richtung bezüglich der Gitterebene mit einer Größe von $2\pi/\Lambda$ [51]. Λ gibt hierbei den Gitterabstand der Modulation an, was in Abbildung 2.4 zu sehen ist.

$$k_i + K = k_f \quad (2.4)$$

Der abgelenkte Wellenvektor besitzt die selbe Magnitude, ist jedoch entgegengesetzt zum einfallenden Wellenvektor gerichtet. Dadurch lässt sich die Bedingung mit Gleichung 2.5 beschreiben.

$$2 \left(\frac{2\pi n_{eff}}{\lambda_B} \right) = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (2.5)$$

Mit Hilfe von Gleichung 2.5 kann die Bragg-Bedingung erster Ordnung aus Gleichung 2.6 bestimmt werden [50].

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (2.6)$$

Hierin ist λ_B die Bragg-Wellenlänge und gibt das Maximum des reflektierten Spektrums an. n_{eff} bezeichnet den effektiven Brechungsindex des Faserkerns. Sind jetzt in einer Faser mehrere FBGs eingeschrieben, so dürfen deren Bragg-Wellenlängen nicht identisch sein. In Abbildung 2.4 ist eine Faser gezeigt, in der zwei Gitter eingeschrieben sind. In der Reflexion ist deutlich zu sehen, dass die Parameter der Gitter so gewählt sind, dass sich die zwei Spektren klar differenzieren. Die Möglichkeit, in eine Glasfaser mehrere Sensoren einzuschreiben, bietet einen der größten Vorteile von FBGs [54, 55].

Besitzt der Kern einer Glasfaser den durchschnittlichen Brechungsindex von n_{Kern} addiert sich hierzu eine variable Brechzahlerhöhung $\delta n_{eff}(z)$, was in Abbildung 2.5 gezeigt ist [56]. Diese Modifikation ist entlang der z -Achse, also entlang der Faser, und kann wie folgt beschrieben werden:

$$\delta n_{eff}(z) = \delta \bar{n}_{eff}(z) \left[1 + s \cdot \cos \left(\frac{2\pi}{\Lambda} + \phi(z) \right) \right] \quad (2.7)$$

$\bar{n}_{eff}(z)$ bezeichnet den Mittelwert der Indexmodulation und s deren Stärke. $\phi(z)$ charakterisiert die Verstimmung des Gitters und bei homogenen Gittern mit konstanten Λ hebt sich diese auf. Mit den Vereinfachungen $n_0 = n_{Kern} + \bar{n}_{eff}(z)$ und $\Delta n = \delta \bar{n}_{eff}(z) \cdot s$ ergibt sich Gleichung 2.8

$$n(z) = n_0 + \Delta n \cdot \cos \left(\frac{2\pi z}{\Lambda} \right) \quad (2.8)$$

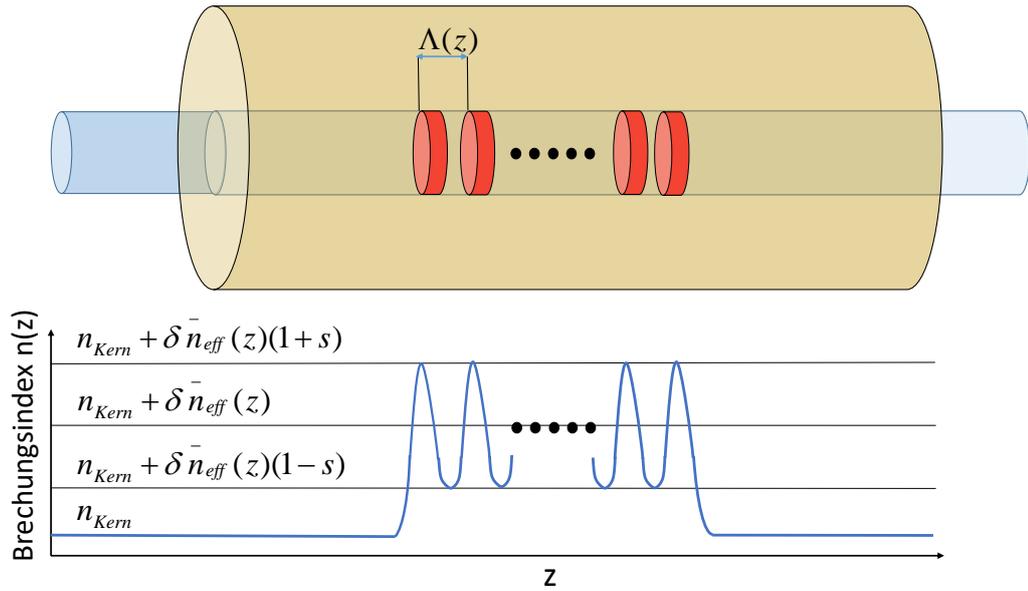


Abbildung 2.5: Indexmodulation eines FBGs.

Die Amplitude der induzierten Brechungsindexmodulation wird mit Δn angegeben und beträgt typischerweise Werte zwischen 10^{-5} und 10^{-3} . Mittels der Theorie der gekoppelten Moden kann auf die Reflektivität $R(l, \lambda)$ eines FBGs mit konstanter Modulationsamplitude und Gitterperiode geschlossen werden [51, 57, 58].

$$R(l, \lambda) = \frac{\Omega^2 \sinh^2(sl)}{\Delta k^2 \sinh^2(sl) + s^2 \cosh^2(sl)} \quad (2.9)$$

Die Reflektivität ist eine Funktion von der Länge des Gitters l und der Wellenlänge λ . Ω ist der Koppelkoeffizient und gibt die Stärke der Modenkopplung an, $\Delta k = k - \pi/\Lambda$ die Verstimmung des Wellenvektors $k = 2\pi n_0/\lambda$ gegenüber dem Gitter[56]. Die Stärke der Indexmodulation s kann durch das Lösen der Gleichung $s^2 = \Omega^2 - \Delta k^2$ bestimmt werden und wird imaginär, sobald gilt $|\Omega| < |\Delta k|$. Der Koppelkoeffizient ist somit entscheidend für die Intensität des reflektierten Signals und kann mit Hilfe des Brechungsindex des Kerns n_{Kern} und des Brechungsindex des Mantels n_{Mantel} angegeben werden.

$$\Omega = \frac{\pi \Delta n}{\lambda} \left(1 - \left(\left(\frac{2\pi r}{\lambda} \right)^2 (n_{Kern}^2 - n_{Mantel}^2) \right)^{-1} \right) \quad (2.10)$$

Im Zentrum des Gitters liegt keine Verstimmung des Wellenvektors vor und es gilt, $\Delta k = 0$, womit sich der Ausdruck für die Reflektivität vereinfacht zu:

$$R(l, \lambda) = \tanh^2(\Omega l) \quad (2.11)$$

Die Reflektivität hängt somit signifikant von der induzierten Brechungsindexänderung und der Länge des Gitters ab. In Abbildung 2.6 ist zum einen die Abhängigkeit von der Brechzahländerung oben und unten von der Länge, also der Anzahl der Modulationen, gezeigt. Im oberen Graph ist eine konstante Gitterlänge von 5 mm eingestellt und es variiert nur die Stärke der Modulation. Je stärker die Modulation, desto intensiver ist die Reflexion, jedoch erhöht sich auch die Halbwertsbreite. Im unteren Beispiel ist eine feste Änderung der Modulation von 10^{-4} eingestellt und die Länge des Gitters variiert zwischen 1 mm und 10 mm.

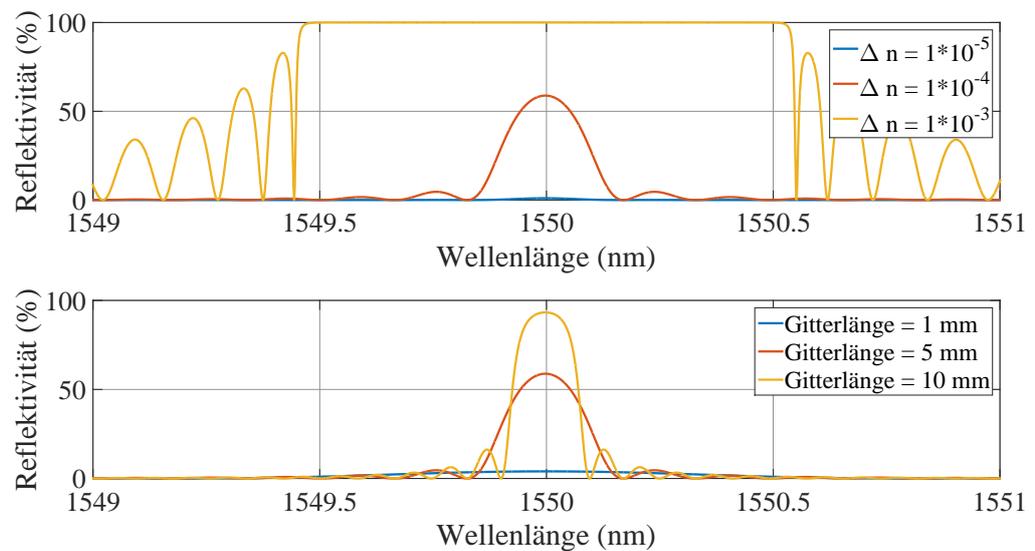


Abbildung 2.6: Abhängigkeit der Reflexion von der Indexmodulation und Gitterlänge.

Wie in Abbildung 2.6 zu sehen ist, ändert sich auch die Halbwertsbreite, für die der englische Begriff Full Width Half Maximum (FWHM) gängig ist, in Abhängigkeit der Parameter. Liegt das Maximum der Reflexion bei λ so ist das Intervall $\lambda \pm \delta\lambda$ als FWHM definiert, wenn gilt:

$$R(\lambda \pm \delta\lambda) = 0,5R(\lambda) \quad (2.12)$$

$\delta\lambda$ kann mit Hilfe der Anzahl der Modulationen $N = l/\Lambda$ angegeben werden:

$$\delta\lambda = \lambda_s \sqrt{\left(\frac{\Delta n}{2n_{core}}\right)^2 + \left(\frac{1}{N}\right)^2} \quad (2.13)$$

2.3.2 Faser-Bragg-Gitter-Typen

Für die Fertigung von FBGs gibt es eine Vielzahl von Verfahren, die sich grundlegend unterscheiden. Mögliche Verfahren basieren auf Interferometrie, Phasenmasken oder Punkt-zu-Punkt Einschreiben [59, 60, 61, 62]. Auf der obersten Ebene können FBGs in zwei grundlegende Typen unterteilt werden, die sich in den Mechanismen beim Einschreiben der Gitter unterscheiden. Bei Typ-I-Gittern wird der Effekt der Photosensitivität ausgenutzt, um die Brechzahlmodulation einzubringen. Bei Typ-II-Gittern werden mikroskopische Defekte in die Faser eingebracht. Beide Typen können je nach spezifischen Effekten weiter in Untergruppen eingeteilt werden [63, 64]. Die beiden Typen unterscheiden sich signifikant in der Stärke der Gitter. So werden bei Typ-II-FBGs mit einer Änderung von 10^{-4} bis 10^{-2} der Brechzahlmodulation wesentlich größere Werte erreicht als bei Typ-I-FBGs, die im Bereich von 10^{-6} bis 10^{-4} liegen. Bezüglich der Stabilität unter Belastung bei hohen Temperaturen gibt es ebenfalls Unterschiede. Nachfolgend wird auf zwei Varianten detaillierter eingegangen, da diese für den experimentellen Teil ausschlaggebend sind.

Femtosekunden-Faser-Bragg-Gitter

Bei den Femtosekunden-Faser-Bragg-Gittern (FS-FBGs) wird ein Infrarot-fs-Laser verwendet, um die Gitter einzubringen. Hierfür wird der Laser auf den Kern fokussiert, wodurch eine lokale Änderung des Brechungsindex eingebracht wird. Bei dieser Variante handelt es sich somit um eine Punkt-zu-Punkt Methode, da die Störstellen einzeln eingebracht werden. 1993 wurde die Punkt-zu-Punkt-Methode das erste mal mit Hilfe eines UV-Excimer-Lasers vorgestellt, wobei dies nur geringe Aufmerksamkeit erfuhr [65]. Erst nach der Einführung von Infrarot-fs-Lasern war diese Methode von Interesse. Auf Grund der Energiedichte bei der Herstellung gehören die FS-FBGs zu den Typ-II-FBGs [66, 67]. Der Einschreibprozess ist hochgradig nichtlinear und nicht resonant, weswegen das Material der Faser nicht von Bedeutung ist. Dies bringt den Vorteil mit sich, dass keine Germanium-Dotierung in der optischen Faser notwendig ist.

Werden FBGs bei hohen Temperaturen verwendet, wie es bei einem Einsatz in der flüssigen Schmelze der Fall ist, dann sind zwei Kriterien maßgebend für deren Einsatz. Die Intensität der Reflexionen an den Brechzahlmodulationen sollte sich nicht

verringern oder nur eine geringe Abschwächung aufweisen. Darüber hinaus sollte die Reflexion keinen Wellenlängendrift aufweisen. Dies bedeutet, dass die Bragg-Wellenlänge zu Beginn eines Temperaturzyklus mit der nach dem Temperaturzyklus übereinstimmen sollte. Tritt dennoch ein Unterschied auf, so liegt ein Drift vor. Dieser Drift führt zu einer fehlerhaften Berechnung, falls sein Einfluss nicht miteinbezogen wird.

In [68] wurde das Verhalten von FS-FBGs bei einer Temperatur von 1200 °C untersucht. Hierfür wurde das FS-FBG 20 Stunden dieser Temperatur ausgesetzt und kontinuierlich beobachtet wie sich die Bragg-Wellenlänge über die Zeit verändert. Es konnte ein deutlicher Drift der Wellenlänge aufgezeigt werden. In [69] wurden ebenfalls Versuche mit FS-FBGs im Betrieb bei hohen Temperaturen gemacht. Zunächst wurden die Gitter in 100 °C Schritten von 100 °C auf 1000 °C erhitzt und im Anschluss in gleichen Schritten wieder abgekühlt. Die Gitter verblieben jeweils zehn Minuten auf den Temperaturniveaus. Die Verschiebung der Bragg-Wellenlänge wies in diesem Szenario ein lineares Verhalten mit einer Sensitivität von ca. 14,1 pm/°C auf. Die Reflektivität schwankte in einem Bereich von ± 0,8 dB. Daneben wurde mit den Gittern noch ein Langzeit-Test durchgeführt, um die Temperaturstabilität zu überprüfen. Dafür wurden die Gitter für acht Stunden auf 800 °C gehalten. Die Reflektivität sank auch in diesem Bereich nur gering um 0,5 dB. Anschließend wurde die Temperatur für acht Stunden auf 1000 °C erhitzt. Die Intensität der Reflektivität zeigte auch hier nur eine geringe Degradation von weniger als 0,54 dB. In [70] wurden die Reflektivität von FS-FBGs mit denen von Typ-I-FBGs verglichen und es zeigt sich auch hier, dass die FS-FBGs im Gegensatz zu den anderen Sensoren einen deutlich geringeren Verfall aufweisen. Der Gitterzerfall von FS-FBGs hat sich in allen Versuchen deutlich geringer dargestellt als bei Standard Typ-I-FBGs. Wird jedoch der Drift nach einem Annealingzyklus betrachtet, so zeigt sich, dass dieser auch bei FS-FBGs vorliegt [71]. Es muss beim Einsatz von FS-FBGs in Metall-Schmelzen berücksichtigt werden, dass ein Drift der Wellenlänge auftritt, der entweder mathematisch berücksichtigt werden muss oder durch einen Annealingzyklus im Vorfeld minimiert wird.

Typ-I-FBGs mittels Phasenmaske

Bei Typ-I-Gittern ist die Grundlage für das Einschreiben die Photosensitivität des Kernmaterials der Faser. Die Photosensitivität bezeichnet die Eigenschaft des Kern-

materials eine permanente Änderung des Brechungsindex zu erzeugen, wenn es zu der Interaktion mit Licht einer geeigneten Wellenlänge und Intensität kommt [51]. Photosensitivität kann intrinsisch vorliegen oder durch Dotierung, Wasserstoffbeladung oder ähnliche Verfahren erzeugt werden [72]. Die korrespondierenden Wellenlängen liegen im ultravioletten Bereich bei 157 nm, 193 nm, 240 nm und 330 nm. Es gibt verschiedene Einschreibverfahren, wobei sich in der kommerziellen Nutzung die Phasenmaskenmethode durchgesetzt hat, die 1993 erstmals vorgestellt wurde und sich seitdem ständig weiterentwickelt hat. In Abbildung 2.7 ist das Schema des Einschreibverfahrens mittels Phasenmaske gezeigt [73, 74].

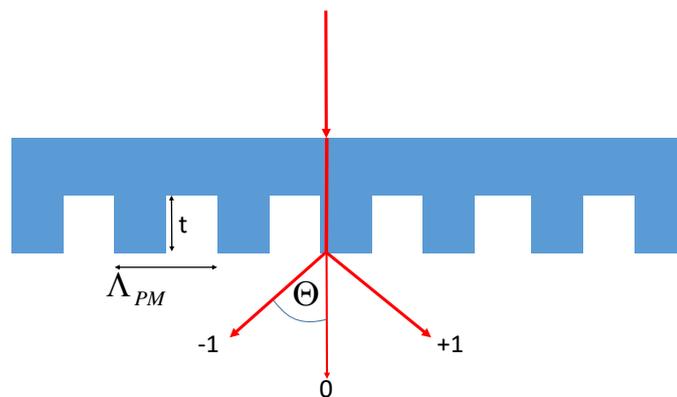


Abbildung 2.7: Durchstrahlen eines Beugungsgitters mit Laserlicht. Durch Überlagerung der Beugungen entsteht ein Interferenzmuster direkt hinter der Maske.

Dieses Transmissionsgitter wird lithografisch erzeugt und besteht meist aus Quarzglas. Zwei entscheidende Kenngrößen sind die Furchentiefe t und die Periode Λ_{PM} . Bei der Beugung des eingestrahnten Laserlichts einer Wellenlänge wird der Hauptteil der Energie in die ± 1 Beugungsordnung gelenkt und die nullte Ordnung unterdrückt. Durch die Überlagerung der $+1$ und -1 Beugungsordnung entsteht direkt hinter der Maske ein Interferenzmuster, das eine Brechzahlmodulation und somit ein FBG erzeugt [75]. Mit Hilfe der Wellenlänge des verwendeten Lasers λ_{UV} kann der Beugungswinkel bei senkrechten Einfall berechnet werden.

$$\sin(\Theta) = \frac{\lambda_{UV}}{\Lambda_{PM}} \quad (2.14)$$

Die Bragg-Wellenlänge ergibt sich in Abhängigkeit der Periode der Phasenmaske.

$$\lambda_B = n_{eff} \Lambda_{PM} \quad (2.15)$$

Die Methode mittels Phasenmaske stellt eine einfache reproduzierbare Methode des Einschreibens dar, wobei durch die festen Parameter der Phasenmaske eine Variation nicht möglich ist. Für Anwendungen unter 200 °C bieten diese Gitter eine ausreichende Beständigkeit. Im höheren Temperaturbereich zeigen die Gitter jedoch eine starke Instabilität und die Reflektivität verschlechtert sich signifikant [16, 76, 77]. Für die Temperaturbeständigkeit von Typ-I-Gittern, die mittels UV-Belichtung hergestellt wurden, kann die normierte Gitterstärke η in Abhängigkeit von der Temperatur T und der Verweildauer t angegeben werden [63]:

$$\eta(T, t) = \frac{\operatorname{arctanh}(\sqrt{R_{\max}(T, t)})}{\eta_0} \quad (2.16)$$

Mittels der Gleichung 2.16 zeigt sich, dass bei einer Temperatur von 300 °C bereits nach zehn Minuten lediglich die Hälfte der induzierten Brechzahlmodulation vorhanden ist. Werden die Glasfasern zudem noch mit Wasserstoff beladen, stellt sich die Degradation der Gitter noch intensiver dar. Für die Beschreibung des Zerfalls der FBGs, die in wasserstoffunbeladene Fasern eingeschrieben wurden, wurde in [63] ein Modell vorgestellt, das in Gleichung 2.17 zu sehen ist.

$$\eta(T, t) = \frac{1}{1 + 4,08 \cdot 10^{-3} e^{(9,12 \cdot 10^{-3} T)} t^{\frac{T}{3000K}}} \quad (2.17)$$

Wird die Gleichung 2.17 graphisch dargestellt, so ergibt sich Abbildung 2.8.

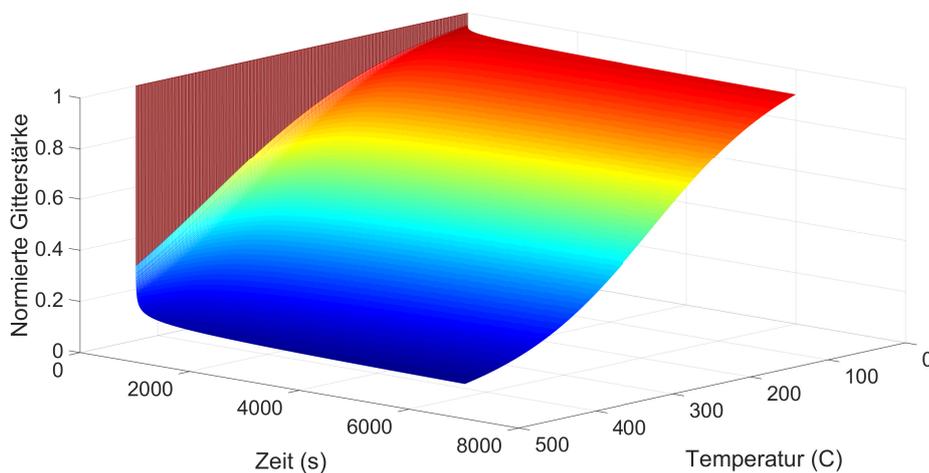


Abbildung 2.8: Abhängigkeit der Gitterstärke von Temperatur und Expositionszeit.

Es ist zu erkennen, dass die normierte Gitterstärke nur bestimmbar ist, wenn sowohl der Zeit- als auch der Temperaturverlauf bekannt ist. Die Vorgeschichte

eines solchen Sensors muss also bekannt sein, damit sichere Aussagen über die Messung getroffen werden können.

2.3.3 Nutzung von Faser-Bragg-Gittern als Sensoren

Im folgenden Abschnitt wird der Einsatz von FBGs als Sensoren für homogene Dehnungen in Faserrichtung und bei Temperaturänderungen vorgestellt. Die Grundlage für die Herleitung des Einflusses von Dehnung entlang der Faserrichtung bildet der photo-elastische Effekt [78, 79, 80, 81]. Mit diesem können die Spannungen $\bar{\sigma}$, bzw. die Verzerrungen \bar{e} und die Änderung ΔB_{ij} des Impermeabilitätstensors \bar{B} mit den Gleichungen 2.18 und 2.19 beschrieben werden.

$$\Delta B_{ij} = p_{ijkl} e_{kl} = \pi_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (2.18)$$

$$p_{ijrs} = \pi_{ijkl} E_{klrs} \quad (2.19)$$

Der photo-elastische Koeffizient - auch Pockelskoeffizient genannt - wird hierbei mit p_{ijkl} angegeben und π_{ijkl} bezeichnet die piezo-optischen Konstanten. Beide Koeffizienten stehen über den Elastizitätstensor E_{klrs} in Verbindung. Die Gleichungen 2.18 und 2.19 stellen gute Näherungen dar, da sie Effekte höherer Ordnung vernachlässigen, was für die Dehnungen in dieser Arbeit durchaus gültig ist [82]. Da es sich bei ΔB_{ij} und p_{ijkl} um symmetrische Tensoren handelt, kann die Beziehung als Matrix dargestellt werden:

$$\begin{pmatrix} \Delta B_1 \\ \Delta B_2 \\ \Delta B_3 \\ \Delta B_4 \\ \Delta B_5 \\ \Delta B_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} & p_{15} & p_{16} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} & p_{25} & p_{26} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} & p_{35} & p_{36} \\ p_{41} & p_{42} & p_{43} & p_{44} & p_{45} & p_{46} \\ p_{51} & p_{52} & p_{53} & p_{54} & p_{55} & p_{56} \\ p_{61} & p_{62} & p_{63} & p_{64} & p_{65} & p_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \\ e_5 \\ e_6 \end{pmatrix} \quad (2.20)$$

Bei isotropen Materialien lässt sich zudem der photo-elastische Tensor stark vereinfachen zu [83]:

$$p_{ij} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{11} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{12} & p_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(p_{11} - p_{12}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(p_{11} - p_{12}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(p_{11} - p_{12}) \end{pmatrix} \quad (2.21)$$

Durch diese Vereinfachung hängt die Matrix lediglich von den Parametern p_{11} und p_{12} ab, die in [84] zu 0,133 und 0,252 bestimmt wurden. Die Störung $\Delta \epsilon_{ij}$ des Permittivitätssensors $\bar{\epsilon} = \bar{B}^{-1}$ lautet für kleine Störungen der Permittivität [85]:

$$\Delta \epsilon_{xx} \approx -(\epsilon_{xx}^0)^2 (p_{11} e_{xx} + p_{12} (e_{yy} + e_{zz})) \quad (2.22)$$

$$\Delta \epsilon_{yy} \approx -(\epsilon_{yy}^0)^2 (p_{11} e_{xx} + p_{12} (e_{xx} + e_{zz})) \quad (2.23)$$

$$\Delta \epsilon_{zz} \approx -(\epsilon_{zz}^0)^2 (p_{11} e_{xx} + p_{12} (e_{xx} + e_{yy})) \quad (2.24)$$

$$\Delta \epsilon_{yz} \approx -\epsilon_{yy}^0 \epsilon_{zz}^0 \frac{1}{2} (p_{11} - p_{12}) e_{yz} \quad (2.25)$$

$$\Delta \epsilon_{xz} \approx -\epsilon_{xx}^0 \epsilon_{zz}^0 \frac{1}{2} (p_{11} - p_{12}) e_{xz} \quad (2.26)$$

$$\Delta \epsilon_{xy} \approx -\epsilon_{xx}^0 \epsilon_{yy}^0 \frac{1}{2} (p_{11} - p_{12}) e_{xy} \quad (2.27)$$

Da in dieser Arbeit mit Brechungsindizes anstatt von Permittivitäten gearbeitet wird, wird dieser nachfolgend über den Zusammenhang $\Delta \bar{B} = \bar{B} - \bar{B}^0$ und $\bar{\epsilon} = \bar{B}^{-1} \equiv n_{ij}^2$ hergeleitet.

$$\begin{aligned} \Delta B_{ij} = B_{ij} - B_{ij}^0 &= \frac{1}{n_{ij}^2} - \frac{1}{(n_{ij}^0)^2} = \frac{n_{ij}^2 - (n_{ij}^0)^2}{n_{ij}^2 (n_{ij}^0)^2} \\ &= \frac{(n_{ij}^0)^2 + 2\Delta n_{ij} n_{ij}^0 + \Delta n_{ij}^2 - (n_{ij}^0)^2}{n_{ij}^2 (n_{ij}^0)^2} \approx 2 \frac{\Delta n_{ij}}{(n_{ij}^0)^3} \end{aligned} \quad (2.28)$$

Bei im unbelasteten Zustand isotrope Materialien gilt zudem $n_{ij}^0 = n_{eff}^0 \delta_{ij}$ und es ergibt sich Gleichung 2.29.

$$\Delta n_{ij} = \frac{n_{eff}^3}{2} \Delta B_{ij} \quad (2.29)$$

In Abbildung 2.9 ist eine Glasfaser gezeigt, die durch eine Kraft in z-Richtung eine Dehnung erfährt. Die Länge l_0 der Faser im unbelasteten Fall verändert sich zu $l = l_0(1 + e_{zz})$. Für alle weiteren Betrachtungen gilt die Konvention, dass die z-Richtung entlang der Faser wirkt, x- und y-Richtung orthogonal zur Faser gerichtet sind. Die benutzten Indizes geben somit die Richtungen im kartesischen Koordinatensystem an.

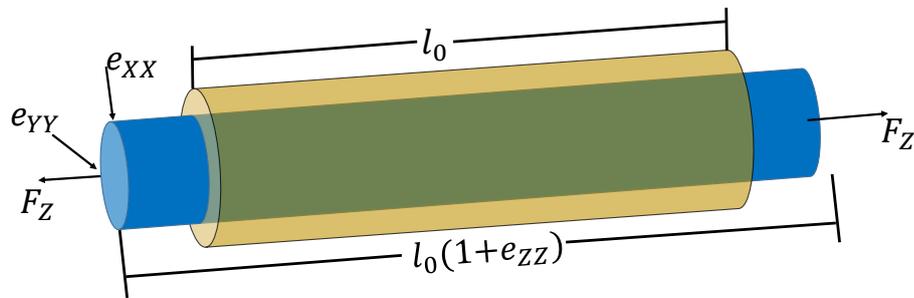


Abbildung 2.9: Die Glasfaser wird durch die anliegende Kraft von l_0 auf $l = l_0(1 + e_{zz})$ geändert.

Durch die wirkende Kraft F_z entsteht eine mechanische Spannung σ_{zz} , die sich über die Querschnittsfläche $A_F = 2\pi r^2$ berechnen lässt, wobei r den Radius der Faser angibt.

$$\sigma_{zz} = \frac{F_z}{A_F} \quad (2.30)$$

Mit Hilfe des Elastizitätsmoduls E kann die Dehnung in Faserrichtung ϵ_{zz} bestimmt werden. Da keine Querkräfte oder ähnliches in dem geschilderten Fall vorliegen, ist die orthogonale Dehnung über die Poissonzahl ν an die Längsdehnung gekoppelt [82].

$$\epsilon_{zz} = \frac{1}{E} \sigma_{zz} \quad (2.31)$$

$$\epsilon_{xx} = -\frac{\nu}{E}\sigma_{zz} \quad (2.32)$$

$$\epsilon_{yy} = \frac{\nu}{E}\sigma_{zz} \quad (2.33)$$

Die Veränderung des Brechungsindexes ist auf Grund der homogenen Dehnung gleich. Auch bei großen Dehnungen ändert sich der Brechungsindex nur in einem kleinen Bereich. So ergibt sich aus einer Dehnung von $\epsilon_{zz} = 1000 \mu m$ eine Änderung von $\approx 10^{-4}$. Dennoch bewirkt diese geringe Veränderung eine nennenswerte Verschiebung der Bragg-Wellenlänge. Der genaue Einfluss der mechanischen Spannung σ_{zz} ergibt sich durch das Ableiten von Gleichung 2.6 und Hilfe der Herleitung des photo-elastischen Effekts.

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_{B,\sigma_{zz}} &= \frac{d\lambda_b}{d\sigma_{zz}} = \frac{d2n_{eff}\Lambda}{d\sigma_{zz}} = 2n_{eff}\frac{d\Lambda}{d\sigma_{zz}} + 2\Lambda_0\frac{dn_{eff}}{d\sigma_{zz}} \\ &= 2\left(\sum_{i=1}^6 n_{eff}\frac{\delta\Lambda}{\delta e_i}\frac{de_i}{d\sigma_{zz}} + 2\Lambda_0\frac{\delta n_{eff}}{\delta e_i}\frac{de_i}{d\sigma_{zz}}\right) \\ &= 2\left(n_{eff}\Lambda_0\frac{1}{E} - 2\Lambda_0\frac{n_{eff}^3}{2}\left(p_{12}\frac{1}{E} - (p_{11} + p_{12})\frac{\nu}{E}\right)\right) \\ &= 2n_{eff}\Lambda_0\left(\frac{1}{E} - \frac{n_{eff}^2}{2}\left(\frac{1}{E}p_{12} - (p_{11} + p_{12})\frac{\nu}{E}\right)\right) \end{aligned} \quad (2.34)$$

Λ_0 gibt in der Gleichung 2.34 die Gitterperiode ohne Einfluss von Dehnung an. Wird nun die relative Änderung $\Delta\lambda_{B,e_{zz}}/\lambda_b$ betrachtet, so ergibt sich aus Gleichung 2.34:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\lambda_{B,e_{zz}}}{\lambda_b} &= \left(1 - \frac{n_{eff}^2}{2}(p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12}))\right)\epsilon_{zz} \\ &= (1 - p_{eff})\epsilon_{zz} \end{aligned} \quad (2.35)$$

Für Standard-Gitter in Glasfasern ergibt sich ein Wert für n_{eff} von $\approx 1,46$ und die Pockels-Koeffizienten sind mit $p_{11} = 0,113$ und $p_{12} = 0,252$ angegeben.

Zur Bestimmung des Einflusses der Temperaturabhängigkeit kann das gleiche Verfahren wie bei der Bestimmung der Wellenlängen-Verschiebung bei longitudinaler Dehnung angewandt werden. Hierfür wird die Gleichung 2.6 nach der Temperatur abgeleitet [86].

$$\frac{d\lambda_B}{dT} = 2\left(\Lambda_0\frac{dn_{eff}}{dT} + n_{eff}\frac{d\Lambda}{dT}\right) \quad (2.36)$$

Die Gleichung 2.36 kann auf zwei Einflussfaktoren α_T und α_n zurückgeführt werden und somit ergibt sich Gleichung 2.37 [87].

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \Delta T (\alpha_T + \alpha_n) = \Delta T \left(\frac{\Delta L}{L} \frac{1}{\Delta T} + \frac{1}{n_{eff}} \frac{dn_{eff}}{dT} \right) \quad (2.37)$$

α_T gibt den thermo-elastischen und α_n den thermo-optischen Koeffizienten wieder. Werden die Gleichungen 2.37 und 2.35 kombiniert, so ergibt sich Gleichung 2.38, die für Dehnungen in Faserrichtung und homogener Temperaturänderung gültig ist.

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \Delta T (\alpha + \alpha_n) + \varepsilon_{zz} (1 - p_{eff}) \quad (2.38)$$

Für den thermo-elastischen Koeffizienten ist in der Literatur der Wert $\alpha_T = 0,55 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ und für den thermo-optischen Koeffizienten $\alpha_n = 6,3 \dots 8,6 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ zu finden [88].

2.3.4 Verhalten von Faser-Bragg-Gittern unter Querbelastung

Zu den genannten Anwendungsfällen von Temperaturänderung und Dehnung in Längsrichtung muss beim Einbetten von FBGs noch eine weitere Belastung betrachtet werden. In Abbildung 2.10 ist eine Glasfaser mit FBG gezeigt, auf die unterschiedliche Dehnungen wirken. Bei der Erfassung von Dehnung in Längsrichtung wird davon ausgegangen, dass die Dehnungen über die Poissonzahl zusammenhängen. Wird die Glasfaser zum Beispiel in eine Schmelze eingebettet, entstehen beim Erstarrungsvorgang unter Umständen inhomogene Stressfelder. Nachfolgend wird die Konvention getroffen, dass $\varepsilon_{zz} = \varepsilon_z$, $\varepsilon_{xx} = \varepsilon_x$ und $\varepsilon_{yy} = \varepsilon_y$. Liegen unterschiedliche Dehnungsfelder radial an der Faser an, ändert sich der Brechungsindex inhomogen und führt somit zu unterschiedlichen Brechungsindizes [89, 90, 91]. Diese führen folglich zu unterschiedlichen Reflexionsspektren. Dadurch teilt sich Gleichung 2.39 zu Gleichung 2.40 und 2.41 auf [92, 93].

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \varepsilon_z - \frac{n_{eff}^2}{2} (p_{11}\varepsilon_x + p_{12}(\varepsilon_y + \varepsilon_z)) \quad (2.39)$$

$$\frac{\Delta\lambda_{B,y}}{\lambda_B} = \varepsilon_z - \frac{n_{eff}^2}{2} (p_{11}\varepsilon_y + p_{12}(\varepsilon_x + \varepsilon_z)) \quad (2.40)$$

$$\frac{\Delta\lambda_{B,x}}{\lambda_B} = \varepsilon_z - \frac{n_{eff}^2}{2} (p_{11}\varepsilon_x + p_{12}(\varepsilon_y + \varepsilon_z)) \quad (2.41)$$

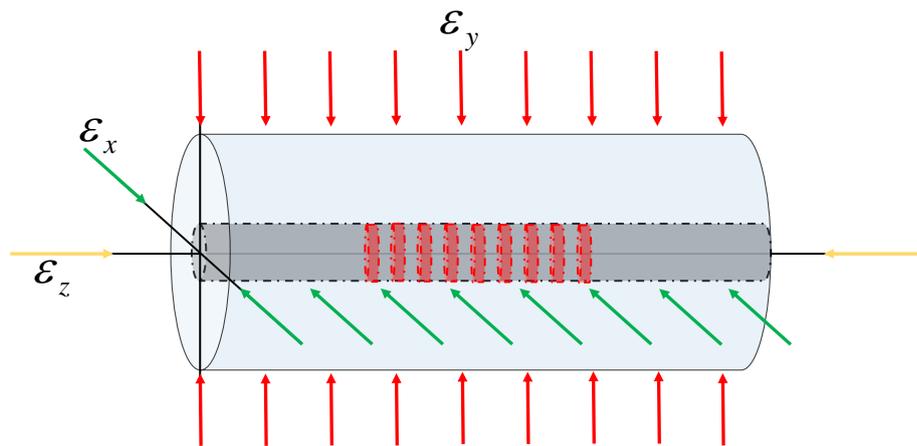


Abbildung 2.10: Glasfaser unter Einfluss von verschiedenen Dehnungen.

Wird Gleichung 2.40 von 2.41 subtrahiert, so ergibt sich der Unterschied der beiden Bragg-Wellenlängen zu:

$$\frac{\Delta\lambda_{B,y} - \Delta\lambda_{B,x}}{\lambda_0} = \frac{n_{eff}^2}{2} (p_{12} - p_{11}) (\varepsilon_y - \varepsilon_x) \quad (2.42)$$

Für die Anwendung von FBGs in Schmelzen muss bei einer Reflexion von zwei Bragg-Wellenlängen bezüglich des Ursprungs differenziert werden. Ein möglicher Grund sind die inhomogenen radialen Stressfelder. Eine weitere Möglichkeit ist der Einfluss der Gitterlänge. Erstarrt die Schmelze entlang der Faser nicht zeitgleich, können in Faserrichtung unterschiedliche Dehnungen auftreten. Wird vom einfachsten Fall ausgegangen, dass das Gitter in zwei unterschiedliche Zonen aufgeteilt wird, dann entstehen zwei Gitter mit geringeren Gitterlängen und unterschiedlichen Gitterperioden. Unterscheiden sich die beiden Dehnungen gering, so zeigt sich in der Reflexion ein Peak, wobei das Spektrum eine größere Halbwertsbreite besitzt. Ergeben sich beim Einbetten von FBGs in eine Schmelze größere Unterschiede der Dehnungen entlang eines FBGs, zeigt sich in der Reflexion ein Spektrum mit zwei oder mehreren Peaks.

2.4 Materialspannungen in Aluminiumlegierungen

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Grundlagen bezüglich der verwendeten Schmelze und deren Erstarrung aufgezeigt.

2.4.1 Entdeckung des Aluminiums als Gussmaterial

Über das letzte Jahrhundert hat sich Aluminium als eines der meist vorkommenden Metalle herausgestellt. Es ist sogar das Element mit den dritt größten Vorkommen weltweit. Nur Sauerstoff und Sand treten in größerer Menge auf. Im Jahre 1807 bewies der britische Elektrochemiker Sir Humphrey Davy die Existenz von Aluminium und 17 Jahre später wurde der erste kleine Barren durch den Dänen Hans Christian Oersted angefertigt [94]. 1845 wurde das spezifische Gewicht, eine der signifikantesten Eigenschaften des Stoffes, bestimmt. Zudem zeigte Friedrich Wöhler die einfache Formbarkeit, Stabilität gegenüber Luft und die Schmelzbarkeit mit einem Gasbrenner [95]. Napoleon III förderte die Produktion von Aluminium, da er es für militärische Zwecke einsetzen wollte. Er unterstützte Henri Saint-Clair Deville bei der Fertigung und so wurde es möglich, Aluminium zu einem Preis von £25 pro Kilogramm herzustellen, was jedoch immer noch zu teuer war. Auch dreißig Jahre später war der Preis von £12 immer noch zu hoch und die jährliche Produktion betrug lediglich 15 Tonnen. 1886 entwickelten Paul Louis Toussant Héroult und Charles Martin Hall unabhängig voneinander einen Prozess zur Herstellung von Aluminium. Kryolith löst bis zu 20 %, wenn es auf 1030 C° erhitzt wird. Mit dieser Erkenntnis und dem neuartigen Prozess konnte der Preis auf 4,50 US \$ gesenkt werden [95]. Die ersten Produktionsstätten wurden 1888, also zwei Jahre nach Entdeckung des neuen Prozess gegründet. Trotz der vielen Vorteile von Aluminium konnte sich das Metall zunächst nicht gegen Eisen, Stahl und Kupfer durchsetzen. Erst durch den ersten Weltkrieg stieg die Bedeutung von Aluminium. In den Jahren von 1914 und 1919 stieg die Produktion von 70.800 Tonnen auf 132.500 Tonnen jährlich [95]. Nach dem Krieg fand das Aluminium seinen Einsatz auch in zivilen Anwendungen, wodurch dessen Aufschwung bestehen blieb. Durch den zweiten Weltkrieg wiederholte sich der Aufschwung sogar in einem weitaus größerem Maßstab. Die Aluminiumproduktion stieg von 704.000 Tonnen in 1939 auf einen Spitzenwert von 1.950.000 Tonnen in 1943 [95]. Bedingt durch Forschung und Produktentwicklung während der 1950er, 60er und 70er Jahre entstand ein rie-

siges Angebot. Aluminium besitzt einen ökonomischen Vorteil gegenüber anderen Materialien. Es sind lediglich fünf Prozent der ursprünglichen Energie notwendig, um Aluminium wiederzugewinnen [96].

2.4.2 Geometrie der Gussform

Es gibt verschiedenste Gieß- und Formverfahren für Aluminiumlegierungen. Die erste Unterscheidung betrifft die Stabilität der Formen, da es sowohl Formen für einen einmaligen Einsatz als auch für mehrfache Anwendungen gibt. Bei der Auswahl der geeigneten Gussform müssen unterschiedliche Aspekte wie Festigkeitsanforderung, Bauteilgestalt, Größe, Gewicht oder Stückzahl in Betracht gezogen werden. Beim Sandgießen unterscheiden sich die Verfahren im verwendeten Binder. Dieser ist entweder Ton zusammen mit Wasser oder ein organisches Harz (Polyurethan, Furanharz). Daneben gibt es auch Systeme, bei denen anorganische Bindersysteme verwendet werden. Als Grundstoff wird meist Quarzsand verwendet [97]. In einem Formkasten wird auf eine Modellplatte Formsand aufgebracht und anschließend verdichtet, was sowohl manuell oder automatisiert geschehen kann. Auf diese Art wird eine Hälfte der Gussform erzeugt und mit Hilfe einer zweiten solchen Form wird ein Hohlraum erzeugt, der als Form für den Metallguss fungiert. Daneben gibt es noch weitere Methoden Sandformen herzustellen, wie das Erstellen eines Paketes mit mehreren kunstharzgebundenen Sandkernen. Die Kerne werden in die Form eingelegt und es werden Hohlräume, Kanäle, Durchbrüche und Hinterschneidungen gießtechnisch erzeugt. Im Vergleich zum Kokillenguss wird mit Sandformen eine geringere Maßgenauigkeit erreicht. Ebenso wird mit Sandformen in der Regel eine geringere Oberflächengüte erreicht. Beim Kokillenguss werden die Formen aus Stählen oder Gusseisen geformt und sind mehrmals verwendbar [97]. Zur Lösung der Aufgabenstellung wurden Sandformen für den einmaligen Einsatz, auch „Verlorene Formen“ genannt, verwendet. Dies ist bedingt durch die geringe Anzahl der Probenkörper und durch die Möglichkeit Sandformen schnell abzuändern. Neben der Hauptaufgabe, einen Hohlkörper für die flüssige Schmelze zu bilden, gibt es weitere bedeutende Anforderungen an das Gießsystem. Die Form soll sich nicht beliebig schnell mit der Schmelze füllen, sondern mit einer Fließgeschwindigkeit $v(t) < 0,5 \text{ m/s}$, die einen kontinuierlichen ansteigenden Metallspiegel ermöglicht [98]. Oberflächenturbulenzen müssen hierbei im Gießstrahl vermieden

werden, um eine kompakte Gießstrahlausbildung beim Eintritt der Schmelze in den Formhohlraum sicherzustellen. Der Materialtransport muss sich zudem lediglich auf das flüssige Metall beschränken, da weder Luft noch Schlacke noch Formelemente mitgerissen werden dürfen. Als letzter Aspekt soll hier die gute Trenn- und Formbarkeit des Gießsystems genannt werden.

Abbildung 2.11 zeigt die verwendete Geometrie, die aus zwei identischen Körpern links und rechts besteht und dem Einguss in der Mitte [99].

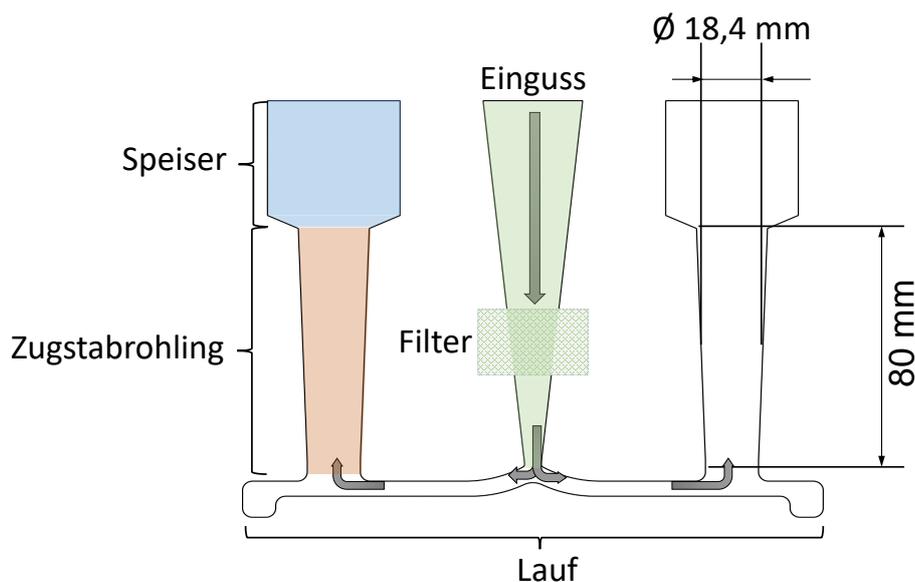


Abbildung 2.11: Geometrie der verwendeten Gussform. Die äußeren Probenkörper besitzen identische Abmessungen.

Der Querschnitt des Eingusskanals ist meist kreisförmig, da somit die Reibungs- und Strömungsverluste möglichst gering gehalten werden. Jedoch kann in besonderen Fällen der Querschnitt zur Unterdrückung der kreisenden Turbulenzen auch drei- bzw. vieleckig gestaltet sein [100]. Um die Ansaugung von Luft während des Gießens zu verhindern, ist der Eingusskanal konisch ausgeführt. Der Eingusskanal ist verjüngt und an die Einschnürung des Schmelzstrahls angepasst, so dass keine Luft angesaugt wird. Da Verunreinigungen wie Schlacke oder Oxide spezifisch leichter sind als das Metall, schwimmen sie auf. Der größte Teil der Schlacke wird durch Abschlacken oder Abkrammen entfernt. Jedoch reinigt sich eine Aluminiumschmelze durch ihre geringe Dichte von $\rho = 2,7 \text{ g/cm}^3$ nur sehr langsam, weswegen eine aktive Reinigung nötig ist. Um den Einschluss von Luft zu verhindern,

muss zudem möglichst turbulenzfrei eingegossen werden.

Über dem Zugstabrohling, dem gewünschten Werkstück, befindet sich der Speiser. Dieser gleicht während des Erstarrens des Gussstücks das entstehende Volumendefizit aus [101]. Um diese Aufgabe zu erfüllen muss das Material im Speiser später erstarren. Diese Bedingung wird erfüllt, wenn der Erstarrungsmodul des Speisers größer als der des dichtzuspeisenden Gussstückabschnittes ist. Der Erstarrungsmodul kann mittels Formel 2.43 berechnet werden [102].

$$\text{Modul}(M) = \frac{\text{Volumen}(V)}{\text{Oberfläche}(A)} \quad (2.43)$$

Das Verhältnis von Volumen zu Oberfläche des Speisers muss um 20 % größer sein als das des Gussstücks. Ist diese Bedingung erfüllt, dann ist gewährleistet, dass der Speiser später erstarrt. Obwohl der Modul eines kugelförmigen Speisers am größten ist, kann diese Geometrie aus formtechnischen Gründen oft nicht verwirklicht werden. Deswegen werden oft zylindrische Speiser verwendet, bei denen ein Verhältnis zwischen Höhe und Durchmesser von 2:1 anzustreben ist [102]. Durch einen dermaßen gewählten Speiser kann eine Bildung von Lunkern verringert werden. Lunker sind Gussfehler, die durch die Reduktion des Metallvolumens entstehen. Dabei kann zwischen drei Phasen der Volumenreduzierung differenziert werden, der Flüssigkeits-, der Festkörper und der Erstarrungsschwindung [103]. Zunächst kann die Reduzierung bereits in der flüssigen und darauf in der plastischen Phase auftreten. Auch in bereits festem Zustand kann diese letztlich noch auftreten. Dabei treten diese Lunker, auch Schwindungshohlräume genannt, vor allem bei dem Übergang von flüssig nach fest auf. Abbildung 2.12 zeigt den Schliff eines Abgusses, wobei hier der Abschnitt mit dem Speiser zusätzlich vergrößert ist. Es sind hierbei deutlich die Schwindungshohlräume zu erkennen, die bei der Erstarrung entstehen. Speiser können allgemein in zwei Gruppen unterteilt werden. Zum einen gibt es offene Speiser, die bis zur Oberseite der Gießform hochgezogen und der freien Atmosphäre frei zugänglich sind. Zum anderen geschlossene Systeme, die allseitig vom Formstoff umhüllt sind und auch Blindspeiser genannt werden [104].

In der Abbildung 2.11 ist im Eingusskanal noch weiteres Element, der Filter, eingefügt. Filter setzen sich im Gießereiwesen immer mehr durch, da die Gussstückqualität dadurch verbessert wird. Zum einen werden durch den Filter Verunreinigungen wie Sand oder Schlacke abgefangen, zum anderen beruhigt der Filter die Schmelze. Es gibt verschiedenste Arten von Filtertypen. Es gibt Siebkerne, Gewebefilter und

keramische Filter [105]. Am wirksamsten werden Keramikfilter angesehen und ihr Einsatzgebiet sind kleinere Formen und Gießmengen. Ein weiterer Vorteil von Filtern ist, dass sie Einschlüsse wirksam zurück halten.

Jeder Abguss enthält, wie bereits erwähnt, je zwei symmetrische Zugstabrohlinge. Aus diesen sollen nach Erstarrung Zugstäbe gefertigt werden, die in einem genormten Zugversuch durch eine Zugbeanspruchung in der Regel bis zum Bruch gedehnt werden. Mittels dieses Versuchs können die Festigkeits- und Verformungseigenschaften eines Werkstoffs unter einachsiger, momentfreier, monoton ansteigender Zugbeanspruchung bestimmt werden.

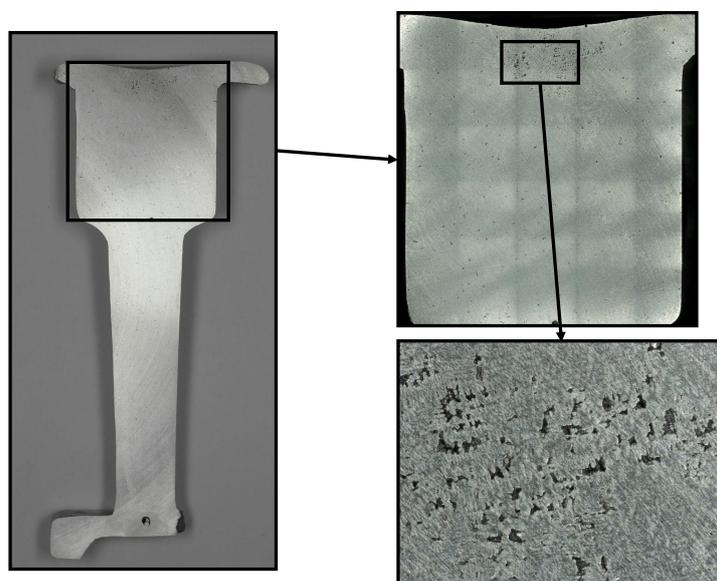


Abbildung 2.12: Makroschliff eines Zugstabrohlings angefertigt am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen. Die Einschlüsse im Speiser sind klar zu erkennen.

2.4.3 Erstarrungsprozess der Schmelze

Um das Verhalten einer Legierung darzustellen werden Zustandsdiagramme verwendet. Aus einem solchem Diagramm können die benötigte Gießtemperatur, der Erstarrungsbereich, Phasen und Gefüge bei Gießtemperatur, sowie deren Umwandlungen entnommen werden. Zustandsdiagramme basieren auf umfangreichen Abkühlversuchen. In Abbildung 2.13 sind exemplarisch eine Abkühl- sowie eine Aufheizkurve für ein reines Metall zu sehen [106].

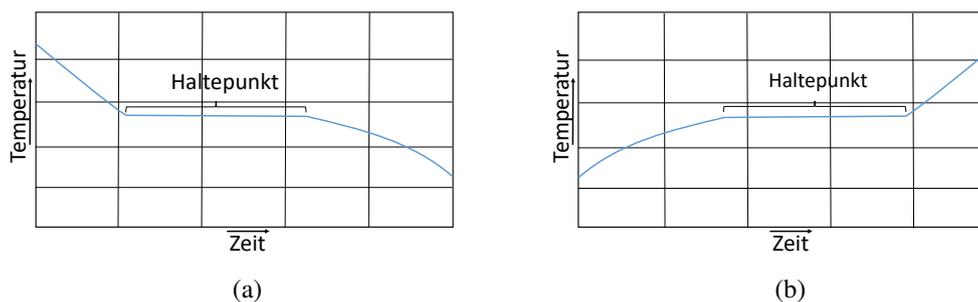


Abbildung 2.13: a) Abkühlkurve b) Aufheizkurve für ein reines Metall. In der Mitte ist jeweils ein Haltepunkt zu sehen.

Es ergibt sich jeweils ein Haltepunkt während der Erstarrung bzw. des Schmelzens. Dies ist bedingt durch die Erstarrungswärme, die bei der Umwandlung von flüssig nach fest frei wird, bzw. der zum Schmelzen benötigten Schmelzwärme. Als Beispiel hierfür kann Zink, mit einem Haltepunkt bei 419 C° , genannt werden. Die Temperaturen bei den Haltewerten sind nur dann gleich, wenn die Änderungen extrem langsam verlaufen. Weiterhin ist der Prozess nur dann reversibel, falls sich das System stets im Gleichgewicht befindet. Diese Umkehrbarkeit bedeutet, dass 1 K Temperaturänderung über die Schmelztemperatur hinaus zu einer vollständigen Verflüssigung führt. Liegt die Temperatur 1 K unter der Schmelzgrenze befindet sich das Material in einem festen Aggregatzustand. Abbildung 2.14 zeigt schematisch die Abkühlkurve einer beliebigen Legierung aus zwei Komponenten. Im Gegensatz zu Abbildung 2.13 ergibt sich hier kein Haltepunkt, sondern es ergeben sich zwei Knickpunkte. Oberhalb der Liquidustemperatur befindet sich das Stoffgemisch in einem flüssigem und unterhalb der Solidustemperatur in einem festen Zustand. Der Bereich dazwischen wird Erstarrungsbereich $\Delta\vartheta$ genannt. Die Höhe dieses Bereichs hängt von den Konzentrationen der Legierungspartner ab und schon wenige Zehntel-% Abweichung kann eine immense Verschiebung der Liquidus- oder Solidustemperatur bewirken. Zur Erstellung von Zustandsdiagrammen dienen Halte- und Knickpunkte erstarrender Metalle und Legierungen als Messpunkte. Auf der Abszisse eines Zustandsdiagramms ist die Verteilung der Konzentrationen aufgetragen. Wird von einem Zweistoffsystem mit den Komponenten A und B ausgegangen, dann befindet sich links der Punkt mit 100 % - Gehalt A und 0 % - Gehalt B. Der rechte äußere Punkt beschreibt die gegenteilige Situation. Auf der Ordinate werden die entsprechenden Temperaturen aufgetragen [107].

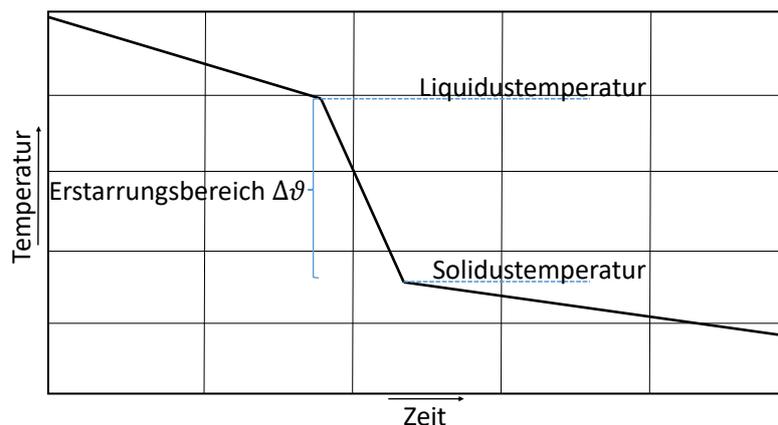


Abbildung 2.14: Abkühlkurve einer Legierung. Im Vergleich zu reinem Metall ergibt sich bei Legierungen kein Haltepunkt, sondern einen Erstarrungsbereich.

Die Einteilung der Zustandsdiagramme in verschiedene Grundtypen basiert auf der Löslichkeit der Legierungselemente im Grundmetall. Abbildung 2.15 zeigt die schematische Darstellung für zwei Elemente A und B, die statt einer homogenen Lösung ein Kristallgemisch nach der Erstarrung bilden. Es sind in der Abbildung drei Punkte eingezeichnet, die für folgende Betrachtungen als Ausgangspunkte genutzt werden. Bei Punkt 1 besteht die Schmelze aus 80% A und 20% B. Das Gemisch kühlt bis zur Liquidustemperatur ab und es entstehen erste Kristalle aus reinem A. Durch eine weitere Abkühlung entstehen immer mehr Kristalle aus reinem A, wodurch sich das Verhältnis der Schmelze stetig verändert und der Zustand des Systems bewegt sich entlang der Liquiduslinie hin zu dem Punkt E. Hier sind alle Atome von B enthalten, deren prozentualer Anteil der Schmelze nun 40% beträgt. Wird die bei E vorliegende Temperatur unterschritten, erstarrt die restliche Schmelze mit der Zusammensetzung, die bei Punkt E vorherrscht, dem Eutektikum. Das erstarrte Gemisch besteht zum einem aus dem Kristallgemisch aus A und zum anderen aus dem Eutektikum. Dabei handelt es sich um ein feines Korngemisch aus den beiden Stoffen und deren Zusammensetzung ist im gesamten Legierungssystem gleich. Beginnt der Abkühlprozess bei Punkt 2, so hat die Schmelze die exakte eutektische Zusammensetzung und die Legierung wird als eutektisch bezeichnet. Beginnend bei Punkt 3 ergibt sich umgekehrtes Verhalten zu 1. Bei Systemen mit völliger Löslichkeit lösen sich die Fremdatome in allen Konzentrationsbereichen [107]. Somit löst sich Element B in Grundmetall A völlig und bei umgekehrter

Konzentration ebenso.

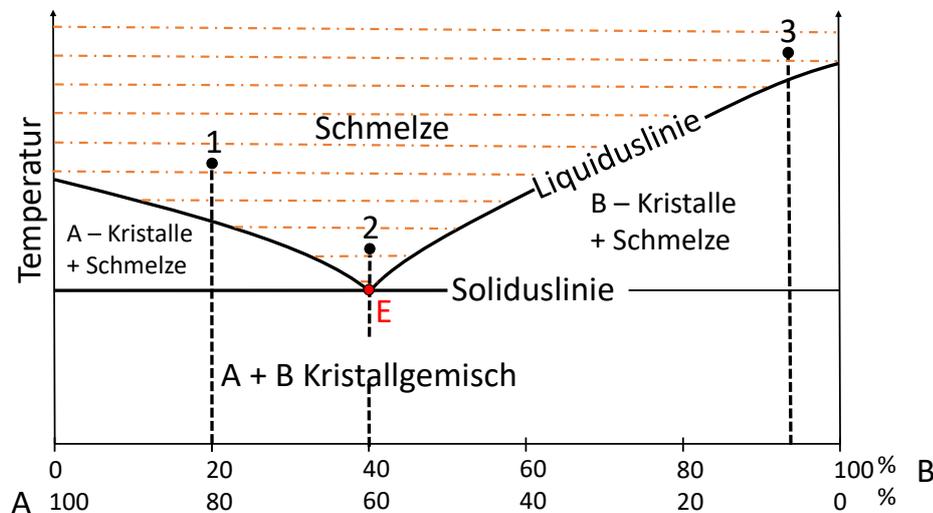


Abbildung 2.15: Zustandsdiagramm bei völliger Unlöslichkeit der Elemente A und B [106].

Als letztes werden Systeme mit teilweiser Löslichkeit im festen Zustand betrachtet, was in Abbildung 2.16 zu sehen ist. In Zusatz zu Abbildung 2.15 gibt es hier im linken und rechten einen zusätzlichen Bereich. Wird die Situation bei einer Konzentration von 100 % A untersucht, so gibt es laut Abbildung die zwei Haltepunkte T_S und T_E , was aber für ein reines Material nicht zutreffen kann. Dieser Zustand kann jedoch ausgeschlossen werden, da immer eine geringe Löslichkeit von Fremdatomen vorhanden sein muss. Das Verhalten der Schmelze wird wie zuvor mittels dreier Anfangspunkte beschrieben. Bei der ersten Variante handelt es sich um eine eutektische Legierung. Diese kühlt bis zur Temperatur T_E ab und erstarrt zum Eutektikum, einem feinem Korngemisch aus Mischkristallen α und β . Verteilen sich Fremdatome mit passendem Durchmesser und entsprechender Elektronenkonfiguration gleichmäßig im Gitter eines Grundmetalls, lösen sie sich darin auf und es ergibt sich eine feste Lösung. Mischkristalle sind Kristalle mit gelösten Fremdatomen und können in Austauschmischkristalle und Einlagerungskristalle unterschieden werden [106]. Die α -Mischkristalle enthalten das Grundmetall A und Fremdatome B. Bei β -Mischkristallen ist das Verhältnis genau umgekehrt. Ist die Legierung zusammengesetzt wie in Punkt 2, dann kühlt die Schmelze zunächst bis zur Liquiduslinie ab und es werden erste Kristalle fest. Deren Zusammensetzung

entspricht der Konzentration, die sich ergibt, wenn vom Schnittpunkt mit der Liquiduslinie horizontal zur Soliduslinie gegangen wird. Somit handelt es sich hierbei um α -Mischkristalle. Kühlt die restliche Schmelze weiter ab, so erhöht sich die Konzentration der Mischkristalle. Da die Mischkristalle einen geringen Anteil an Fremdatomen von B haben, nimmt deren Anteil in der Schmelze zu. Bei der Temperatur T_E - der Solidustemperatur - erstarrt die restliche eutektische Masse. Das Gefüge besteht bei Raumtemperatur aus α -Mischkristallen, umgeben von dem Eutektikum.

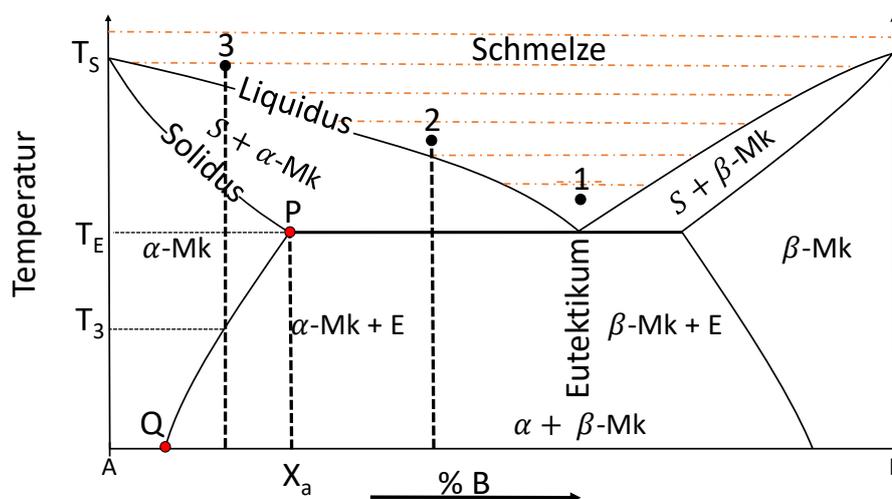


Abbildung 2.16: Zustandsdiagramm mit teilweiser Löslichkeit der Fremdatome in A und B. α - und β -Mischkristalle bilden das Eutektikum [106].

Wird bei dem Verhältnis in Punkt 3 gestartet, kühlt die Masse zunächst ab, besitzt bei der Erstarrung jedoch kein eutektisches Gefüge. In dem Bereich links des Punkts P kann kein Eutektikum auftreten. Die Umwandlungskennlinie PQ wird bei der Temperatur T_3 erreicht und ab hier beginnt auf Grund von Diffusion die Umwandlung in den festen Zustand. Die Umwandlungskennlinie bestimmt die Grenze für die Löslichkeit von B-Atomen in A. Deswegen werden bei Unterschreitung B-Atome ausgeschieden, was in Form von winziger β -Mischkristalle geschieht. Letztendlich besteht das Gefüge aus α -Mischkristallen und feinen, gleichmäßig verteilten β -Mischkristallen, die manchmal auf Korngrenzen ausgeschieden werden. Für das Ausscheidungshärten ist die Bildung der β -Phase im festen Korngefüge von großer Bedeutung.

2.4.4 Eigenschaften der Aluminiumlegierung $AlSi_9Cu_3$

Für mehr als 80 % der im Druckgießverfahren hergestellten Bauteile wird die Legierung $AlSi_9Cu_3$ eingesetzt [108]. Tabelle 2.1 zeigt die Unterteilung der Normzusammensetzung in einen unteren, mittleren und oberen Konzentrationsbereich. Die restlichen Mengenanteile der Bereiche sind stets Aluminium. Bei Legierungen mit Aluminium, Kupfer und Silizium wird deren Verhalten maßgeblich durch das Verhältnis von Kupfer zu Silizium beeinflusst. Bei einem größeren Kupferanteil wird das Bauteil steifer und bearbeitbarer. Silizium hingegen stärkt die Gießbarkeit und reduziert die Warmsprödigkeit [96]. Welchen Einfluss bereits geringe Veränderungen der Zusammensetzung haben, kann bei der Betrachtung der Bruchdehnung und der Dehngrenze $R_{p0,2}$, also derjenigen Spannung, bei der eine Dehnung von 0,2 % in Bezug auf den Anfangszustand erhalten bleibt, gesehen werden. In Tabelle 2.2 sind die Werte für die jeweiligen Bereiche angegeben [108].

	Legierungsgehalt in % (Massenanteil)						
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ti	Zn
Unterer Bereich	8,0-9,0 8,42	0,6-0,7 0,613	2,0-2,5 2,07	0,1-0,2 0,162	0,05-0,10 0,058	0,05-0,08 0,067	0,20-0,30 0,225
Mittlerer Bereich	9,5-10,0 9,84	0,8-0,9 0,807	2,8-3,2 2,99	0,35-0,40 0,333	0,20-0,30 0,214	0,09-0,12 0,106	0,60-0,12 0,653
Oberer Bereich	10,5-11,0 10,68	1,2-1,3 1,25	3,6-4,0 3,67	0,45-0,55 0,468	0,45-0,55 0,506	0,21-0,25 0,213	1,10-1,20 1,12

Tabelle 2.1: Legierungsgehalt von $AlSi_9Cu_3$ [108].

	Dehngrenze [MPa]	Bruchdehnung [%]
Unterer Bereich	146,1	8,1
Mittlerer Bereich	198,4	3,9
Oberer Bereich	252,5	1,7

Tabelle 2.2: Mechanische Eigenschaften von $AlSi_9Cu_3$ in Abhängigkeit der Komponenten.

Die genauen Eigenschaften der $AlSi_9Cu_3$ -Legierung können der Tabelle A.2 im Anhang entnommen werden. Da sich die Temperatur im Guss in einem Bereich bis zu 700 °C bewegt, muss auf temperaturabhängige Parameter genauer eingegangen

werden. Der thermische Ausdehnungskoeffizient verhält sich über den Bereich nicht konstant, kann aber mittels der Längenausdehnung aus Gleichung 2.44 berechnet werden und α_T ergibt sich mit Gleichung 2.45 [96].

$$l_T = l_0 \left[1 + C \left(0,0100926 \frac{T^2}{K^2} + 22,300848 \frac{T}{K} + 393,26976 \right) 10^{-6} \right] \quad (2.44)$$

$$\alpha_T = \frac{\Delta l_T}{l_0 \Delta T} \quad (2.45)$$

Hierbei ist C eine materialabhängige Konstante und ist für die benutzte Legierung mit einem Wert von 0,895 angegeben. Für die Gießversuche wird die Legierung auf ungefähr 740 °C erhitzt und bei 700 °C eingegossen. Bei ca. 600 °C beginnt die Erstarrung und wird im Wesentlichen durch die Ausscheidung von α -Kristallen bestimmt, die sich als strauch- und baumförmige Kristalle, den Dendriten, ausbilden und ungefähr 35 % des Gefüges abdecken [109, 108].

Bei einer Temperatur von 570 °C beginnt die eutektische Reaktion. Das Eutektikum erstreckt sich über einen fs-Bereich von 0,35 bis 0,85 ohne dass eine merkliche Temperaturänderung auftritt. Es hat einen Anteil von etwa 50 % des Gefüges. Nachfolgend bilden sich nacheutektische Phasen wie Al_2Cu und komplexe Mehrstoffphasen. Diese nehmen ungefähr einen Anteil von 15 % ein.

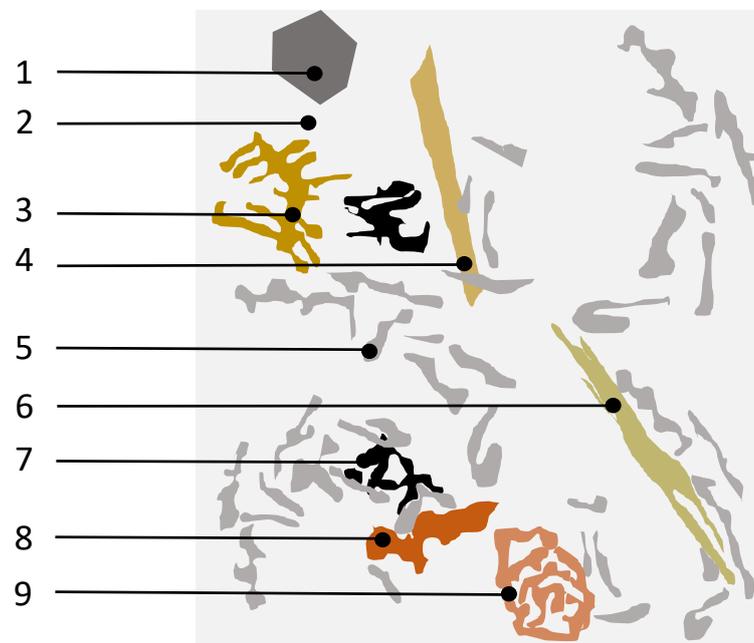


Abbildung 2.17: Gefügeausbildung der Legierung $AlSi_9Cu_3$ [108].

In Abbildung 2.17 ist ein schematischer Schliff der Legierung zu sehen und Tabelle 2.3 gibt nochmals die temperaturabhängige Bildung der Phasen an. Bei einer chemischen Zusammensetzung der Legierung im oberen Bereich setzt die Erstarrung früher ein und es bilden sich zusätzliche vordentritische Phasen wie $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$, die ca. 3 % des Gefüges ausmachen.

	T in °C	Phase	Bildungszeitpunkt
1	650	$Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$ (primär)	vordentritisch
2	600	$\alpha - Al - Dendriten$	dendritisch
3		und $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$	nachdentritisch
4		und/oder Al_5FeSi	voreutektisch
5	550	(Al+Si)-Eutektikum	eutektisch
6		und Al_5FeSi	ko-eutektisch
7	540	Mg_2Si ($Mg > 0,2\%$)	nacheutektisch
8	520-540	Al_2Cu	nacheutektisch
9	480-500	Komplexe Mehrstoffphasen (mit Si, Fe, Mg, Cu und Zn)	nacheutektisch

Tabelle 2.3: Gefügeausbildung der Legierung $AlSi_9Cu_3$ [108].

2.4.5 Arten von Eigenspannungen

Spannungen in einem System, auf das keine äußeren Kräfte oder Momente wirken, werden im allgemeinen Sinn als Eigenspannungen bezeichnet. Die inneren Kräfte und Momente, die mit den Eigenspannungen verbunden sind, stehen im mechanischen Gleichgewicht. Die Summe der inneren Kräfte bezüglich jeder Schnittfläche durch das abgeschlossene System ist gleich null. Zudem verschwindet die Summe der inneren Momente bezüglich jeder Achse [2]. Werden die nichtmechanischen Zustandsgrößen betrachtet, die mechanische Wirkungen hervorrufen können, ist das System abgeschlossen und im Gleichgewicht. Temperaturunterschiede oder ähnliches sind als nichtmechanischen Einwirkungen von außen zu sehen und die dadurch entstehenden Spannungen werden ebenso als Lastspannungen angesehen wie solche, die auf äußere Kräfte zurückzuführen sind. Somit werden diese auch nicht als Eigenspannungen gesehen, wenn sie durch die Einstellung stationärer Bedingungen über lange Zeiten konstant gehalten werden. Eigenspannungen können laut [2] in

drei Kategorien eingeteilt werden, die sich auf den stofflich zusammenhängenden vielkristallinen Verband beziehen. Wird von homogen gesprochen, so bedeutet dies im folgenden konstant in Größe und Richtung, womit sich die drei Eigenspannungsdefinition anbieten.

1. Über einen größeren Werkstoffbereich, wie mehrere Körner, nahezu homogene Eigenspannungen werden der I. Art zugeordnet. Die inneren Kräfte, bedingt durch Eigenspannungen I. Art, sind bezüglich jeder Schnittfläche durch den ganzen Körper im Gleichgewicht. Der gleiche Effekt tritt bei den inneren Momenten bezüglich jeder Achse auf. Wird das Kräfte- oder Momentengleichgewicht durch Eingreifen geändert, so treten immer makroskopische Maßänderungen auf.
2. Sind Eigenspannungen über kleinere Werkstoffbereiche wie ein Korn oder Kornbereiche nahezu homogen, werden diese den Eigenspannungen II. Art zugeordnet. Die durch solche Spannungen bedingten Kräfte oder Momente sind über hinreichend viele Körner im Gleichgewicht. Wird in dieses Gleichgewicht eingegriffen, so können makroskopische Maßänderungen auftreten.
3. Bei Eigenspannungen III. Art handelt es sich um inhomogene Spannungen über kleinste Werkstoffbereiche, die sich über mehrere Atomabstände ziehen. Die dadurch bedingten Momente und Kräfte sind in kleinen Bereichen, also hinreichend großen Teilen des Korns, im Gleichgewicht. Im Gegensatz zur I. und II. Art treten hier beim Eingreifen in dieses Gleichgewicht keine makroskopischen Maßänderungen auf.

Die drei Arten der Eigenspannungen treten in einem Werkstoff nur überlagert auf. Gitterstörungen auf atomarer Ebene haben Eigenspannungen der III. Art als Ursache. Sie treten beispielsweise bei Einlagerung von Fremdatomen ins Gitter oder in Korngrenzen auf. Besitzen zwei Phasen unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten, so kann dies Eigenspannungen II. Art verursachen. Da diese nur über kleine Bereiche wirken, sind sie schwer zu bestimmen [110, 111]. Durch den größeren Einfluss der I. Art, hat nur diese eine praktische Bedeutung für den Verzug, weswegen nur auf diese genauer eingegangen wird.

Wird ein metallischer Körper hinreichend schnell abgekühlt, so treten zwischen dem Rand- und Kernbereich auf Grund des Temperaturunterschieds Eigenspannungen I. Art auf. In Abbildung 2.18 ist rechts oben der Temperaturverlauf eines

zylindrischen Körpers, der als thermisch und elastisch isotrop, homogen und umwandlungsfrei angenommen wird. In dem linken Teil der Abbildung 2.18 sind die Ausdehnungszustände des Kerns und des Rands zu spezifizierten Zeitpunkten aufgezeigt. Zunächst bewirkt der sich stärker zusammenziehende Rand die Ausbildung von Zugspannungen in den Randpartien und Druckspannungen in den Kernpartien des Körpers. Die dadurch entstehenden Spannungen sind rechts in der Abbildung 2.18 zu sehen, mit der Annahme, dass keine plastischen Verformungen stattfinden. Sind die Temperaturdifferenzen groß genug, so werden die Fließgrenzen des Werkstoffes bei den jeweils örtlich und zeitlich gerade vorliegenden Temperaturen überschritten und die plastische Verformung setzt in den Randbereichen ein [2]. Ist der zylindrische Körper sehr lang, also wenn gilt $l/d > 4$, kann die Verformung auf die Randgebiete beschränkt werden, da sich im Kern wegen der Mehrachsigkeit starke Fließhinderungen einstellen. Ist der maximale Temperaturunterschied ΔT überschritten, endet die plastische Verformung zunächst. Durch den einsetzenden Temperaturengleich vermindert sich die Zugspannung im Rand und die Druckspannung im Kern, bis letztendlich eine Spannungsumkehr auftritt, die jedoch nicht im ganzen Querschnitt simultan vorliegt. Ab der Spannungsumkehr bilden sich nach vollständigem Temperaturengleich im Kern Zug- und im Rand Druckeigenstress aus, da vor allem der Kern schrumpft. Die Streckgrenze in der Ausgleichsphase kann nochmals überschritten werden, wenn die Anfangstemperatur ausreichend hoch und die Abschreckung schroff war. Dadurch wird der Körper vor allem im Randbereich zusätzlich leicht kaltverformt [112]. Neben den besprochenen thermischen Eigenstressungen können noch durch Umwandlungen hervorgerufene Eigenstressungen auftreten. Nimmt das Volumen zu, so verursacht der zuletzt umwandelnde Kern zunächst Zugspannungen im Rand und Druckspannungen im Kern. Im umgekehrten Fall tritt eine Vorzeichenumkehr auf. Ist die Umwandlungstemperatur so hoch, dass die Spannungen, die durch die Volumenänderung hervorgerufen werden, weitgehend plastisch ausgeglichen werden, so gilt das mit Abbildung 2.18 Verhalten im Wesentlichen weiter. Tritt jedoch der Fall einer zu geringen Umwandlungstemperatur ein, so dass im Fall der Volumenzunahme bei der Umwandlung des Kerns gebildete Zugspannungen und Druckspannungen im Kern nicht mehr durch den Temperaturengleich am Ende abgebaut werden können, dann ist die Eigenstressverteilung durch diese Umwandlung geprägt. Typische Umwandlungseigenstressungen sind Druckeigenstressungen im Kern und Zugeigenstressungen

am Rand. Im Fall einer Volumenabnahme tritt eine ähnliche Eigenspannungsverteilung wie bei der Abschreckung ohne Umwandlung auf, jedoch sind die Beträge der sich ergebenden Eigenspannungen größer. Auf weitere Effekte bei der Bildung von Spannungen in der erstarrenden Schmelze wird nicht eingegangen, da deren Effekte nicht relevant sind für diese Arbeit.

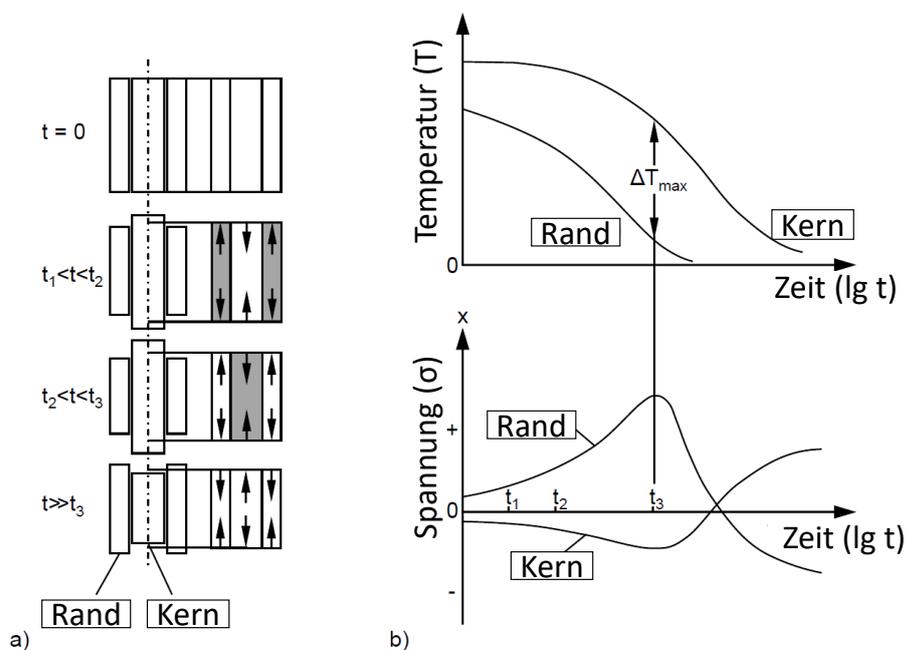


Abbildung 2.18: Ausbildung thermischer Eigenspannungen I. Art in einem Zylinderkörper [112].

2.5 Eigenschaften von Sandstein

Wie bereits beschrieben soll in dieser Arbeit ein Ansatz zur Strukturüberwachung für die Lorenzkirche in Nürnberg gefunden werden. Hierfür wird in diesem Abschnitt die Grundlage für die Vorgänge im Gestein geschaffen. Da es sich bei dem verwendeten Baumaterial um Sandstein handelt, werden die Stoffkennwerte für diesen detailliert beschrieben.

2.5.1 Grundbegriffe

Zu Beginn müssen einige Grundbegriffe definiert werden, die für die folgenden Punkte grundlegend von Bedeutung sind [113]:

Gesteine

Ein Gemenge von Mineralen, eher selten nur aus einem, das sich durch natürliche Vorgänge zu einem geologischen Körper verbindet, wird als Gestein bezeichnet. Zudem kann es auf Gesteinsbruchstücken, biogenen (z. B. Kohle) oder amorphen Substanzen (z. B. Glas) basieren

Minerale

Minerale besitzen fest definierte Eigenschaften und bestimmen in dem Körper, dessen Bestandteil sie sind, das Verhalten bezüglich Temperaturänderung, mechanischem Verhalten usw.. Sie sind natürliche anorganische Festkörper, also eine chemische Verbindung, die chemisch und physikalisch homogen ist. Minerale besitzen in der Regel eine feste Struktur, sind damit kristallin, und haben ihren Ursprung in einem geologischen Prozess.

Kristalle

Die entscheidende Eigenschaft von Kristallen ist deren dreidimensionale regelmäßige Anordnung ihrer atomaren Bausteine. Besitzt ein Feststoff keine solche Anordnung, so wird dieser als amorph definiert. Ein Beispiel für einen solchen amorphen Stoff ist Glas.

Fluide

Fluide sind sowohl im Erdmantel als auch in der Erdkruste verbreitet und sind Gemische aus Flüssigkeiten, Gasen und darin gelösten Salzen. Sie sind zumeist aus verschiedenen Komponenten wie H_2O , CO_2 , CH_4 oder gelösten Salzen zusammengesetzt, die die physikalischen Eigenschaften eines Gases haben, sobald sie sich über ihrem kritischen Punkt befinden. Fluide können sowohl als Einschlüsse in Mineralen als auch frei aufgefunden werden.

2.5.2 Zusammensetzung und Aufbau

Sandstein wird in die Gruppe der Natursteine eingeteilt, da er auf natürliche Weise entstanden ist. Der Abbau solcher Gesteine erfolgt in der Regel im Steinbruch oder sie werden als Feldsteine aufgelesen [114]. Natursteine sind eine Komposition aus Mineralien bzw. Mineralgemengen, die die charakteristischen Eigenschaften des Gesteins bestimmen. Für die Gesteinsbildung sind vor allem Silikate (z.B. Feldspat, Quarz, Glimmer) und Nichtsilikate (z.B. Kalkspat, Dolomit, Gips) von Bedeutung. Tabelle 2.4 zeigt die Hauptgruppen von Gesteinen auf Grund ihrer Entstehung. Die Erstarrungsprodukte von Magmen und Laven werden als Magmatite bezeichnet. Handelt es sich um Tiefengesteine, so ist die Erstarrung in Tiefen zwischen 2 km und 6 km geschehen. Bei Erdgussgesteinen hingegen hat diese in sehr geringer Tiefe, jedoch meistens außerhalb der Erdkruste statt gefunden. Die Gruppe der Sedimentgesteine ist durch Verwitterungsprodukte und deren schichtweisen Ablagerung entstanden. Sandstein fällt in die Untergruppe der klastischen Sedimente, die aus Gesteinstrümmern, Ausfällungsgesteinen und biogenen Sedimenten bestehen. Die Gruppe der metamorphen Gesteinen basiert auf einer nachträglichen Umwandlung von Erstarrungs- und Ablagerungsgesteinen unter hohen Temperaturen und Umgebungsdrücken oder unter chemischer Einwirkung gelöster oder gasförmiger Stoffe.

Hauptgruppe	Untergruppe	dazugehörige Natursteine
Metamorphe Gesteine (Metamorphite, Umwandlungsgesteine)	abhängig von Druck und Temperatur	Gneis, Marmor
Sedimentgesteine (Sedimentite, Ablagerungsgesteine)	Klastische Sedimente (Trümmergestein)	Sandstein, Grauwacke
	Ausfällungsgesteine	Kalkstein, Dolomit
	Biogene Sedimente	Kieselschiefer, Kalkstein
Erstarrungsgesteine (Magmatite, Glutflussgesteine)	Tiefengestein	Granit, Diorit, Gabbro
	Ergussgestein	Porphyry, Basalt, Bims, vulkanische Tuffe

Tabelle 2.4: Einteilung der Natursteine [114]

Sandstein ist ein Festgestein, aus gerundeten bis kantigen Körnern bzw. Ge-

steinsfragmenten mit einem definierten Korngrößenintervall. Die Sandsteinkörner haben einen Durchmesser im Bereich von 0,063 mm und 2 mm [115, 116]. Die drei wesentlichen Prozesse bei der Entstehung der Sandsteine beeinflussen sowohl die Korngrößen als auch den Mineralbestand. Diese sind die Verwitterung der ursprünglichen Gesteine, Transport und Diagenese. Diagenese beinhaltet alle Prozesse, die bei der Umwandlung der ursprünglichen Sedimente hin zum sedimentären Gestein involviert sind. Es ist ein kontinuierlicher Prozess, in dem Anhäufungen von sedimentären Mineralen reagieren, um ein Gleichgewicht mit der Umwelt herzustellen. Dieses Gleichgewicht bezieht sich auf wechselnden Umgebungsdruck, Temperatur und chemische Umgebung [117]. Einer der Hauptbestandteile von Sandstein ist Quarz (SiO_2), der äußerst resistent gegen Verwitterung und beständig beim Transport ist. Weitere Bestandteile sind Feldspat, Gesteinsbruchsteine, Schichtsilikate wie Glimmer, Chlorit oder Glaukonit.

Die Festigkeit von Sandstein wird maßgeblich durch den Zusammenhalt des Korngerüsts bestimmt, das in drei Gruppen unterteilt werden kann. Die Differenzierung bezieht sich auf das Bindemittel, das kieselig, karbonatisch oder tonig sein kann. Bei tonigen Bindemitteln erfolgt die Verfestigung durch eine Verdichtung, wohingegen es sich bei kieseligen und karbonatischen Bindemitteln um chemische Prozesse (Zementation) handelt. Zementation wird die Kristallisation von Mineralen zwischen den einzelnen Sedimentkörnern genannt [113, 118]. Zwei der häufigsten Mineralen sind das kieselige Bindemittel Siliziumdioxid und das karbonatische Bindemittel Calciumcarbonat bzw. Calcit. In der Realität treten die Bindungsvarianten nicht alleine auf, sondern in Kombination. Je nach Anteil der Bindungsmethode unterscheiden sich die Eigenschaften des Steins. So verleiht ein hoher Anteil an kieseliger Bindung dem Stein eine besonders hohe Festigkeit und Resistenz gegen Verwitterung [115]. Ein großer Anteil karbonatischer Bindungen macht das Gefüge sehr anfällig gegen chemische Verwitterungseinflüsse. Bei vorwiegend toniger Bindung ist der Stein oft sehr porös und neigt zum hygrischen Quellen. Darüber hinaus weist er eine geringere Festigkeit und Resistenz gegen Verwitterungseinflüsse im Vergleich zu kieseligen Bindungen auf. Abbildung 2.19 zeigt verschiedene Arten von Korngerüsten. Links wird das Korngerüst rein durch Korn-Korn-Kontakte und rechts durch eine umgebende Matrix zusammengehalten. In der Mitte ist eine Mischform der beiden Varianten zu sehen, die der realen Struktur des Steins entspricht. Sandsteine können abhängig von der Art der Kornkomponenten und dem Mengenanteil der

Körner klassifiziert werden. Die Einteilung erfolgt zum einen nach Mengenanteil der Matrix bzw. Körner und zum anderen quantitativ nach Anteilen der Hauptkomponenten Quarz, Feldspat und Gesteinsbruchstücken. In Abbildung 2.20 ist eine schematische Klassifizierung der Sandsteine gezeigt.

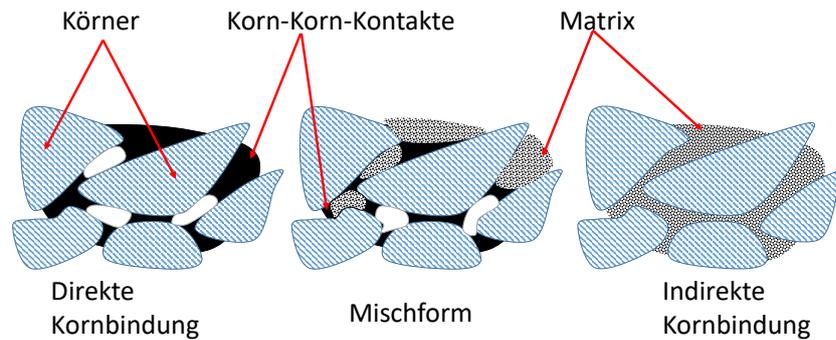


Abbildung 2.19: Verschiedene Arten von Korngerüsten. Links ist eine Verbindung mittels Korn-Korn-Kontakten, rechts durch eine Umgebungsmatrix und in der Mitte eine Mischform gezeigt [119].

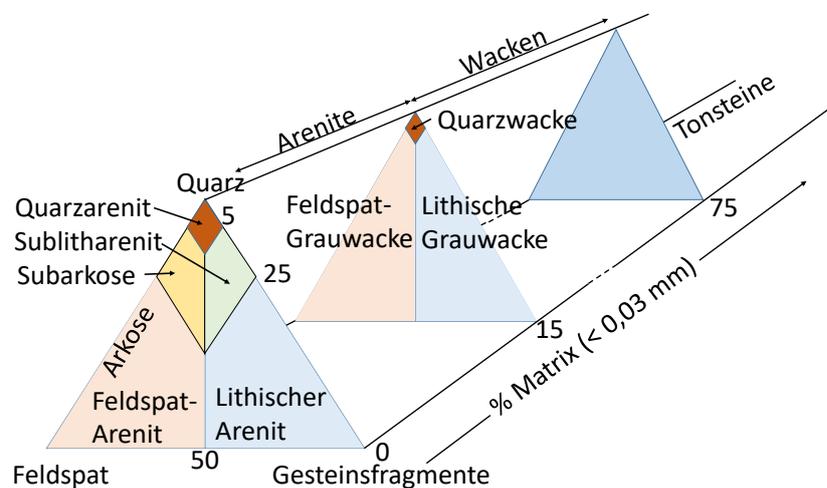


Abbildung 2.20: Klassifikation der Sandsteine nach Dott und Folk [120].

In dem vorderen Dreieck werden an den Eckpunkten die Hauptbestandteile aufgetragen und es enthält alle Gesteine, deren Matrixgehalt unter 15 % beträgt. Im hinteren Dreieck sind dann die Gesteine enthalten, deren Matrix einen Anteil von

15 % bis 75 % enthält. Zum Begriff der Matrix werden auch alle Körner gezählt, deren Durchmesser unter $30 \mu\text{m}$ beträgt. Unter einem Matrixanteil von 15 % wird von Areniten gesprochen, die auch als eigentliche Sandsteine bezeichnet werden und sich auf Grund ihrer Tragfähigkeit besonders als Baumaterial eignen [120]. In dieser Arbeit wird explizit der Worzeldorfer Sandstein, auch Nürnberger Quarzit, Worzeldorfer Quarzit oder Wendelsteiner Quarzit genannt, verwendet. Dieser wird in Worzeldorf südlich von Nürnberg im Lorenzer Reichswald abgebaut. Dieser ist kein reiner Quarzit, sondern ein kieselig gebundener Sandstein und gehört in die Löwenstein-Formation, auch Burgsandstein genannt. Der Worzeldorfer Sandstein ist verwitterungsbeständig, weswegen er sich als Baumaterial eignet. In [121] wurden 16 Proben des Worzeldorfer Sandsteins untersucht. Der Quarzgehalt beträgt durchschnittlich über 80 %, 9 % - 17 % Feldspat, 0 % - 6 % Muskovit und tonhaltige Materialien. Die Dünnschliff-Mikroskopie zeigt, dass 74 % - 80% monokristalliner, 15 % - 20 % polykristalliner Quarz und 4 % - 6% Siliziumdioxid sind.

Nachfolgend soll hier noch auf vier Parameter von Natursteinen eingegangen werden. Die Steindruckfestigkeit f_c gibt denjenigen Spannungswert für eine Druckbelastung an, bei dem sich ein Bruch einstellt [122]. Diese kann mittels Gleichung 2.46 berechnet werden, wobei F_c die Bruchlast in Newton und A die Querschnittsfläche in m^2 ist.

$$f_c = \frac{F_c}{A} \quad (2.46)$$

Das Pendant zur Druckfestigkeit stellt die Zugfestigkeit in Gleichung 2.47 dar.

$$f_t = \frac{F_t}{A} \quad (2.47)$$

Zwei weitere Faktoren sind der E-Modul E und die Querdehnzahl ν . Neben dem Mineralabstand und dem Korngefüge wirkt vor allem die Porosität auf die genannten Parameter. Diese gibt den luft- oder flüssigkeitsgefüllten Anteil des Gesamtgesteinsvolumens an und besitzt deswegen die Einheit % [123]. Ein großer Prozentsatz der Porosität wirkt sich somit negativ auf die Druckfestigkeit und den E-Modul aus. Zudem sind Natursteine mit einer hohen Porosität anfälliger gegenüber Verwitterung. Tabelle 2.5 gibt die Stoffkennwerte unterschiedlicher vorkommender Sandsteine [114].

		f_c	f_t	E statisch	E dynamisch	ν
Handelsname	Klassifikation	$\frac{MN}{m^2}$	$\frac{MN}{m^2}$	$\frac{MN}{m^2}$	$\frac{MN}{m^2}$	-
Obernkirchner Sandstein	kieselig	96 -	3,2 -	12200 -	17300 -	0,02 -
		97	3,8	12300	18500	0,026
Brugpreppacher Sandstein	Quarzsandstein	39 -	1,3 -	5700 -	15300 -	0,018 -
		40	1,5	7000	16500	0,032
Ebenheider Sandstein	tonig-ferritisch gebundener Sandstein	41 -	1,1 -	4100 -	6700 -	0,045 -
		44	2,2	7900	12400	0,085
Sander Sandstein	tonig- gebundener Sandstein	37 -	1,9 -	3600	11200 -	0,012 -
		44	2,6		12500	0,016
Schleeriether Sandstein	tonhaltiger Sandstein	52 -	2,2 -	14300 -	14300 -	0,031 -
		56	3,6	20100	20100	0,034

Tabelle 2.5: Kenndaten verschiedener Sandsteintypen nach [114].

2.5.3 Thermische Eigenschaften

Auf die Erhöhung der Temperatur reagieren die meisten Stoffe mit einer Volumenzunahme und im Gegenzug auf Abkühlung mit einer Volumenabnahme. Die Energiezustände der einzelnen Atome werden durch die Zufuhr von Wärmeenergie verändert. Somit verschiebt sich der Mittelpunkt der Schwingungsebene und daraus folgt eine Vergrößerung der Gitterabstände. Im energieärmsten Zustand befindet sich ein Atom am Boden des Potentialtopfes, wie in Abbildung 2.21 zu sehen, dessen Höhe durch die Bindungsenergie E_B gegeben ist. Diese Energie ist ein Maß für die Bindung der einzelnen Atome [124]. Bei einer Steigerung der Schwingungsenergie der Einzelatome kann diese größer werden als die Bindungsenergie des Kristallverbands, wodurch sich dieser auflöst. Bei einer symmetrischen Potentialtopfmulde würden die Atome gleichmäßig um ihre Ruhelage pendeln und ihr Abstand voneinander bliebe damit gleich, was zu konstanten Abmessungen des Kristalls führen würde. Jedoch liegt hier der asymmetrische Fall vor und der Schwingungsmittelpunkt der Atome verschiebt sich, wie in Abbildung 2.21 zu sehen ist. Dadurch verändern sich die Abstände der Atome und der Gesamtkörper

dehnt sich aus. Bei höheren Temperaturen ist die Ausdehnung des Gesamtkörpers somit am größten bis der Schmelzvorgang erreicht wird. Die Asymmetrie der Mulde ist bei niederen Energien, also geringeren Temperaturen, kleiner, weswegen die thermische Ausdehnung in diesem Bereich geringer ist als bei höheren Temperaturen. Wird nun das Verhalten eines Körpers über ein breites Temperaturintervall betrachtet, so kann nicht von einem linearen thermischen Ausdehnungskoeffizienten α ausgegangen werden, sondern muss für den jeweiligen Temperaturbereich betrachtet werden.

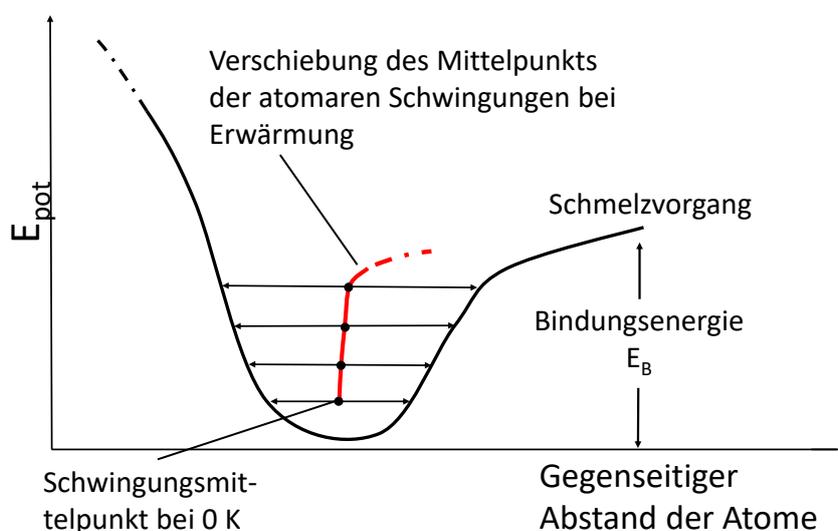


Abbildung 2.21: Die Schwingungszustände der Atome im Festkörper-Potentialtopfmodell.

Zu niedrigeren Temperaturen hin nimmt der thermische Ausdehnungskoeffizient ab und die Änderung Δl der ursprünglichen Länge l_0 bei 0°C kann mit Hilfe von α und der Temperatur T berechnet werden [125, 126]:

$$\Delta l = l_0 \alpha T \quad (2.48)$$

Durch Umstellen von Gleichung 2.48 kann auf die aktuelle Länge l_T geschlossen werden.

$$l_T = l_0 (1 + \alpha T) \quad (2.49)$$

Der thermische Ausdehnungskoeffizient von verschiedenen Gesteinen ist im Anhang in Tabelle A.1 gezeigt. Die Ausdehnung von Gesteinen ergibt sich als Superposition der Einzelkomponenten, weswegen es notwendig ist, das Verhalten der

Minerale zu untersuchen. Abbildung 2.22 zeigt die Struktur von Quarz, Calcit und Aragonit. Da der Hauptbestandteil des Worzeldorfer Sandsteins Quarz ist, muss dessen Verhalten genauer analysiert werden. Der Quarzkristall wird in die Achsen a, b und c aufgeteilt, wobei sich die c-Achse anders verhält als die a- und b-Achsen.

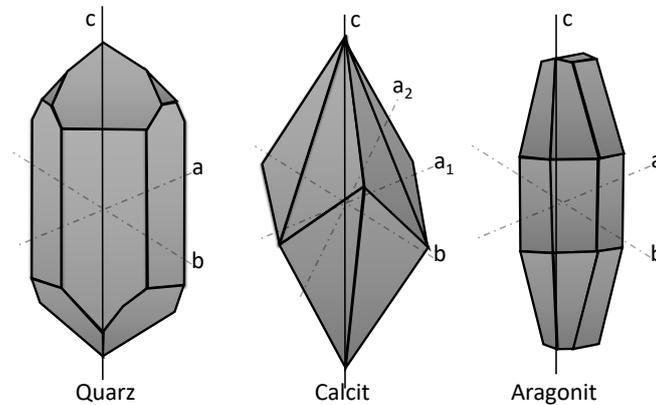


Abbildung 2.22: Struktur eines Quarz-, Calcit- und Aragonitkristalls.

In Tabelle 2.6 sind die thermischen Ausdehnungskoeffizienten α_i und die Zuwachskoeffizienten λ_i gezeigt. Je nach Achse unterscheiden sich die Ausdehnungskoeffizienten immens. Quarz besitzt entlang der c-Achse eine Ausdehnung von ca. $7 \mu m/m$ pro Kelvin Temperaturunterschied. In Richtung der a-Achse verdoppelt sich dieser Wert fast und beträgt ungefähr $13 \mu m/m$ pro Kelvin. Neben dem thermischen Ausdehnungskoeffizienten beeinflusst auch der Zuwachskoeffizient die Dehnung [127]. Ist beispielsweise α_1^0 der Ausdehnungskoeffizient bei 0° so gilt zum Zeitpunkt t, $\alpha_1^t = \alpha_1^0 + \lambda_1 t$.

	a - Richtung		b - Richtung		c - Richtung	
	α_1	λ_1	α_2	λ_2	α_3	λ_3
	$10^{-6}K^{-1}$	$10^{-8}K^{-1}$	$10^{-6}K^{-1}$	$10^{-8}K^{-1}$	$10^{-6}K^{-1}$	$10^{-8}K^{-1}$
Aragonit	15,72	3,68	33,25	3,36	9,90	0,64
Quarz	13,24	2,38	-	-	6,99	2,04
Calcit	-5,7	4,48	-	-	-	-

Tabelle 2.6: Zuwachskoeffizient λ und linearer Ausdehnungskoeffizient von Aragonit, Quarz und Calcit [127].

2.5.4 Hygrische Eigenschaften

Neben den Ausdehnungen bedingt durch thermische Veränderungen spielt die hygrische Dehnung, also Quellung, eine entscheidende Rolle. Lagern sich Fluide um die Körner an, so vergrößert sich der Abstand zwischen ihnen und es kommt durch die Aufweitung des Gefüges zu einer Dehnung [116]. Für die Betrachtung des Einflusses der Feuchte auf die Ausdehnung des Sandsteins muss zwischen volumen- und massenbezogener Feuchte unterschieden werden. In Gleichung 2.50 ergibt sich die massenbezogene Feuchte u_m durch die Division der Masse des Wasser m_W durch die des Sandsteins m_S . Analog hierzu ergibt sich die volumenbezogene Feuchte u_v [128].

$$u_m = \frac{m_W}{m_S} \quad (2.50)$$

$$u_v = \frac{v_W}{v_S} \quad (2.51)$$

Mit der Definition der Feuchte kann die hygrisch bedingte Dehnungsänderung $\Delta\varepsilon_H$ wie die thermische Dehnung angegeben werden:

$$\Delta\varepsilon_H = \alpha_H \Delta u_m \quad (2.52)$$

In Gleichung 2.52 gibt Δu_m die Änderung des Feuchtegehalts und α_H dem hygrischen Dehnungskoeffizienten an. In Vergleich zum thermischen Ausdehnungskoeffizienten verhält sich der hygrische jedoch in hohem Maße nichtlinear. Neben der Porosität bestimmen die Art der Kornbindungen das hygrische Verhalten wesentlich. Ein hoher Anteil an Tonmineralen im Steingefüge bedingt beispielsweise eine ausgeprägte hygrische Verformung. Die Einlagerung von Wasser geschieht hier zwischen den Silikatschichten der Tonmineralen und trägt somit zur Quellung bei. Daneben dringen weitere Wassermoleküle aufgrund des osmotischen Drucks zwischen die Tonlagen, was das osmotische Quellen des Gesteins auslöst. Überwiegt die quarzische Kornbindung im Sandstein, so zeigen diese eine Volumenexpansion bei Wasseraufnahme. Diese kann vor allem bei Kapillarkondensationsvorgängen beobachtet werden. Ab einer relativen Luftfeuchte von etwa 45 % nehmen die hygrischen Dehnungen zu und das in den kleinen Kapillaren kondensierte Wasser drückt die Kapillarwandungen an den Korngrenzen auseinander und der Stein beginnt sich auszudehnen, dies wird als Spaltdruck bezeichnet [128]. Die aufgenommene Wassermenge beeinflusst die Dehnung entscheidend, weswegen auch der Prozess der

Wasseraufnahme betrachtet werden muss. Bei feinkörnigen und feinporigen Sandsteinen kann die aufgenommene Wassermenge durch eine 24-stündige Volltränkung durchaus geringer sein als die durch kapillares Saugen. Durch weiteres kann die Porenluft besser entweichen, wodurch höhere Sättigungsgrade erreicht werden.

Für die nachfolgenden Betrachtungen wird zwischen zwei Formen der Feuchte unterschieden, der hygroskopischen und der überhygroskopischen Feuchte. Das hygroskopische Feuchteverhalten beschreibt die Wasseraufnahme von Sandstein bedingt durch feuchtes Umgebungsklima und die Abgabe von Feuchte bei trockenen Verhältnissen. Befindet sich der Sandstein in einer Umgebung von über 95 % relativer Luftfeuchte oder steht er direkt in Kontakt zu Wasser, dann wird von überhygroskopischer Feuchte gesprochen [129]. In [128] wurden Untersuchungen bezüglich der hygri-schen Dehnungen gemacht. In Abbildung 2.23 ist die hygri-sche Dehnung bei hygroskopischer Feuchte gezeigt.

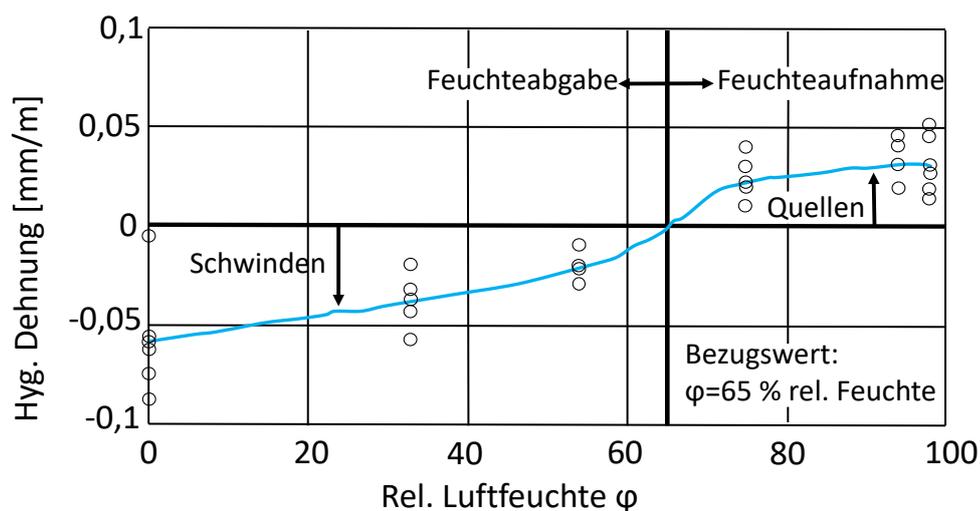


Abbildung 2.23: Hygri-sche Dehnung in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte [128].

Hierfür wurden die Proben nacheinander unterschiedlichen Lagerungsbedingungen ausgesetzt, sodass die Längenänderung jeweils an den selben Proben gemessen werden konnte. Die Temperatur wurde während den Versuchsreihen konstant auf 20 °C gehalten. Für eine eindeutige Zuordnung der Verformungsmesswerte wurde gewartet bis die Proben einen homogenen Feuchtezustand erreicht hatten. Als Refe-

renzwert für die Feuchtigkeit wurde der Wert gewählt, der sich bei einer Lagerung in einer relativen Luftfeuchtigkeit von 65 % einstellt. Somit ergibt sich bei einer niedrigeren Luftfeuchtigkeit ein Schwinden bei dem Sandstein und darüber stellt sich ein Quellen ein. Abbildung 2.24 zeigt die Auswirkung, wenn der Sandstein in direktem Kontakt mit Wasser steht. Bis auf wenige Ausnahmen ist die Vergrößerung des Sandsteins in diesem Fall größer als bei hygroskopischer Feuchte. Für den Versuch wurden die Proben wieder bei 20 °C unter Wasser gelagert und die sich dabei einstellenden Verformungen gemessen.

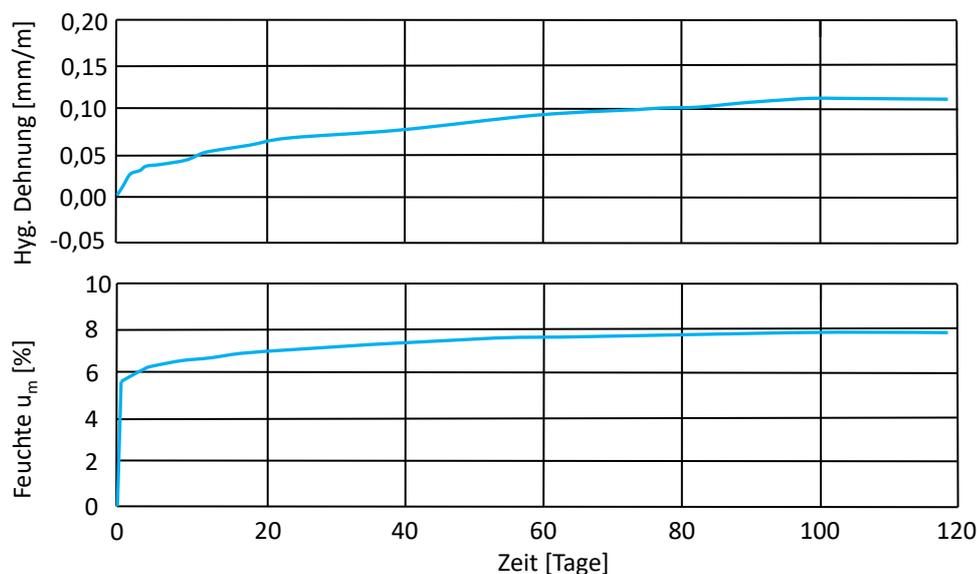


Abbildung 2.24: Quellversuche am Sandstein. Oben ist die hygrische Dehnung und unten der korrespondierende Wassergehalt gezeigt [128].

In Abbildung 2.24 wurden die erfassten Werte über 120 Tage aufgezeichnet und anschließend gemittelt. Als Ausgangszustand wurde wiederum der Dehnungszustand bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 65 % genommen. Der anfängliche Zuwachs der Dehnung ist erwartungsgemäß groß und flacht gegen Ende ab. Bemerkenswert ist, dass sich die hygrischen Dehnungen nicht proportional zu der aufgenommenen Wassermenge, die im unteren Abschnitt von Abbildung 2.24 gezeigt ist, einstellt. Es ergibt sich bei der Dehnung zu Beginn auch keine sprunghafte Erhöhung wie bei dem Feuchtegehalt. Mit dem Eindringen der Feuchtigkeit an den wasserbenetzten Oberflächen im Probenquerschnitt bzw. mit dem behinderten Quellen der äußeren Querschnittsbereiche treten Eigenspannungen auf, die die Ver-

zögerung der Dehnung erklären. Erst nach Ausgleichen der Feuchtigkeit über den Probenquerschnitt verschwinden die Eigenspannungen allmählich und die Quellverformungen beginnen. Die gesamte hygri-sche Verformung ergibt sich als Überlagerung der hygroskopischen und überhygroskopischen Feuchtedehnung.

2.5.5 Verwitterungsschäden

Die Zerfallserscheinung von Sandstein bedingt durch Verwitterung kann auf zahlreiche Einzelprozesse zurückgeführt werden [115, 130, 116]. Die auftretenden Einzelprozesse können in die drei Gruppen physikalische, chemische und biologische Verwitterung eingeteilt werden. Erstere wird grundlegend durch die mechanische Überbeanspruchung des Gesteins hervorgerufen. Es können hierbei leichte Schäden wie eine Lockerung bis hin zu einer vollständigen Zerstörung auftreten. Liegt eine Feuchte- bzw. Temperaturverwitterung vor, so werden beispielsweise durch die unterschiedlichen thermisch bzw. hygri-sch bedingten Dilatationen gesteins-schädigende Spannungen aufgebaut. Handelt es sich um eine Verwitterung verursacht durch Frost-Tau-Zyklen oder Salz, so reduziert sich der Porenraum durch entsprechende Kristallationsprozesse. Im Anschluss daran folgt der Aufbau materialschädigender Innendrucke gegen die Porenwandungen.

Vor dem Einsatz der chemischen Verwitterung tritt stets eine stoffliche Veränderung auf, die eine Auflösung bzw. Zersetzung von chemisch anfälligen Gesteinskomponenten bewirkt. Die biologische Verwitterung besteht im Grunde aus physikalischer oder chemischer Verwitterung. Eine mechanische Verwitterung kann z.B. auf dem Wurzelwachstum von Pflanzen basieren. Saure Stoffwechselwirkungen von Pflanzen und Tieren hingegen führen zu einem lösenden Angriff und werden den chemischen Einflüssen zugeordnet. Ein Überblick über die möglichen Einflussfaktoren und deren Einordnung ist in Abbildung 2.25 dargestellt.

Es soll nun noch genauer auf zwei Verwitterungsmechanismen genauer eingegangen werden, da deren Detektierbarkeit in dieser Arbeit untersucht wurde. Bei Änderungen der Temperatur treten im Gestein Volumenänderungen ein, die sich je nach Mineral unterscheiden und zu Spannungen im Material führen können. Darüber hinaus verhalten sich gewisse Minerale anisotrop, wodurch zusätzliche Spannungen auftreten. Daraus folgende Materialbeanspruchungen müssen von den Körnern, aber auch von den Korn-Korn-Kontakten abgetragen werden, da sonst Schäden entstehen. Zu diesen Belastungen kommt, dass auf Grund der oft geringen

Wärmeleitfähigkeit Temperaturgradienten entstehen, die die Spannungen wiederum verstärken. Jedoch treten Schädigungen, die durch die genannten Aspekte bedingt sind nicht schlagartig auf, sondern erzeugen Ermüdungsschäden. Weitaus diffiziler sind negative Temperaturen anzusehen, da bei einer hohen Wassersättigung eine Sprengwirkung des gefrorenen Wassers auftritt. Da diese Problemstellung eine schwer aufzulösende Variable darstellt, wurde in dieser Arbeit darauf geachtet, dass die Proben keine hohe Wassersättigung bei negativen Temperaturen besitzen.

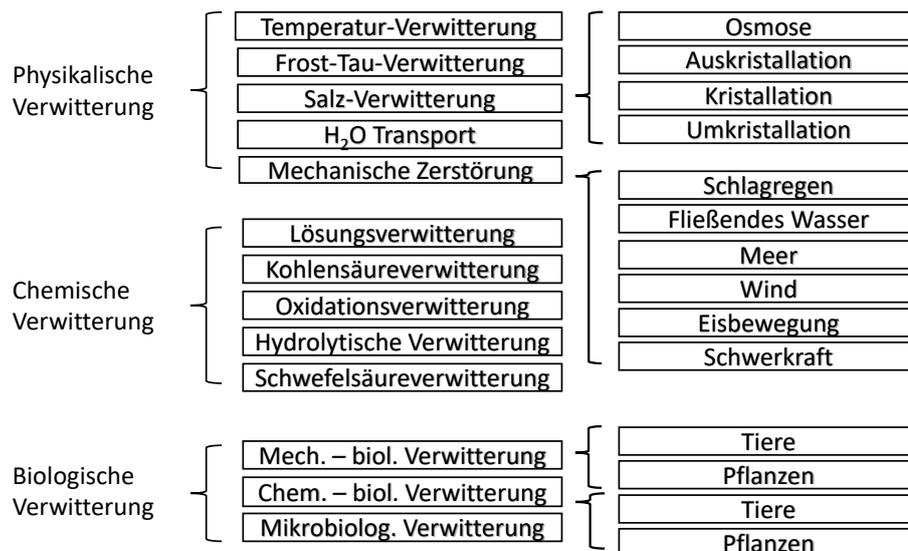


Abbildung 2.25: Mögliche Einflussfaktoren, die zu einer Verwitterung des Gesteins führen können [115].

Der Einfluss von Feuchte birgt auch bei positiven Temperaturen einen negativen Einfluss. Durch die Wasserabsorptionsvorgänge und -adsorptionsvorgänge im zugänglichen Porenvolumen und im Bereich quellfähiger Strukturen wird eine Expansion bzw. Kontraktion verursacht. Die Gewichtung dieser Effekte hängt zum einem vom Grad der Durchfeuchtung und zum anderen vom Porenraum der Probe ab. Tonige Bindemittel besitzen eine größere Quellfähigkeit und fördern dadurch mögliche Schäden. Wie bei Temperaturschwankungen ohne gefrorene Wassereinschlüsse erfolgen Schäden nicht plötzlich, sondern verlaufen langsam und diese können als langsam fortschreitende Zerfallsvorgänge eingestuft werden [131].

Kapitel 3

Experimentelle Anordnung

3.1 Abguss der $AlSi_9Cu_3$ -Legierung

In diesem Abschnitt werden die Details zu den Abgüssen der Aluminiumschmelze in die Sandform erläutert. Hierfür wird auf die Positionierung der Fasern, den Einfluss der Gitterlänge der FBGs und letztlich auf die Anbindung der Faser in die Schmelze eingegangen.

3.1.1 Versuchsaufbau

Die Geometrie des Abgusses wurde bereits in 2.11 gezeigt. Abbildung 3.1 zeigt eine Gushalbform aus Ölsand, die in Kombination mit der zweiten Hälfte als Gussform dient. Im linken Hohlraum wird das FBG zur Dehnungsmessung eingebettet und im rechten Teil wird eine Referenzmessung mit einem Thermoelement durchgeführt. Bei der Abbildung 3.1 ist die Befestigung der Faser entlang der Flussrichtung der Schmelze gezeigt, auf die als erstes eingegangen werden soll. Der Teil der Faser, der das Gitter enthält, steht direkt in Verbindung mit Schmelze und der restliche Teil wird durch zwei Edelstahlkapillaren geschützt. Diese besitzen einen Außendurchmesser von $800 \mu m$ und einen Innendurchmesser von $570 \mu m$. Die Faser ist in der Kanüle mit einem zweikomponentigen Kleber und diese wiederum in der Halterung oben geklebt. Die Halterung an der Unterseite dient lediglich zur Justierung der Anordnung in der Form. Am unteren Teil der Faser wird zudem ein Gewicht befestigt, um der Faser eine geringe Vorspannung zu geben. Diese gibt der Faser eine zusätzliche Stabilisierung und verringert die Gefahr, dass sie während

der Erstarrung bricht. Bei der Analyse der ersten Versuche mit diesem Aufbau zeigte sich, dass es nicht ausreichend ist, die Faser lediglich im Bereich des FBGs zu entcoaten. Steht das Coating während des Eingusses in Kontakt mit der Schmelze, so verbrennt dieses und verursacht Verunreinigungen im Probenkörper und vor allem entlang der Faser. Die Auswirkungen solcher Verunreinigungen werden später detailliert beschrieben.

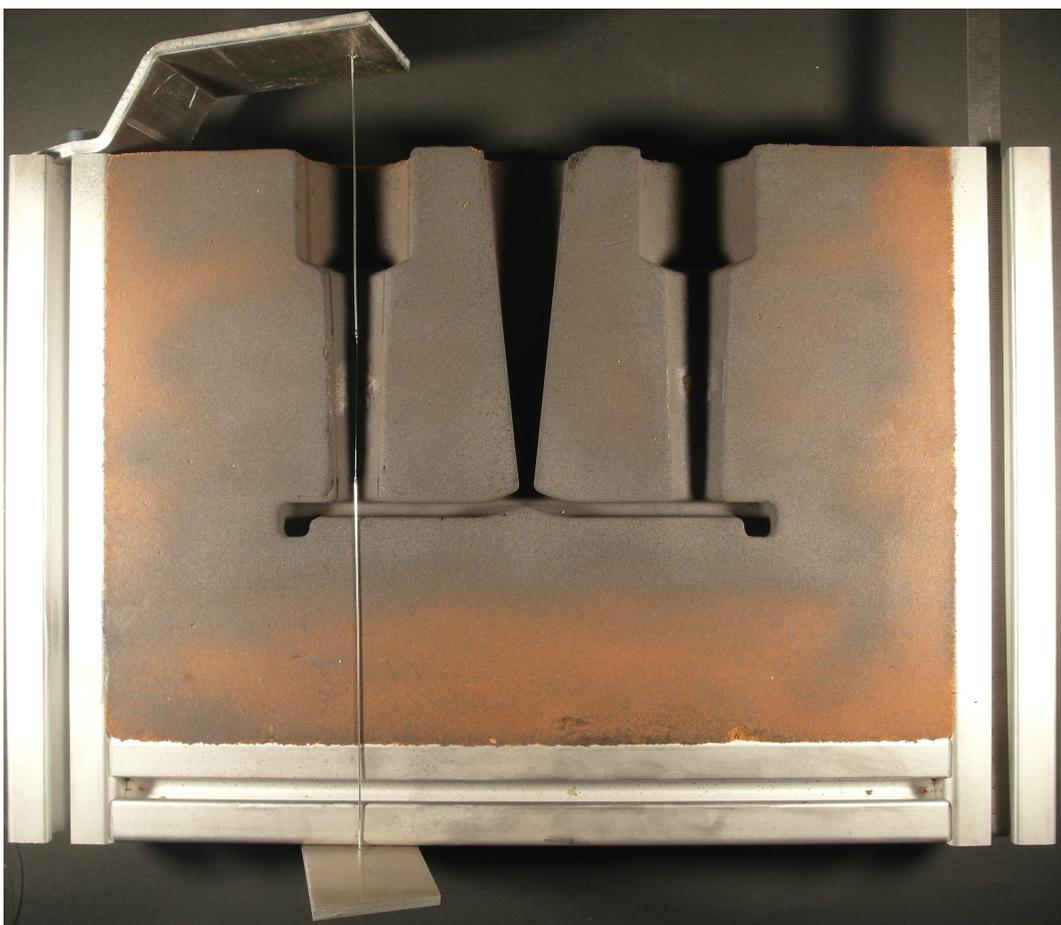


Abbildung 3.1: Gushalbschale geformt aus Ölsand; der Sensor ist entlang der Flussrichtung positioniert.

Ein weiterer Störfaktor sind Verschmutzungen, die durch den Einguss entstehen. Diese können durch einen zusätzlichen Filter im Einguss behoben werden. Neben der geschilderten Problematik hat sich bei den ersten Versuchsreihen ein vermehrter Ausfall durch den Bruch der Fasern gezeigt, der jedoch nach dem Übergang von flüssig nach fest statt fand. Als Grund hierfür wurde eine Dehnung der Faser in der Kapillare angenommen, welche jedoch nicht durch das FBG erfasst wird,

da die Schmelze sich bereits im festen Aggregatzustand befindet. In Abbildung 3.2 ist die Weiterentwicklung der ersten Gussform zu sehen. In der Mitte des Eingusses befindet sich der Filter zur Vermeidung von Turbulenzen und eingussbedingten Verunreinigungen. Die Halterung der Kanüle ist am Speiser durch eine lösbare Verbindung realisiert. Die Faser wird bei dieser Variante nicht mehr starr fixiert durch eine Klebung, sondern mit einem Klebeband. Diese Fixierung ermöglicht eine Vorspannung und eine genaue Positionierung in der Form. Nach der Erstarrung der Schmelze kann die Klebung jedoch entfernt werden und so wird die Faser in der Kanüle entlastet. Dadurch wird ein Bruch in dieser verhindert. Erreicht die Schmelze Raumtemperatur, kann das Bauteil mittels der lösbaren Verbindung an der Kanüle zerstörungsfrei entfernt werden. Vor der weiteren Bearbeitung wird die Faser durch einen Silikonkleber, der in die Kanüle eingeführt wird, geschützt.

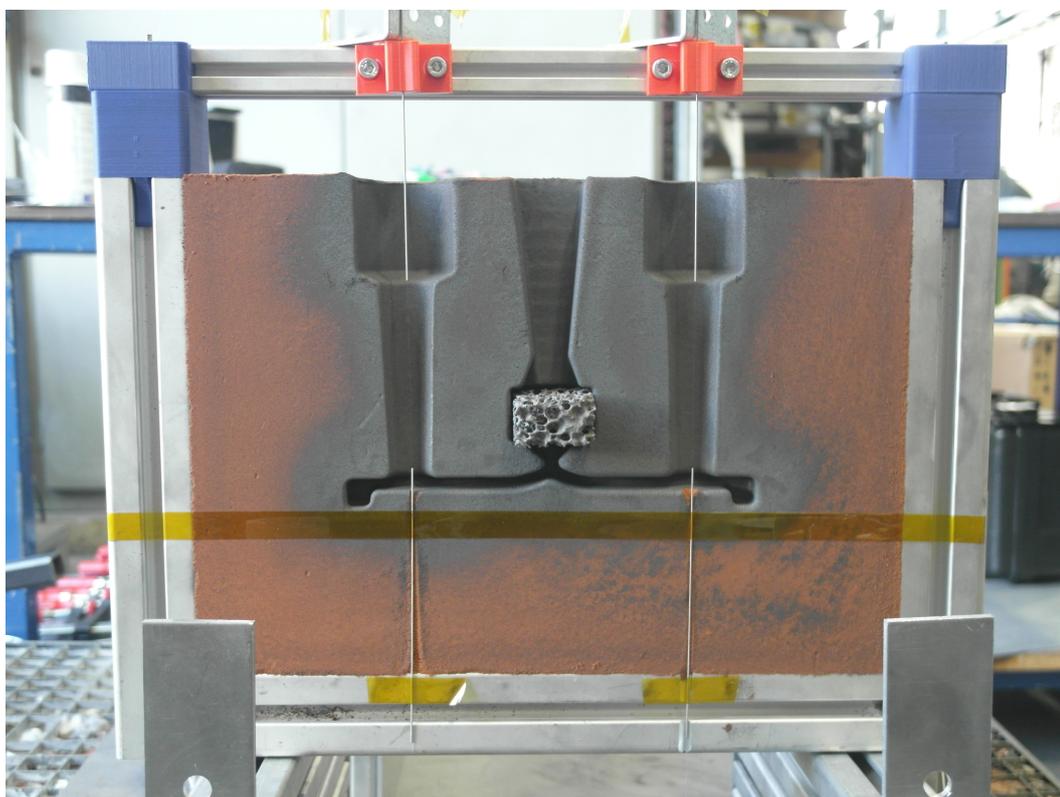


Abbildung 3.2: Gussform mit gedruckter Befestigung und Filter.

In Abbildung 3.3 ist der komplette Aufbau kurz nach dem Abguss gezeigt. Die beiden Formhälften werden mechanisch fixiert und verbunden. Neben den gezeigten Formen aus Ölsand wurden in weiteren Versuchen gedruckte Sandformen ver-

wendet, die hier jedoch nicht explizit erläutert werden, da die Geometrie und der Versuchsaufbau identisch sind.

Neben der Faserbefestigung entlang der Flussrichtung, wurde die Befestigung quer durch den Probenkörper untersucht. Als Referenz hierfür wird ebenfalls das Thermoelement im Referenzpfad verwendet.



Abbildung 3.3: Komplettierte Gussform kurz nach dem Abguss.

Wird an die Faser ein Rotlichtlaser als Faser-Prüfgerät angeschlossen, wird das Gitter in der Faser wie in Abbildung 3.4 sichtbar. Es wird von oben in die leere Gussform geblickt und das FBG mittig positioniert. Wie bei der Befestigung entlang der Flussrichtung werden bei der zweiten Variante Kanülen für den Schutz und die Führung der Glasfaser verwendet. Einen Unterschied gibt es bei der Vorspannung, da bei der Variante quer zur Flussrichtung eine enorme Belastung durch die Oberflächenspannung der Schmelze entsteht, wurde diese bei der zweiten Variante nicht angebracht. Die Kanülen in Abbildung 3.4 reichen nur minimal in die Gussform, um die Erstarrung möglichst gering zu beeinflussen. Nachteilig bei dieser Befestigung ist, dass nach Erstarrung keine weitere Bearbeitung möglich ist, da

bei Anfertigung eines Zugstabs, der für weitere Versuche notwendig ist, die Faser entfernt werden muss.

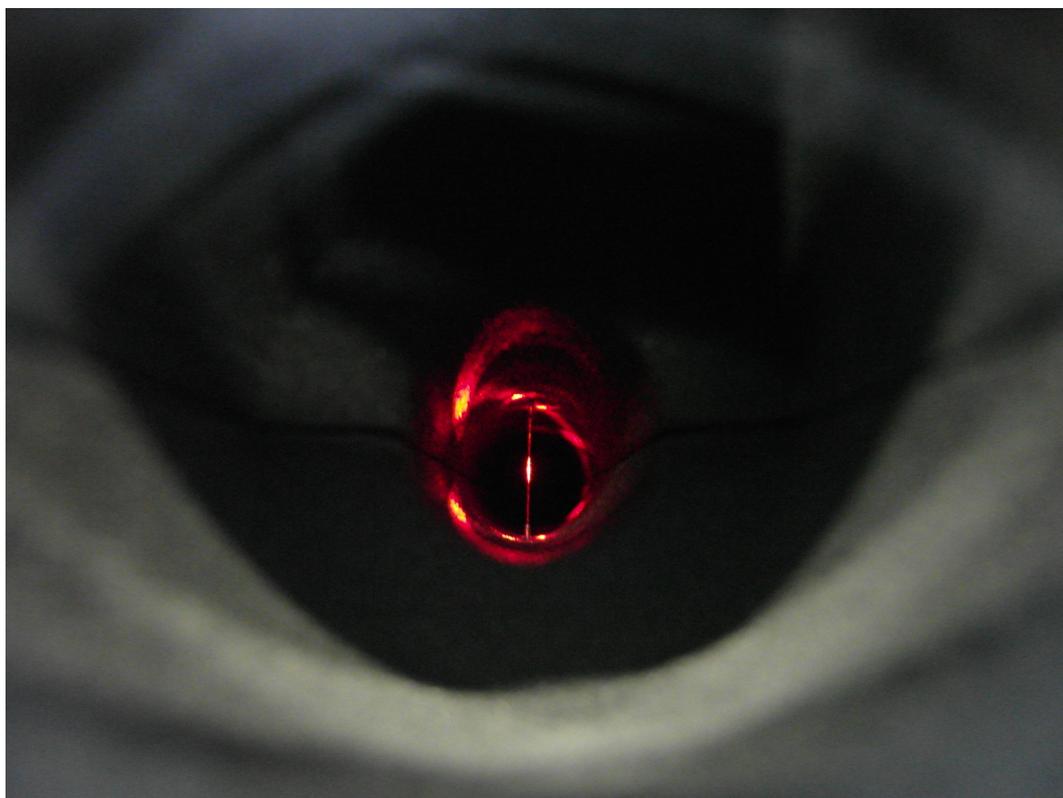


Abbildung 3.4: Faser quer durch den Probenkörper gespannt. Durch die Verwendung eines Rotlichtlasers wird das FBG in der Faser sichtbar.

3.1.2 Einfluss der Gitterlänge

Die Gitterlängen der FBGs bewegen sich in der Regel in einem Bereich zwischen 3 und 12 mm. Um eine bessere Reflektivität zu erreichen, wurde zu Beginn eine Gitterlänge von 8 mm gewählt. Bei dieser Gitterlänge stellt sich jedoch eine immense Teilung des Spektrums ein, was in Abbildung 3.5 zu sehen ist. Zu Beginn ist bei der Reflexion eine eindeutige Bragg-Wellenlänge zu erkennen, wie in der Abbildung links zu sehen ist. Nach dem Einguss kühlt die Schmelze innerhalb von 2 Minuten auf 520 C° ab. Das Spektrum der Reflexion bei dieser Temperatur ist rechts zu sehen, wobei hier zwei Aspekte deutlich auffallen. Die Intensität der Reflexion sinkt deutlich und aus dem Spektrum ist die Bragg-Wellenlänge nicht zu erkennen. Folglich können aus dieser Sensorantwort keine Informationen bezüglich der Dehnung gewonnen werden.

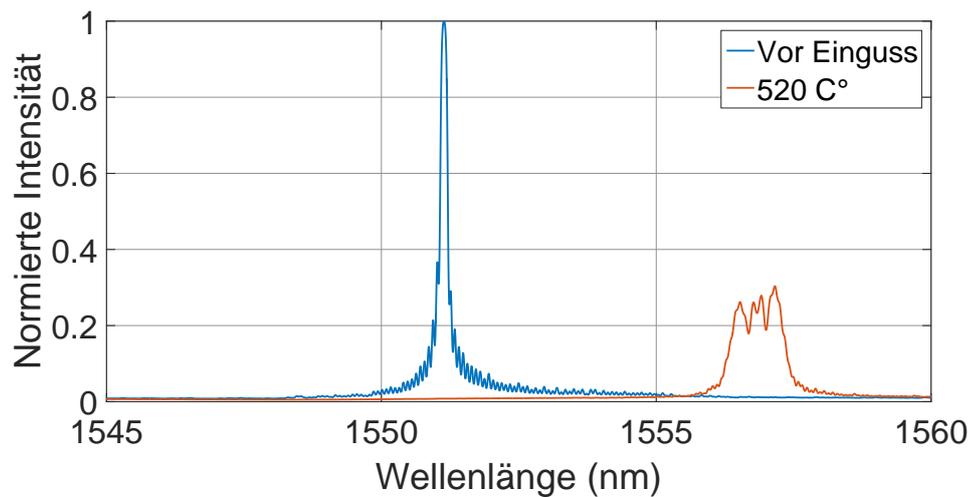


Abbildung 3.5: Reflexion eines FBGs mit einer Länge von 8 mm kurz nach dem Einguss bei 520 C° [92].

Als Ursache hierfür müssen zwei Störfaktoren betrachtet werden. Zum einen können inhomogene Querbelastungen auftreten, die zu einer Doppelbrechung führen. Zum anderen können über eine Länge von 8 mm unterschiedliche Dehnungen vorliegen, wodurch der Sensor eine größere Anzahl von Wellenlängen reflektiert.

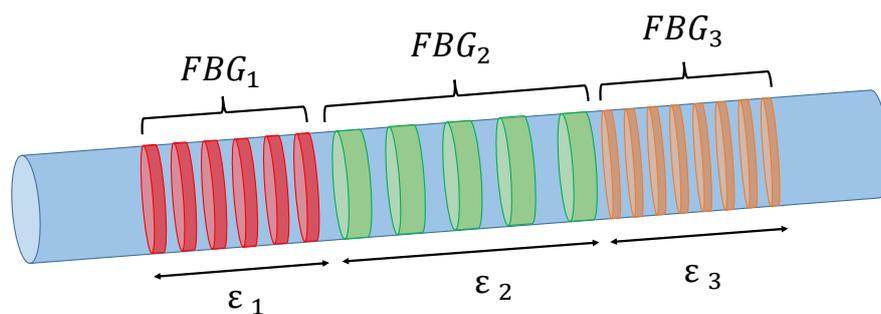


Abbildung 3.6: Aufteilung eines FBGs in drei kürzere Sensoren auf Grund unterschiedlicher Dehnungen [92].

Dieser Effekt ist exemplarisch in Abbildung 3.6 dargestellt. Entlang des FBGs

liegen die drei Dehnungen ε_1 , ε_2 und ε_3 an, wodurch das FBG als drei kürzere FBGs erscheint. Die rechte Reflexion in Abbildung 3.5 könnte sich durch eine solche Belastung ergeben, wobei der reale Fall eine komplexere Situation beschreibt. Versuche mit kürzeren Gittern mit einer Länge von 3 mm zeigten eine signifikante Verbesserung und es kann gefolgert werden, dass es sich nicht um eine Doppelbrechung handelt, sondern um den beschriebenen Effekt aus Abbildung 3.6.

3.1.3 Matrix-Faser-Interaktion

Für die Übertragung von Dehnungen und Stauchungen auf die Faser ist die Anbindung zwischen Faser und Matrix wichtig. Um diese zu überprüfen wurden verschiedene Konstellationen, angefertigt am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen, in den Abbildungen 3.7 bis 3.10 betrachtet. Die ersten drei Schliffbilder stammen von Proben, bei denen weder ein Filter im Einguss noch eine Faserbeschichtung verwendet wurde. Zudem wurde lediglich um den Bereich des FBGs herum das Coating entfernt, jedoch nicht darauf geachtet, dass dies über den ganzen Faserbereich, der in Kontakt mit der Schmelze steht, gemacht wurde.

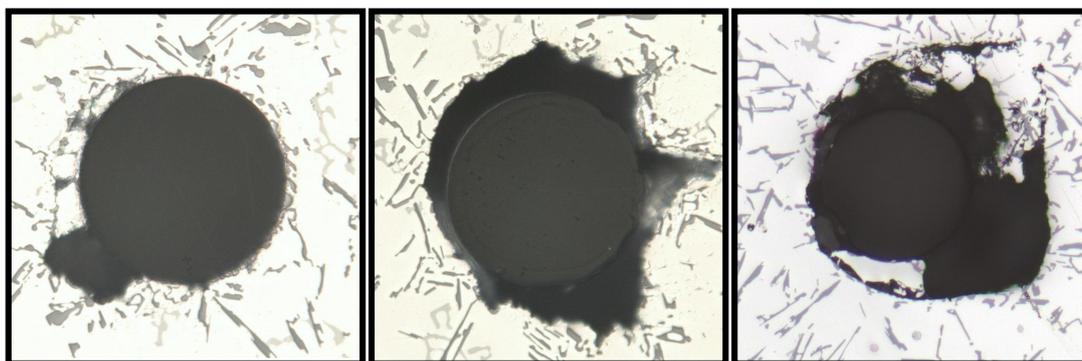


Abbildung 3.7: Schliffbilder von Proben, bei denen keine Faserbeschichtung und kein Filter im Einguss verwendet wurden.

Die Abbildung 3.8 entstand aus Proben, bei denen das Coating über den ganzen

relevanten Faserbereich entfernt wurde und eine Kupferbeschichtung besitzt. Wie zu sehen ist, verschwindet die Beschichtung während des Gießprozesses komplett, was durch eine schlechte Anbindung des Kupfers an die Glasfaser bedingt sein kann. Zudem löst die Legierung durch seine Eigenschaften die Kupferbeschichtung.

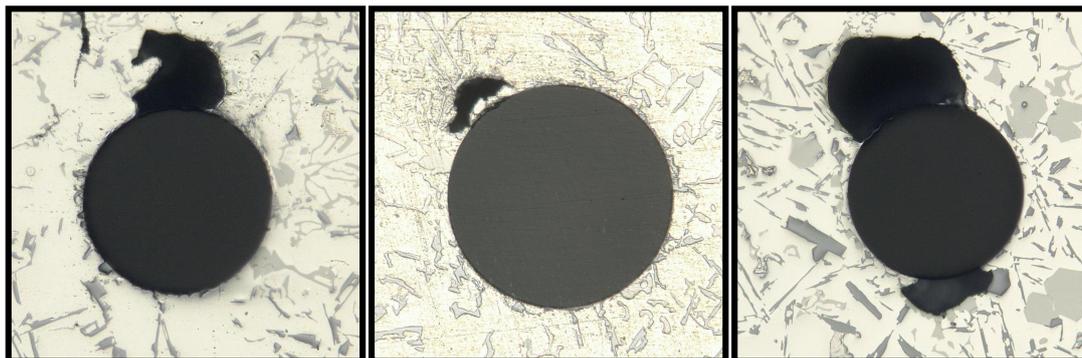


Abbildung 3.8: Schliffbilder von Proben, bei denen eine Kupferbeschichtung und kein Filter im Einguss verwendet wurden.

Als alternative Beschichtung zu Kupfer wurde in Abbildung 3.9 Aluminium verwendet. Bei dem rechten Schliff ist keine Beschichtung mehr zu erkennen, da hier eine zu hohe Gießtemperatur von ungefähr 740 °C vorlag. Im Vergleich zu den beiden vorhergehenden Beispielen sind die schwarzen Bereiche um die Faser herum größtenteils behoben worden. Ein weiterer Vorteil dieser Anordnung ist die homogene Kraftverteilung auf die Faser. Sollten um die Beschichtung herum geringe Fehlstellen auftreten, kann durch diese dennoch ein homogenes Kraftfeld um die Faser, also den Sensor, erzeugt werden. Ein Nachteil der Methode mit Beschichtung um die Faser ist der zusätzliche Arbeitsschritt. Bei dem gezeigten Beispiel mit Aluminiumbeschichtung wurde eine kommerziell erhältliche beschichtete Glasfaser, jedoch ohne FBG eingebettet. Für die Anwendung des FBGs im Guss müsste zunächst das Coating der Faser entfernt werden und nachfolgend die Beschichtung aufgedampft werden, was zusätzliche Kosten verursacht. Zudem gewinnt der Ge-

samtprozess an Komplexität, da ein weiterer Produktionsschritt nötig ist.



Abbildung 3.9: Schliffbilder von Proben, bei denen eine Aluminiumbeschichtung und kein Filter im Einguss verwendet wurden.

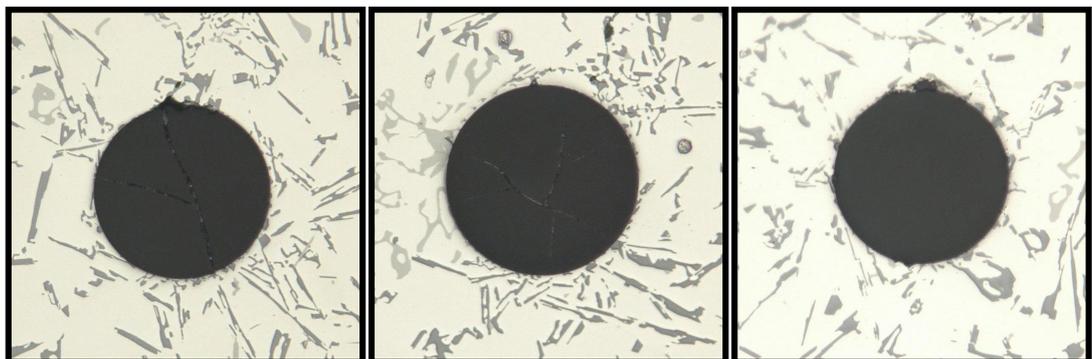


Abbildung 3.10: Schliffbilder von Proben, bei denen keine Faserbeschichtung, jedoch ein Filter im Einguss verwendet wurden.

Aus diesem Grund wurde eine alternative Methode getestet, bei der zum einen das Coating um den relevanten Faserbereich entfernt und zum anderen ein Filter im Einguss positioniert wurde. Drei Schliffe dieser Konstellation sind in Abbildung 3.10 dargestellt. In der letzten vorgestellten Methode lagern sich entlang der Faser keine oder nur geringe schwarze Bereiche an. Diese Imperfektionen können auf Gasblasen oder Vakua basieren. Neben einer möglichen schlechten Faser-Matrix-Interaktion können diese Fehlstellen eine Anlagerung einer Oxidschicht um die Faser herum induzieren. Diese Schicht bildet eine eigene Transferfunktion zur Faser und kann die Messung verfälschen. Im schlimmsten Fall verursachen diese Fehlstellen eine Doppelbrechung der Reflexion, wodurch eine Analyse der vorliegenden Dehnungen nicht realisierbar ist.

Auf Grund der Schliffbilder, erzeugt aus der Anordnung mit Filter, kann von einer homogenen Anbindung der Schmelze an die Faser und somit von einer einheitlichen Dehnungs-Transferfunktion ausgegangen werden.

3.2 Integration der Sensorik in Sandstein

In diesem Abschnitt wird die Anordnung der Sensorik für die Messungen im Sandstein vorgestellt. Hierfür sollen nochmals die Anforderungen an das System kurz vorgestellt werden. Die Anordnung muss nachträglich in ein bestehendes Mauerwerk installiert werden können, ohne große Schäden zu erzeugen. Zudem soll der Sensoraufbau eine Messung an mehreren Stellen in Hinsicht auf Temperatur und Dehnung ermöglichen. Dehnungen bedingt durch Temperaturgradienten erfordern zudem, dass neben einer Messstelle für die Dehnung zwei Messpunkte für die Temperatur vorhanden sind.

Da der minimale Aufbau somit eine Dehnungsmessung und zwei Temperaturmessungen ermöglichen soll, wird nachfolgend dieser Fall untersucht und anschließend die Erweiterung auf mehrere Messstellen untersucht.

3.2.1 Aufbau der Sensoranordnung

Im ersten Schritt wurde eine Methode gesucht, die Temperatur im Stein zu messen. Dafür muss das FBG von Dehnungen entkoppelt sein, da es sonst bei einer Umrechnung von Wellenlängenverschiebung zu Temperatur zu Fehlern kommt. Um dies zu

gewährleisten wurde der Einsatz einer dickwandigen Glaskapillare aus Borosilikatglas gewählt. Abbildung 3.11 zeigt die Dimensionen der Kapillare. Sie besitzt einen Außendurchmesser von 4 mm, einen Innendurchmesser von 0,8 mm und eine Länge von 30 mm.

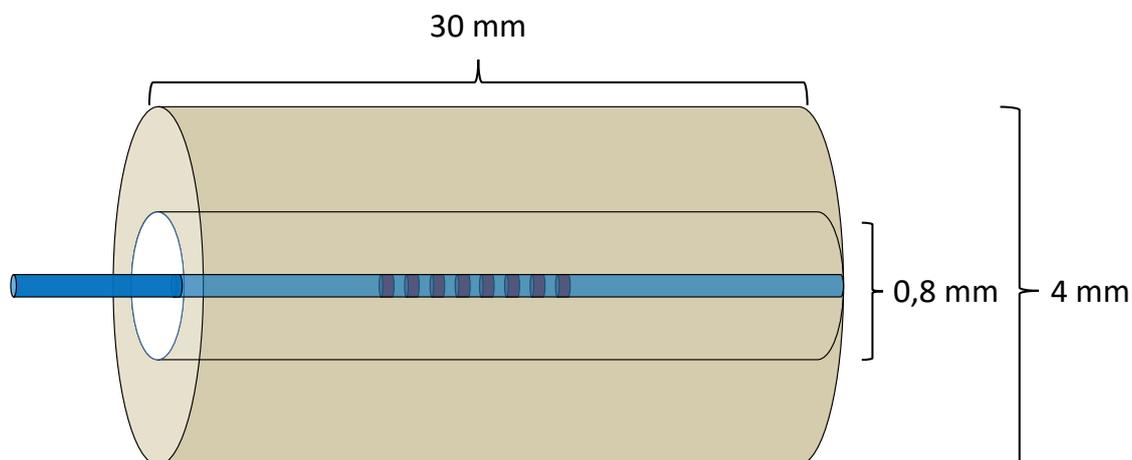


Abbildung 3.11: Aufbau der gewählten Glaskapillare zur Entkopplung des FBGs von Dehnung.

Neben der Möglichkeit die FBGs von Dehnung zu entkoppeln bieten die Kapillaren weitere Vorteile. Der Sensoraufbau soll mittels einer Bohrung in den Sandstein integriert werden. Da die Bohrung viel größer als die Glasfaser ist, müsste zur Befestigung der Faser im Stein eine große Menge an Kleber angebracht werden. Hierbei ist nicht zu garantieren, dass die Faser wie gewünscht ausgerichtet ist. Durch die größere Kontaktfläche zwischen Kapillare und Stein, wird weniger Kleber benötigt und die Ausrichtung im Stein ist genauer zu justieren als ohne Kapillare. In Abbildung 3.12 sind die Befestigung mit und ohne Kapillare schematisch zu sehen. Durch die poröse Struktur des Sandsteins muss bei der Bohrung davon ausgegangen werden, dass die Bohrwände keine geraden Flächen besitzen, sondern ein rissiges Bild darstellen. Der Temperatursensor der eingeklebten Faser ohne Kapillare wird zudem noch immense Dehnungen durch die große Menge an Kleber erfahren, wodurch die Messergebnisse verfälscht werden. Ist die Faser zudem nicht zentral in der

Klebung positioniert, werden bei Temperaturänderungen inhomogene Belastungen in radialer Faserrichtung auftreten, die zu Doppelbrechung führen.

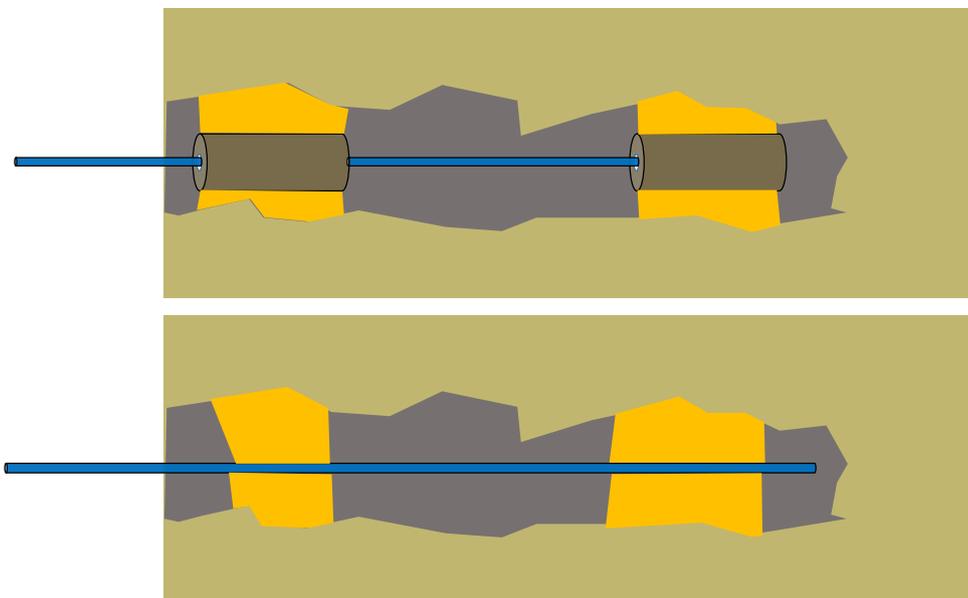


Abbildung 3.12: Befestigung der Faser im Stein oben mit und unten ohne Kapillare.

Es wurden die vier verschiedene Anordnungen aus Abbildung 3.13 für die Klebung der Faser in der Glaskapillare untersucht. Nachfolgend wird lediglich der Aufbau der Varianten und deren Vor- und Nachteile beschrieben. Die erfassten Messdaten werden im Abschnitt Messergebnisse präsentiert. Neben den unterschiedlichen Methoden wurden auch zwei Kleber untersucht. Zum einen der Silikonkleber DOW CORNING 3140 und zum anderen der Zweikomponentenkleber EPO-TEK 353ND. Bei der Klebung a) in Abbildung 3.13 wurde die Faser nur an den Enden in der Kapillare geklebt und das FBG ist frei gelagert. Der Vorteil dieser Methode ist, dass sich keine Querbelastungen auf das Gitter durch den Kleber ergeben, die bei Temperaturänderungen bedingt durch die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungen der Komponenten auftreten. Jedoch lässt sich diese Befestigung nicht reproduzierbar herstellen, da der Kleber bei der Einfüllung in die Kapillare entlang der Faser läuft und teilweise auch den Bereich mit dem Gitter benetzt. Zudem ergeben sich durch diese Variante Dehnungen bei Temperaturzyklen, die durch den Unterschied des thermischen Ausdehnungskoeffizienten begründet sind.

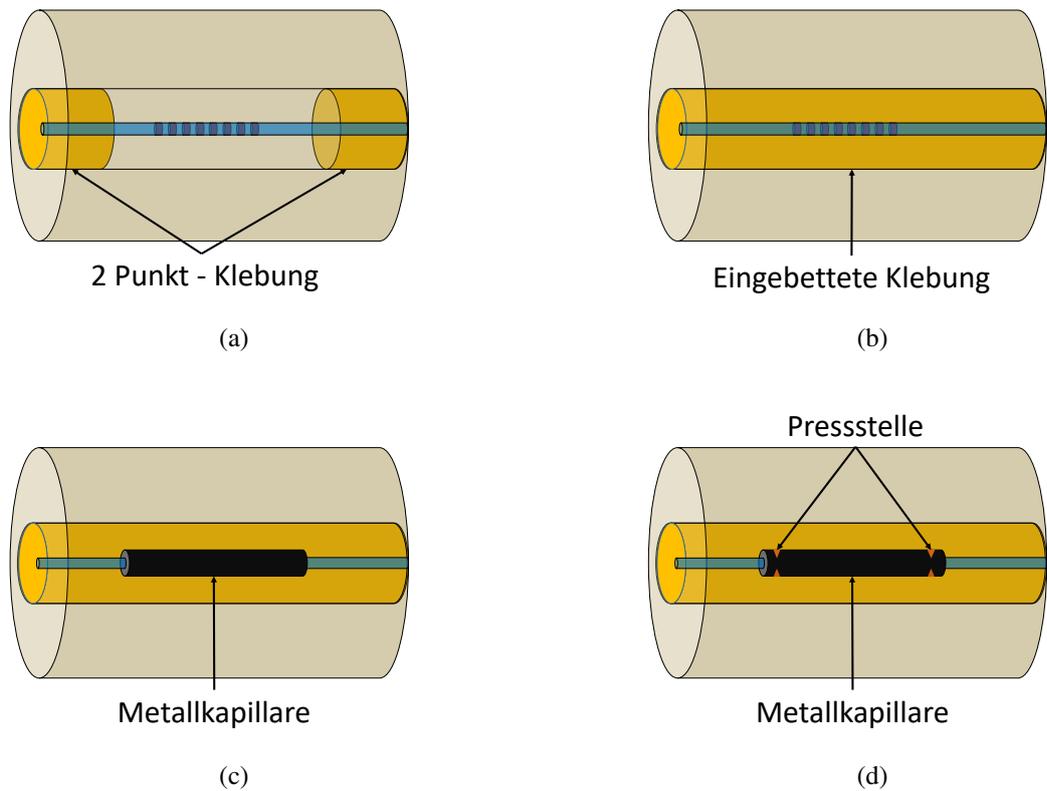


Abbildung 3.13: Untersuchte Anordnungen zur dehnungskompensierten Temperaturmessung.

Methode b) ergibt sich durch eine vollständige Klebung der Faser in die Kapillare. Hierbei tritt bei beiden Klebern ein Problem mit der homogenen Verteilung des Klebers auf. Der Silikonkleber verhält sich bezüglich der thermischen Ausdehnung zwar ähnlich wie die Glasfaser, es bleiben jedoch meist Luftblasen in der Kapillare zurück wie in Abbildung 3.14 zu sehen ist. Lagern sich diese Luftblasen in dem Bereich der Faser an, der das Gitter enthält, ergeben sich inhomogene Spannungsfelder. Bei einer Änderung der Temperatur folgt eine Kontraktion oder Expansion des Klebers. Da dieser nicht homogen um die Faser liegt, entstehen lokale Stresszonen, die wiederum zu einer Doppelbrechung in der Faser führen. Daraus können in der Reflexion nun mehrere Maxima entstehen und eine exakte Schlussfolgerung auf die Temperatur ist nicht mehr möglich. Dieses Problem ergibt sich bei beiden Klebern, wobei bei dem Silikonkleber erschwerend hinzu kommt, dass Dehnungen von außen nicht vollständig entkoppelt, sondern teilweise auf das FBG übertragen

werden. Auf Grund dieses Effekts wurde der Silikonkleber in den Ausführungen c) und d) nicht weiter betrachtet.

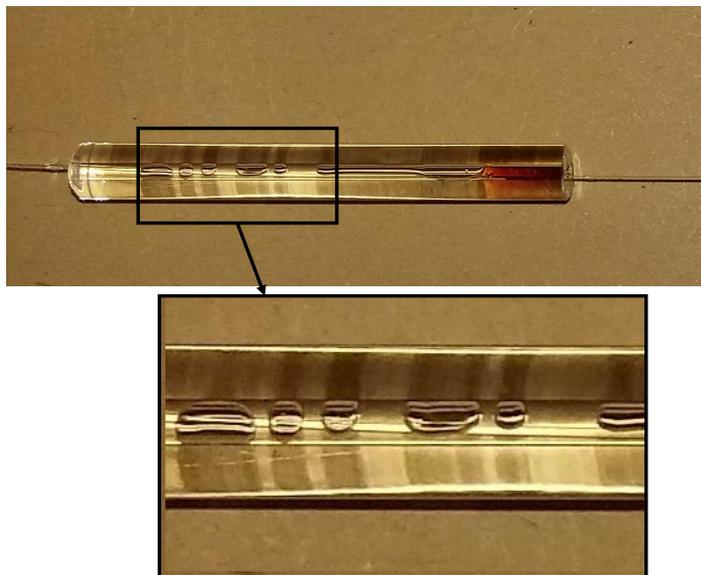


Abbildung 3.14: Luftblasen in der Kapillare bei komplett eingebetteter Faser.

Um die Vorteile, der zuvor beschriebenen Varianten zu kombinieren wurde in c) zusätzlich noch eine Metallkanüle um das FBG aufgebracht, damit sich kein Kleber um das FBG anlagert. Durch die Kapillarenwirkung wird jedoch der Kleber in die Kanüle gezogen und es tritt erneut der unerwünschte Effekt der Doppelbrechung auf. So wurde im letzten Schritt d) die Kanüle an den Enden gequetscht, damit der Hohlraum zwischen Faser und Kanüle so gering ist, dass kein Kleber eintreten kann. In Abbildung 3.15 ist der Aufbau der kompletten Sensoranordnung zu sehen. Hierfür werden FBG-Arrays mit einer Gitterlänge von 8 mm verwendet. Der Abstand zwischen der Mitte der FGBs beträgt 30 mm und somit kommt die Anordnung für die Messung einer Dehnungs- und zwei Temperaturmessstellen auf eine Länge von 90 mm und einem Durchmesser von 4 mm. Jede weitere Messstelle verlängert den Aufbau lediglich noch um 60 mm, da für den Dehnungssensor zur Messung von λ_{2n} jeweils die Temperatursensoren für λ_{2n-1} und λ_{2n+1} benötigt werden, für $n \in \mathbb{N}$. Für die Kompensation des Temperatureinflusses an den Messstellen λ_2 und λ_4 werden die Messstellen λ_1 , λ_3 und λ_5 benötigt. Limitiert wird die Anordnung durch die mögliche Auflösung der Bragg-Wellenlängen. Der verwendete Interrogator arbeitet in einem Bereich von 1510 nm bis 1590 nm, weswegen sich die Bragg-Wellenlängen in diesem Bereich befinden müssen. Zudem dürfen sich die Reflexio-

nen der Gitter nicht überschneiden, wenn es auf Grund von Temperaturgradienten zu unterschiedlichen Verschiebungen kommt.

Für die durchgeführten Versuche wurde sich auf die Anordnung mit drei FBGs für die Messstellen λ_1 , λ_2 und λ_3 beschränkt, da dies zur Evaluierung der Messmethode ausreichend ist.

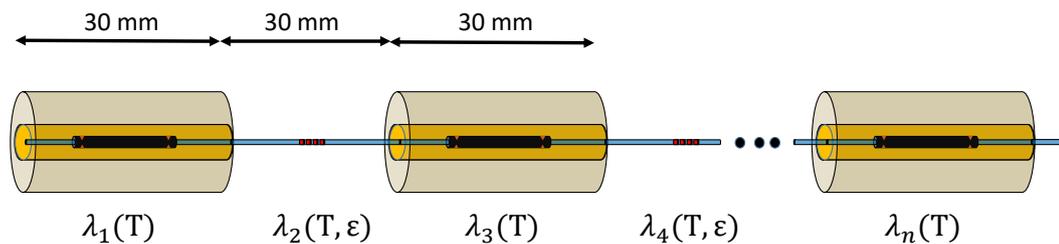


Abbildung 3.15: Aufbau des Sensors für die Messung temperaturabhängiger Dehnung [132].

Mittels der Glaskapillaren wird der Sensoraufbau in dem zu überwachenden Objekt fixiert. Bei einer temperaturabedingten Expansion des Messobjekts wird diese auf den Dehnungssensor übertragen, wohingegen die beiden Temperatursensoren frei von Dehnung sind. Mittels den Verschiebungen der Wellenlänge der Temperatursensoren kann der Temperatureinfluss auf den Dehnungssensor berechnet und dieser davon bereinigt werden. Bei einer homogenen Änderung der Temperatur messen die beiden Sensoren die gleiche Temperatur und bei dem Vorliegen eines Gradienten muss für die Kompensation des Dehnungssensors der Mittelwert aus den beiden Temperaturen genommen werden.

3.2.2 Versuchsaufbau

Die Installation der Sensorik unterscheidet sich bei dem mechanischen von den thermischen und hygri-schen Test. In Abbildung 3.16 und 3.17 ist der Versuchsaufbau - ein 3-Punkt-Biegetest - für den mechanischen Test gezeigt.



Abbildung 3.16: Aufbau zur mechanischen Belastung der Sandsteine. Die Sensorik ist auf der Unterseite der Probe befestigt und in Abbildung 3.17 schematisch dargestellt.

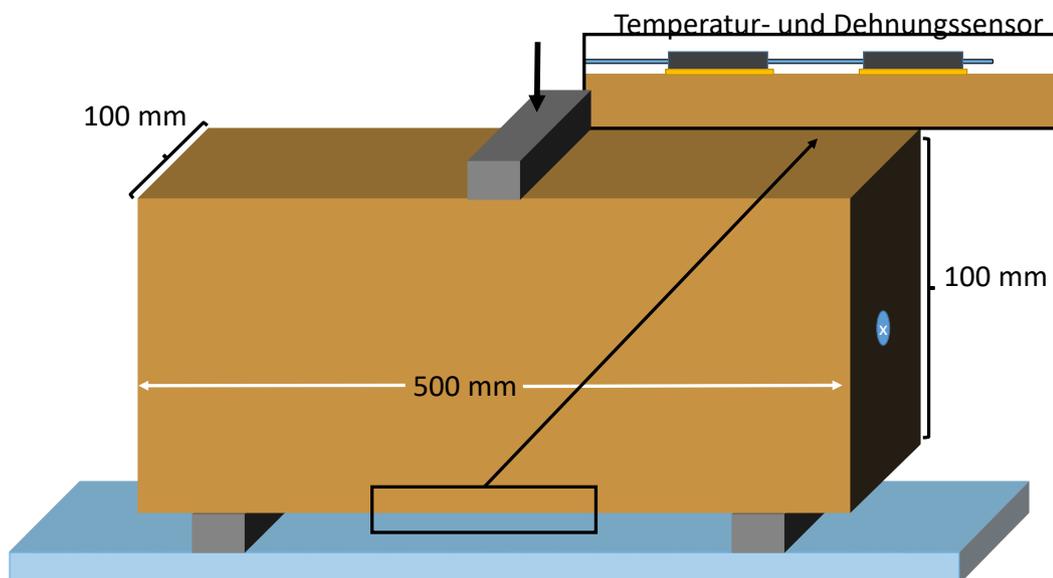


Abbildung 3.17: 3-Punkt-Biegetest zur Ermittlung der Bruchspannung.

Die Maße der Messproben betragen 100 mm x 100 mm x 500 mm. Die Anord-

nung der faseroptischen Sensorik ist wie zuvor beschrieben, jedoch wird der komplette Sensor nicht in den Stein eingeklebt, sondern längs über die Soll-Bruchstelle gespannt, was in dem kleinen Ausschnitt in Abbildung 3.17 zu sehen ist. Bei dem mechanischen Test soll lediglich gezeigt werden, dass der Dehnungssensor das Dehnungsverhalten an der Unterseite des Steins nachbilden kann. Für die Befestigung des Sensoraufbaus im Stein müsste entlang der mit x gekennzeichneten Position mit einer Tiefe von ungefähr 300 mm gebohrt werden. Auf diese zusätzliche Variable im Messaufbau wurde verzichtet, um die Komplexität möglichst gering zu halten. Die mechanischen Tests wurden unter statischen Belastungen und unterschiedlichen Feuchtezuständen durchgeführt. Zum einen wurden Messproben verwendet, die in einer trockenen Umgebung gelagert wurden, und zum anderen Proben, die zuvor über einen Zeitraum von 48 Stunden in Wasser gelagert wurden. Für die Dehnung mittels dem Biegetest ergibt sich die Dehnung bei idealer Betrachtung [133]:

$$\varepsilon = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2 \cdot E} \quad (3.1)$$

Hierin gibt F die Kraft auf das obige Auflager und L den Abstand der unteren Auflager des Biegeversuchs, der 400 mm beträgt, wieder. b und h geben zum einen die Breite und zum anderen die Höhe der Messproben an. Beide Parameter haben den Wert 100 mm. Die Kraft auf die Fixierung an der Oberseite der Proben wurde mit einer Schraubverbindung realisiert. Da die Stellgröße hierbei ein Drehmoment ist, muss dieses mit nachfolgender Gleichung in eine statische Kraft umgerechnet werden [134].

$$F = \frac{M}{0,0947 \cdot d} \quad (3.2)$$

Die wirkende Kraft ergibt sich somit aus dem Drehmoment und dem Schraubendurchmesser d . Für die Tests zur Ausdehnung unter thermischer und hygri-scher Belastung wurde der Aufbau aus Abbildung 3.18 angewandt. Hierfür wurde mittig durch die 100 mm Seite gebohrt und der Sensoraufbau in zwei Schritten in dem Loch befestigt. Zunächst wird die erste Kapillare eingeklebt und gewartet bis die Klebung ausgehärtet ist. Im zweiten Schritt wird vor der Klebung eine Vorspannung angebracht. Diese ist notwendig, da bei Temperaturen unter der Raumtemperatur, bei der die Klebung stattfindet, eine Kontraktion des Materials vorliegt. Bei der negativen Ausdehnung verschwindet die Verschiebung der Bragg-Wellenlänge, die durch die Vorspannung induziert wurde, worauf auf den Grad der Kontraktion geschlossen werden kann. Wird von einer minimalen Temperatur von -20 °C ausge-

gangen und einem thermischen Ausdehnungskoeffizienten α_T von $14,5 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ so ergibt sich nach Gleichung 3.3 eine Dehnung ε von $580 \mu\varepsilon$.

$$\varepsilon = \Delta T * \alpha_T = 40K * 14,5 * 10^{-6} K^{-1} = 580 \mu\varepsilon \quad (3.3)$$

Um nun auf die erforderliche Kraft F für die Vorspannung zu kommen, wird Gleichung 3.4 eingesetzt.

$$F = \varepsilon * A * E = 580 \mu\varepsilon * \frac{\pi * d^2}{4} * 74 GPa = 0,527 N \quad (3.4)$$

Aus Gleichung 3.4 kann entnommen werden, dass bei einem Faserdurchmesser von $125 \mu m$ eine Kraft von $0,527 N$ in axialer Richtung der Faser angetragen werden muss, um die nötige Vorspannung zu erreichen. Die Kraft von $0,527 N$ entspricht hierbei einem Gewicht von ungefähr $53,7$ Gramm. Um sicherzustellen, dass die Kontraktion auch detektiert wird, falls die Vorspannung auf Grund mehrerer Temperaturzyklen schwindet, wird eine Kraft von $1 N$ zur Erzeugung der Vorspannung verwendet.

Mit der geschilderten Anordnung werden die Messproben zum einen Temperaturzyklen und zum anderen einer maximalen Feuchtigkeitssättigung ausgesetzt. Für zweiteres werden die Proben bis zur Sättigung in Wasser gelagert.

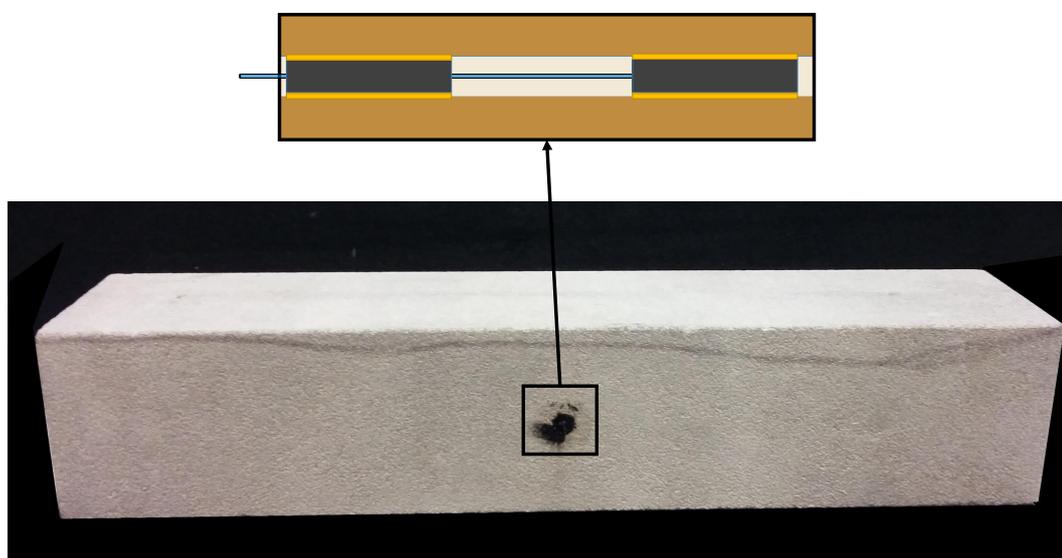


Abbildung 3.18: In der Mitte der Messprobe wurde eine Bohrung mit einem Durchmesser von 6 mm eingefügt und dort der Sensoraufbau fixiert.

Kapitel 4

Messergebnisse

In dem folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der beiden Projekte vorgestellt. Für die Erfassung der Dehnungen in der Aluminiumschmelze wurden Typ-I und FS-Gitter verwendet. Erstere wurden von der Fakultät für angewandte Naturwissenschaften und Mechatronik der Hochschule München hergestellt und zweitere von FemtoFiberTec bezogen. Im Gegensatz hierzu wurden bei der Überwachung der Sandsteine Typ-I-Gitter der Firma FBGS verwendet, da diese keinen hohen Temperaturen ausgesetzt werden.

4.1 Temperaturkalibrierung der verwendeten FBGs

Bei den Typ-I-Gittern wurde bereits erwähnt, dass diese bei thermischer Belastung über $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ degradieren und zudem eine Verfälschung durch den Drift entsteht. Um diesen Fehler bei der Messung abzuschätzen, wurde eine Temperaturmessung zur Kalibrierung für die FS-FBGs durchgeführt. Die Typ-I-Gitter können im Gegensatz zu den FS-Gittern nicht über einen längeren Zeitraum hohen Temperaturen ausgesetzt werden, da sie sonst ausgelöscht werden. Um dennoch eine Aussage zu treffen, wurde eine alternative Methode gewählt. Hierfür wurde das FBG in eine Metallkapillare eingefügt und in der Gussform an der gleichen Stelle wie das Thermoelement in der Referenzprobe positioniert. Nach dem Gussversuch wurde eine Reflektivität von mehr als 20 % und ein Unterschied der Bragg-Wellenlänge bei gleicher Temperatur von unter 150 pm detektiert, was ungefähr einer Abweichung von $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ oder einer Dehnung von $150\text{ }\mu\epsilon$ entspricht. Beide Werte waren für erste Versuche ausreichend, da für genauere Messungen FS-FBGs verwendet wurden, de-

ren Driftverhalten genauer beobachtet wurde. Für die Berechnung der Dehnung und Temperatur wurden Kennwerte, die an der Hochschule München ermittelt wurden, eines regenerierten FBGs des gleichen Fasertyps verwendet. Für die Temperatur gilt [92]:

$$\lambda(T) = A + 8,94 \cdot 10^{-3} \cdot T \frac{nm}{\circ C} + 1,13 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 \frac{nm}{\circ C^2} - 5,63 \cdot 10^{-9} \cdot T^3 \frac{nm}{\circ C^3} \quad (4.1)$$

Die Variable A besitzt die Einheit nm und muss für jedes FBG zu Beginn ermittelt werden. Sie hängt von der Gitterperiode und dem effektiven Brechungsindex ab. Für die Berechnung der Dehnung wird nachfolgende Gleichung angewandt:

$$\lambda(\varepsilon) = A + 1,22 \cdot 10^{-3} \frac{nm}{\mu\varepsilon} \varepsilon \quad (4.2)$$

Da die Temperatur beim Einguss und während des Abkühlens durch den gleichen Probenaufbau annähernd gleich ist, kann mit Hilfe mehrerer Messreihen eine Kalibrierfunktion für die FS-FBGs bestimmt werden. Abbildung 4.1 zeigt die Messergebnisse von vier FS-FBGs in einem Hochtemperaturofen. Es wurden zwei Temperaturzyklen durchfahren, um das Driftverhalten zu observieren. Die Dauer der Zyklen beträgt ein Vielfaches des Gießprozesses, um eine worst-case-Abschätzung zu generieren.

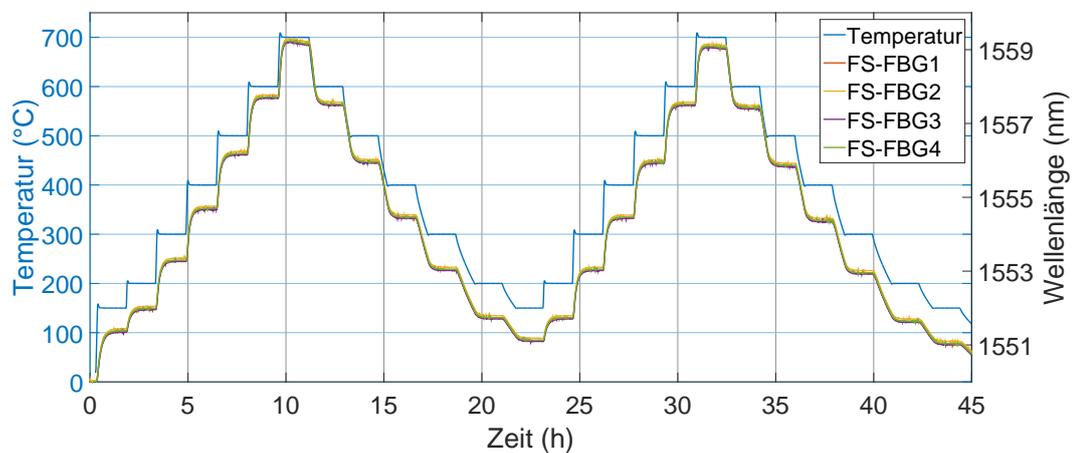


Abbildung 4.1: Bragg-Wellenlänge von vier FS-FBGs in einem Hochtemperaturofen über einen Zeitraum von 45 Stunden und zwei Temperaturzyklen.

In Abbildung 4.2 sind die beiden Zyklen nochmals übereinander geplottet und zusätzlich die Differenz aufgetragen. Es zeigt sich, dass es zwischen den beiden

Aufheizkurven die größten Abweichungen gibt. Diese Abweichungen würden bei der Auswertung der Dehnungen enorme Fehler verursachen, da der temperaturbedingte Drift als Dehnung interpretiert wird.

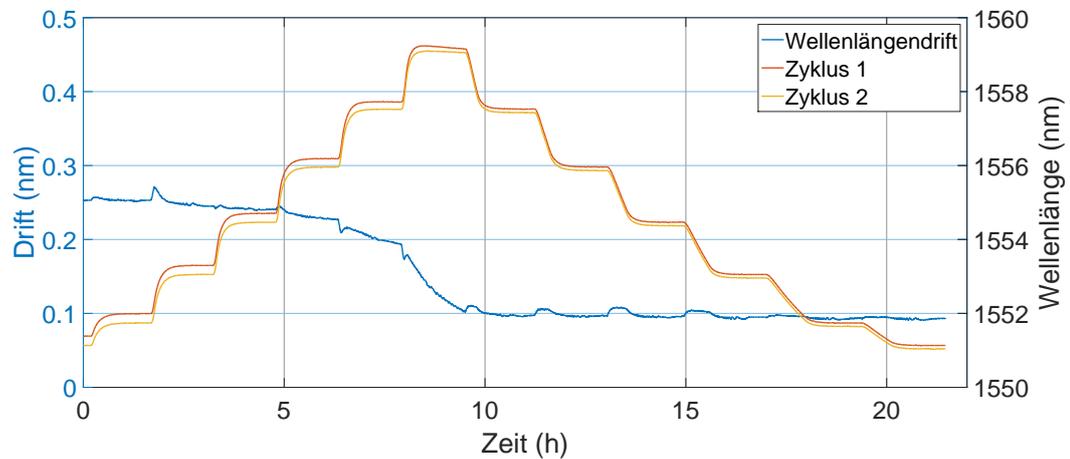


Abbildung 4.2: Verhalten des Mittelwerts der Bragg-Wellenlängen über die zwei Temperaturzyklen und der mittlere Fehler. Durch das Annealing kann der Drift verringert werden.

In Tabelle 4.1 sind die exakten Werte für die Veränderung der Bragg-Wellenlänge angegeben. Es wird jeweils der Endwert jeder Stufe betrachtet, weswegen sich bei 700 °C keine Differenz zwischen Aufheizen und Abkühlen ergibt.

Temp °C	Aufheizen Zyklus 1(nm)	Abkühlen Zyklus 1(nm)	Drift (pm)	Aufheizen Zyklus 2(nm)	Abkühlen Zyklus 2(nm)	Drift (pm)
150	1551,385	1551,132	253	1551,132	1551,039	93
200	1551,993	1551,74	253	1551,74	1551,646	94
300	1553,297	1553,052	245	1553,052	1552,957	95
400	1554,705	1554,466	238	1554,464	1554,369	95
500	1556,186	1555,961	225	1555,959	1555,864	95
600	1557,717	1557,527	190	1557,523	1557,429	95
700	1559,152	1559,152	0	1559,055	1559,055	0

Tabelle 4.1: Abweichungen der Wellenlänge bei zwei Temperaturzyklen.

Es zeigt sich, dass der Drift bei dem zweiten Zyklus geringere Werte annimmt.

Die FS-FBGs durchlaufen einen Annealing-Prozess und werden durch die Aufheiz- und Abkühlvorgänge stabiler. Ein Nachteil dieses Verfahrens ist der zeitliche Aufwand und der Aspekt, dass die Glasfasern hierdurch zerbrechlicher werden. Im Vergleich zu dem Versuchsaufbau im Hochtemperaturofen kühlt die Probe um ein Vielfaches schneller ab und da die Degradation des Gitters immer eine Funktion von Expositionszeit und Temperatur ist, wurde für die Kalibrierung das gleiche Verfahren wie bei den Typ-I-Gittern verwendet. Für die Kalibrierung der FS-FBGs wurde die Geometrie der Anordnung nicht verändert, jedoch nicht mit Ölsand, sondern einer gedruckten Form aus Sand und organischem Binder gearbeitet. Der Prozess des Druckens ist stabiler als die manuelle Anfertigung der Ölsandformen und somit die Abkühlkurven ähnlicher. In Abbildung 4.3 ist der Temperaturverlauf von drei Versuchen aufgezeigt. In dem Bereich bis 400 °C ist die Temperatur der Proben annähernd gleich. Ab dieser Temperatur separieren sich die Proben und erreichen einen maximalen Unterschied von ungefähr 25 °C.

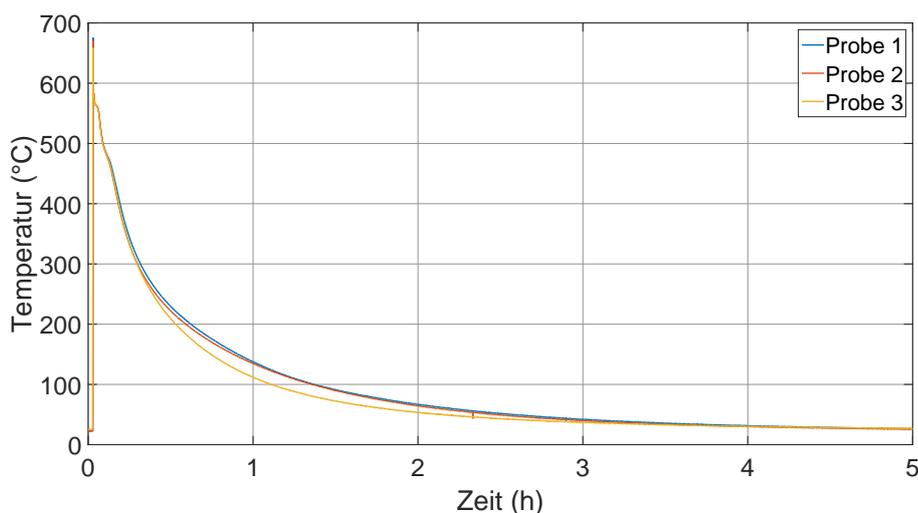


Abbildung 4.3: Temperaturverhalten von drei baugleichen Proben über einen Zeitraum von fünf Stunden.

Nach drei Stunden überlappen sich die Verläufe jedoch wieder. Die Differenz der Temperaturen kann durch verschiedene Aspekte bedingt sein. Unterscheiden sich die Umgebungstemperaturen bei Durchläufen signifikant, so kühlen die Proben divergent ab, wobei dies hier ausgeschlossen werden kann, da die Endwerte identisch sind. Unterschiede in der Dichte der Gussformen führen zu Differenzen in der Wärmeleitfähigkeit. Dieser Störfaktor kann durch die Reproduzierbarkeit der

Formen ausgeschlossen werden. Die Ursache für die Abweichung ist die einzig verbleibende Variable des Prozess. Beim Einguss wird manuell Schmelze in die Form gefüllt und somit kann die Menge dieser variieren. Wird in eine Form mehr Schmelze eingefügt, so ist der Wärmespeicher in dieser größer und wird langsamer abkühlen. Aus diesem Grund muss bei einem Vergleich der mit Hilfe der FBGs erfassten Temperaturen immer die aktuell vorliegende Temperatur in der Referenz als Basis benutzt werden. Für eine erste Berechnung wird eine konstante Temperatursensitivität von $10,7 \frac{pm}{K}$ angenommen und für die drei Proben die berechnete Temperatur über die der Thermoelemente aufgetragen. Der Wert von $10,7 \frac{pm}{K}$ entstammt der Auswertung der Sensitivität der FS-FBGs im Hochtemperaturofen, die in Tabelle 4.2 zu sehen sind. Für die erste Auswertung wird angenommen, dass die Sensitivität keinerlei Abhängigkeit von der Temperatur hat.

	Temperatursensitivität pm/K			Temperatursensitivität pm/K	
Temperaturstufe	Aufheizen Zyklus1	Aufheizen Zyklus 2	Temperaturstufe	Abkühlen Zyklus 1	Abkühlen Zyklus 2
19,45 - 150	10,7	n.a.	600 - 500	15,7	15,7
150 - 200	12,2	12,2	500 - 400	15	14,9
200 - 300	13,0	13,1	400 - 300	14,1	14,1
300 - 400	14,1	14,1	300 - 200	13,1	13,1
400 - 500	14,8	14,9	200 - 150	12,2	12,2
500 - 600	15,3	15,6	150 - 19,45	n.a.	n.a.

Tabelle 4.2: Auswertung der Temperatursensitivität der FS-FBGs.

Das Ergebnis dieser Berechnung wird in Abbildung 4.4 präsentiert. Der Beginn der Auswertung ist der Moment des Einguss und somit ist der zeitliche Verlauf von rechts nach links. In dem Bereich von 0 bis 200 °C gibt die konstante Steigung von $10,7 \frac{pm}{K}$ eine gute Näherung. In den Bereichen darüber muss eine Anpassung vorgenommen werden, um die Differenz zwischen Messung und Berechnung zu verringern.

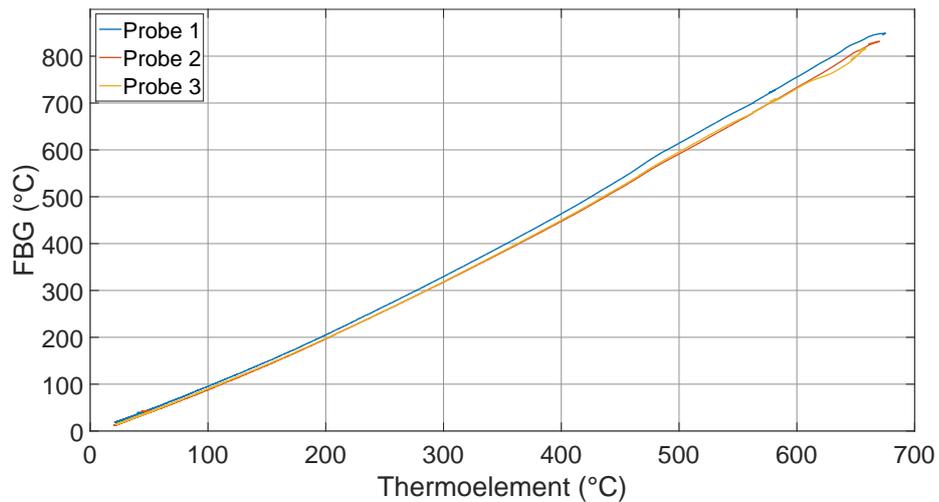


Abbildung 4.4: Berechnete Temperatur über die mit Thermoelementen gemessene Temperatur aufgetragen.

Die berechnete Temperatur, die gemessene Temperatur und deren Differenz ist exemplarisch für eine Probe in Abbildung 4.5 eingefügt.

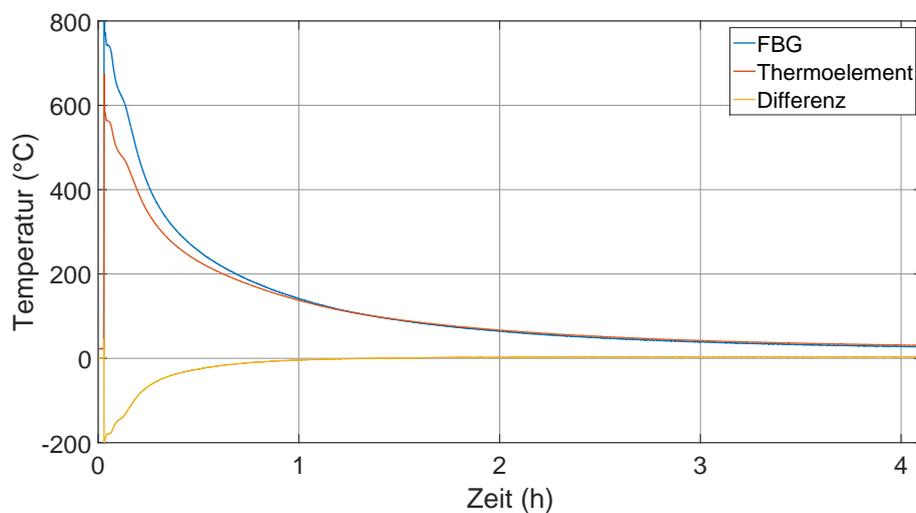


Abbildung 4.5: Berechnete und gemessene Temperatur in einer Probe

Zu sehen ist der bereits erwähnte Fehler durch die konstant angenommene Temperatursensitivität, was zu hohen Unterschieden im ersten Bereich führt. Nach einer Zeit von 2 Stunden und unter 200 °C ist der Fehler konstant, was auf dem Drift des FBGs beruht. Die Messungen zur Stabilität der FS-FBGs im Hochtemperaturofen haben jedoch gezeigt, dass der Drift ab einer Temperatur von 300 °C

nur noch marginal ist, weswegen hier davon ausgegangen werden muss, dass sich entweder der durch hohe Temperaturen induzierte Driftprozess über einen längeren Zeitraum erstreckt oder andere Störeffekte auftreten. Um den Fehler durch die Temperaturabhängigkeit der Wellenlängenverschiebung zu vermindern, wurde die Temperatursensitivität η durch ein Polynom dritten Ordnung angepasst und besitzt die Einheit $\frac{pm}{K}$. Hierfür wurden die Stützstellen aus der Kalibrierung der FS-Gitter im Hochtemperaturofen verwendet.

$$\eta = \left(-5,649 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{T^3}{K^3} + 5,162 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{T^2}{K^2} - 3,145 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{T}{K} + 10,718 \right) \frac{pm}{K} \quad (4.3)$$

Wendet man Gleichung 4.3 auf die Temperaturmessungen in der der Schmelze an so ergibt sich Abbildung 4.6. Es ist zu erkennen, dass die Sensitivität bei höheren Temperaturen, die durch die Messungen im Hochtemperaturofen ermittelt wurden, nicht ohne Modifikation auf die Messungen in der Schmelze übernommen werden kann. Die Werte für η sind in diesem Bereich zu groß und so wird eine zu niedrige Temperatur ermittelt. Die Abweichung ab einer Temperatur von 200 °C hat eine linear monoton steigende Abweichung.

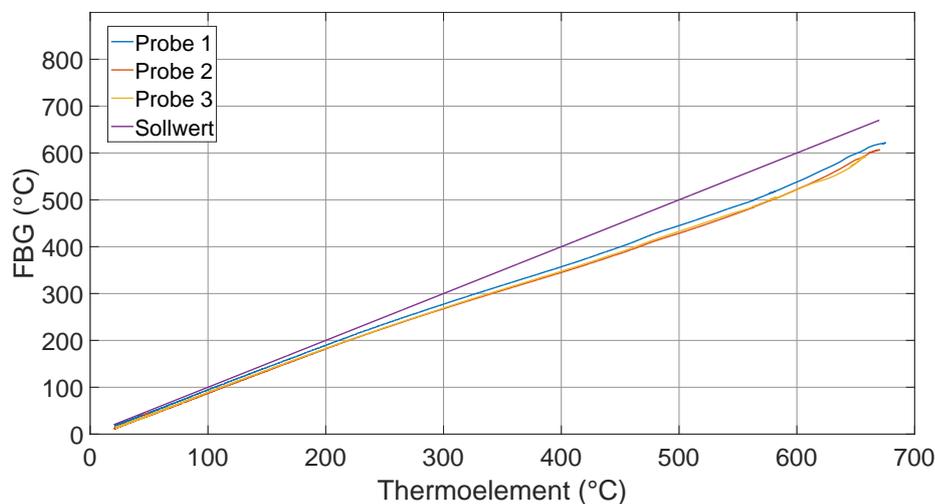


Abbildung 4.6: Berechnete Temperatur mit Hilfe von η aus Gleichung 4.3.

Aus diesem Grund wurde ein linearer Korrekturfaktor zu Gleichung 4.3 hinzugefügt, wodurch sich η^* ergibt.

$$\eta^* = \eta - 1,3 \cdot \frac{pm}{K^2} \cdot \left(\frac{T}{300} \right) \quad (4.4)$$

Mit der angepassten Temperatursensitivität η^* ergibt sich Abbildung 4.7. Es ist zu sehen, dass die Modifizierung die Kennlinien besser an den Sollwert anpasst. Bei Temperaturen über 600 °C werden sich die Werte weiter vom Sollwert differenzieren, was aber in dieser Anwendung nicht von Bedeutung ist, da die Betrachtung der Dehnung erst unterhalb des Beginns der Erstarrung von Interesse ist. Diese beginnt ab einem Bereich von 540 °C und ist mit dem modifizierten η^* gut angenähert.

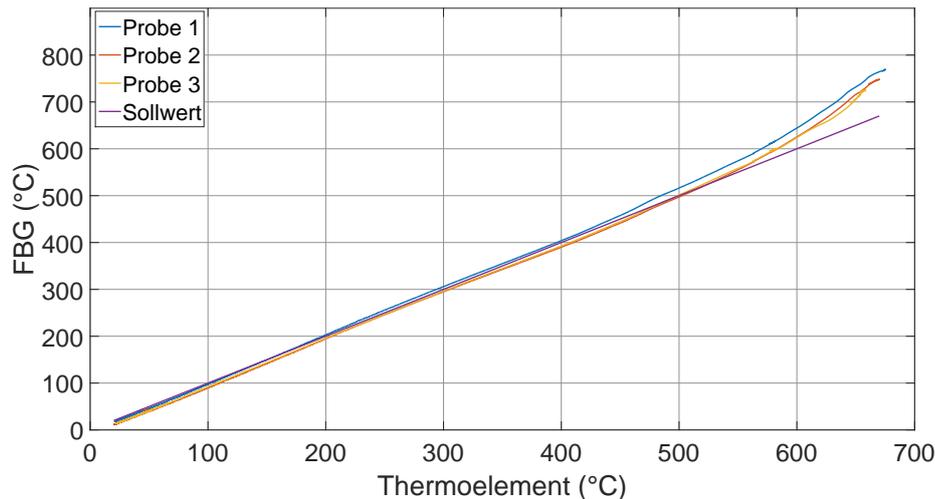


Abbildung 4.7: Berechnete Temperatur mit Hilfe von η^* aus Gleichung 4.4.

Die Abbildung 4.8 stellt die Abweichungen der Mittelwerte aus den drei Proben mit Hilfe unterschiedlicher Temperatursensitivitäten dar. Ein konstanter Wert liefert bei niedrigen Temperaturen gute Werte, weicht jedoch im Bereich von 600 °C am meisten ab. Wird η mit einem Polynom aus den Messungen im Hochtemperaturofen angenähert verringert sich die Abweichung im höheren Temperaturbereich. Wird zusätzlich ein Korrekturfaktor eingefügt nähert sich die berechnete Temperaturkurve gut an und der Fehler zu Beginn der Erstarrung beträgt durchschnittlich lediglich 10 °C. Bei allen Methoden bleibt ein Fehler von umgerechnet 7 °C übrig, welcher durch einen Drift der FBGs bedingt ist. Dieser Drift muss in weiteren Untersuchungen genauer betrachtet werden, um die Auswertung zu verfeinern. Da 7 °C aber lediglich einen Fehler von 70 $\mu\epsilon$ bedeuten und Dehnungen über 10000 $\mu\epsilon$ auftreten, kann dies hier vernachlässigt werden. Die Berechnung der Temperatur mittels der Funktion für Typ-I-Gitter liefert im Bereich über 560 °C die besten Werte, da die Kalibrierfunktion der FS-FBGs auf den Bereich des Beginns der Erstarrung bei ungefähr 540 °C optimiert ist.

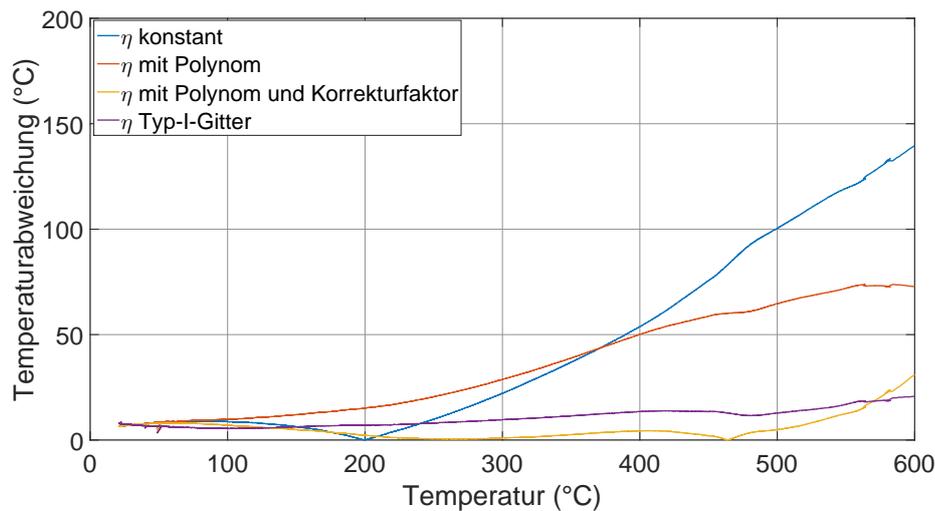


Abbildung 4.8: Vergleich der Abweichungen, die sich durch die unterschiedlichen η ergeben.

4.2 Dehnungen während des Erstarrungsvorgangs der $AlSi_9Cu_3$ -Legierung

Die Dehnungen während des Erstarrungsvorgangs wurden sowohl mit Typ-I-FBGs, als auch FS-FBGs durchgeführt. Der Hauptaugenmerk bei den Messungen mit den Typ-I-FBGs lag auf der Positionierung und einer Untersuchung der Interaktion zwischen Faser und Matrix.

4.2.1 Messergebnisse Typ-I-FBGs

Wie bereits erwähnt zeigen die Typ-I-FBGs durch das Driften einen Fehler, der sich für die genannten Betrachtungen in einem vernachlässigbaren Bereich befindet. Es wird angenommen, dass sich die Verschiebungen der Bragg-Wellenlängen rein durch eine Dehnung in axialer Richtung ergeben. Ziel der Versuche mit den Typ-I-FBGs war die Erprobung einer Positionierungsmethode und eine Abschätzung der gemessenen Dehnung. Die Abbildungen 4.9 bis 4.11 zeigen die Ergebnisse von fünf Proben, in denen das FBG entlang der Flussrichtung positioniert ist. Abbildung 4.9 verdeutlicht nochmals die Abhängigkeit der Abkühlrate von der Gussform. Für die Versuche wurden manuell gefertigte Ölsandformen verwendet, die dadurch unter-

schiedliche Verdichtungen besitzen und die Schmelzen somit divergent erstarren.

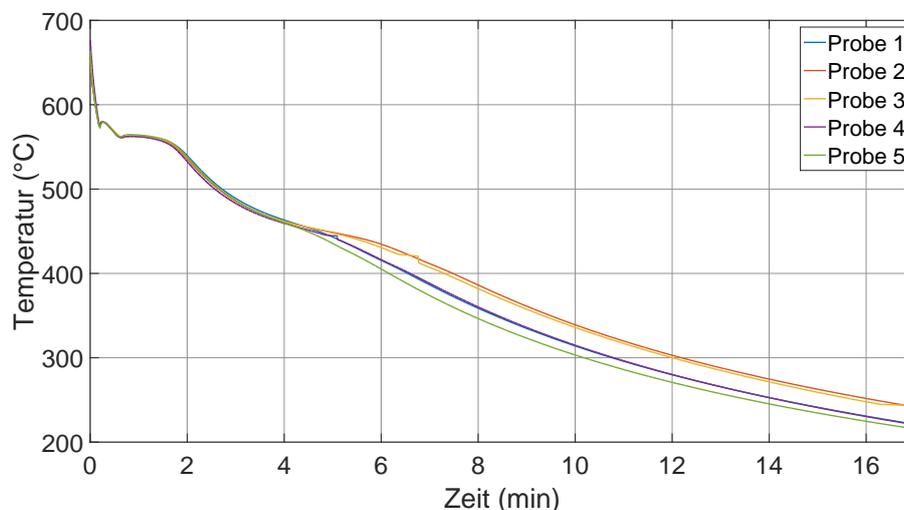


Abbildung 4.9: Temperaturen der fünf Proben. Durch die manuelle Anfertigung der Gussformen ergeben sich unterschiedliche Abkühlraten.

In Abbildung 4.10 sind die zu 4.9 korrespondierenden Dehnungen veranschaulicht. Da angenommen wird, dass sich die Schmelze bis zu einer Temperatur von 560 °C in flüssigem Zustand befindet, wird die Dehnungsmessung ab diesem Punkt begonnen und der Zustand zu diesem Punkt als Nullpunkt gewählt. Die Dehnung in positiver Richtung beruht auf dem Effekt der Anlagerung der ersten Schicht Aluminium an der Faser. Dies führt zu einer Querbelastung, die in dem einfachen Modell der reinen Längsdehnung als Dehnung in axialer Richtung interpretiert wird. Nach einer Zeit von 17 Minuten wird eine Temperatur von ungefähr 250 °C erreicht, die für die Kurzzeitversuche als Endtemperatur gewählt wurde, da die Erstarrung hier bereits abgeschlossen ist. Klar zu erkennen ist, dass eine Darstellung der Dehnung über die Zeit nicht vorteilhaft ist, da unterschiedliche Abkühlraten vorherrschen. Da die Dehnungen abhängig von der vorliegenden Temperatur in der Schmelze und dem korrespondierenden Erstarrungszustand sind, wurden in Abbildung 4.11 die Dehnungen in Abhängigkeit von den sich ergebenden Temperaturen aufgetragen. Beginn der Messung ist bei 600 °C , also am äußersten Punkt der rechten Seite. Auch hier wurde der Offset so gewählt, dass die Graphen zu Beginn keine Differenz besitzen. Zu sehen sind Differenzen bei Beginn der Erstarrung, die sich jedoch bei niederen Temperaturen größtenteils aufheben. Neben den Kennlinien der Proben wurden in Abbildung 4.11 die Fehlerbalken eingetragen, die nochmals verdeutli-

chen, dass die Abweichungen bei niederen Temperaturen geringer werden.

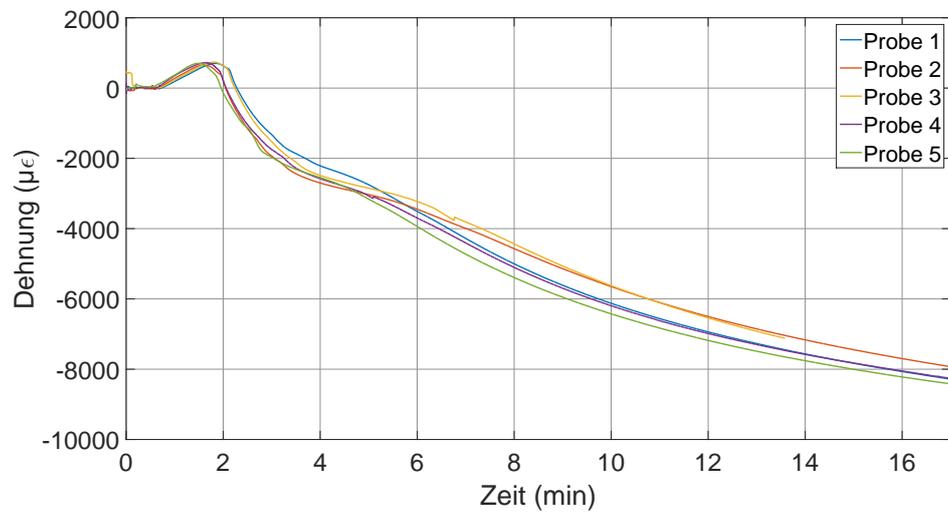


Abbildung 4.10: Dehnungen vor Beginn der Erstarrung werden auf Null gesetzt. Die Divergenz bei den Dehnungen ist durch die Abkühlraten bedingt.

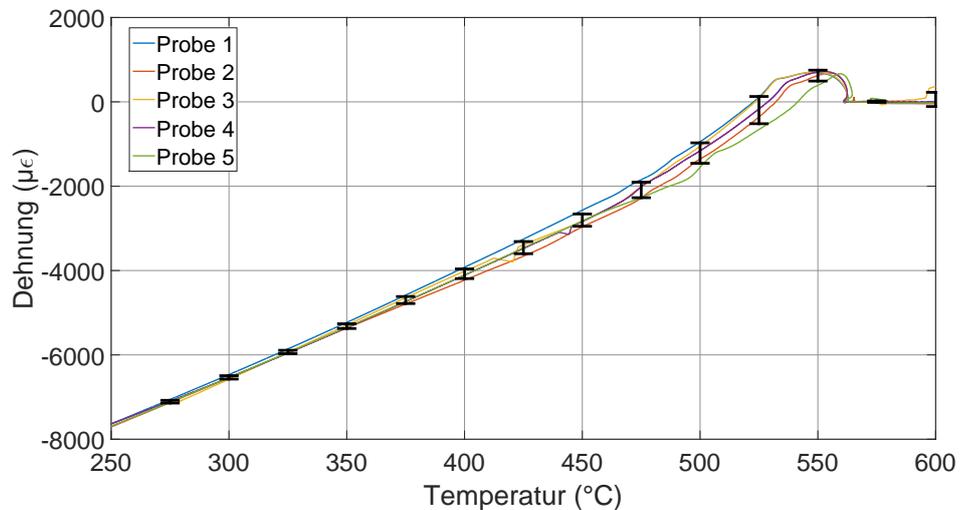


Abbildung 4.11: Dehnungen in Abhängigkeit von der Temperatur. Startpunkt der Messung ist bei 600 °C. Neben den Kennlinien sind zudem die Fehlerbalken eingetragen.

Für alle Darstellungen der Dehnungen in Abhängigkeit von den Temperaturen und mindestens drei Messreihen, wurden neben den Kennlinien noch die Fehlerbalken zur Übersicht eingetragen. Bei den zeitlichen Verläufen wurde hierauf verzich-

tet, da diese die Unsicherheiten bedingt durch die Divergenzen der Abkühlraten einschließen. Probe 3 wurde während des Versuchs beschädigt und somit ist die Messung hier nur bis zu einem Bereich von 270 °C aufgetragen. Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe zeigten, dass die Positionierung entlang der Flussrichtung zu reproduzierbaren Ergebnissen führt und sich die erfassten Dehnungen an den erwarteten Schrumpf von ca. 1 Prozent annähern. Ein weiterer Vorteil dieser Positionierung ist die Möglichkeit, aus solch angefertigten Proben Zugstäbe für weitere Versuche zu fertigen und die FBGs weiterhin als Dehnungssensoren zu verwenden. Als Alternative zu der Position entlang der Flussrichtung wurde eine Befestigung quer hierzu gewählt. Für diesen Variante wurden ebenfalls fünf Proben produziert. Die Dehnungen in Abhängigkeit von der Zeit sind in Abbildung 4.12 gezeigt. Wie zuvor wird der Bereich vor 560 °C als Nullpunkt gewählt, da sich hier mögliche Dehnungen oder Kontraktionen aus Störeffekten ergeben, die hier nicht genauer untersucht wurden. Wie bei der Platzierung längs der Flussrichtung gibt es Abweichungen der Dehnungen, die durch unterschiedliche Abkühlraten bedingt sind. Deswegen wird auch hier die Ansicht in Abbildung 4.13 für weitere Aussagen in Betracht gezogen.

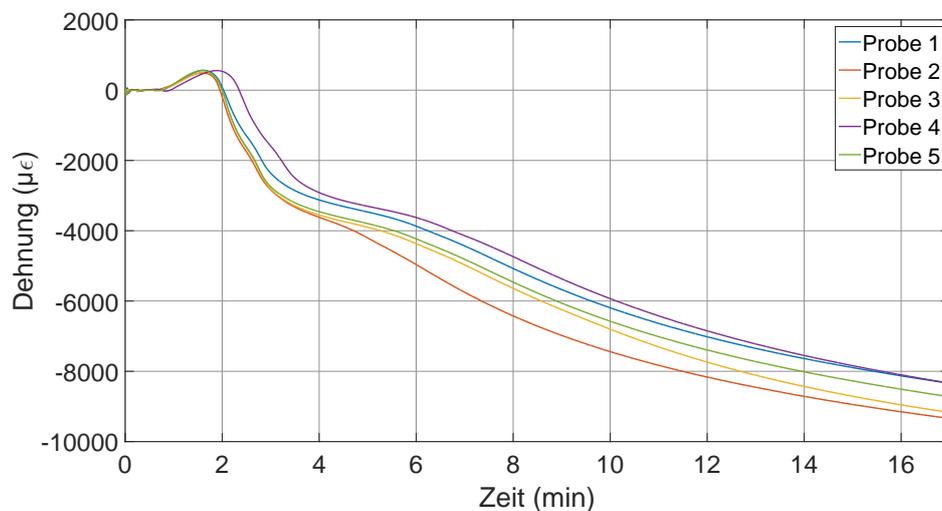


Abbildung 4.12: Dehnungen vor Beginn der Erstarrung werden auf Null gesetzt. Die Divergenz bei den Dehnungen ist durch die Abkühlraten bedingt.

Die Betrachtung für Abbildung 4.13 beginnt auf der rechten Seite und zeigt die auftretende Dehnung während des Abkühl- und Erstarrungsprozess. Die auftretenden Dehnungen bei der Positionierung quer zur Flussrichtung entsprechen annähernd denen längs der Flussrichtung. Im Gegensatz zu zweiteren divergieren die

Werte bei niedrigeren Temperaturen. Dieses Verhalten bestätigen ebenfalls die eingetragenen Fehlerbalken. Da beide Positionen bei den ersten Betrachtungen Werte liefern, die dem Schrumpf der Schmelze entsprechen, die Position längs der Flussrichtung jedoch bei niedrigeren Temperaturen kleinere Abweichungen zeigt, wurde für die weiteren Versuche diese gewählt. Darüber hinaus ermöglicht diese Methode das Anfertigen von Zugstäben, die für weitere Untersuchungen verwendet werden können.

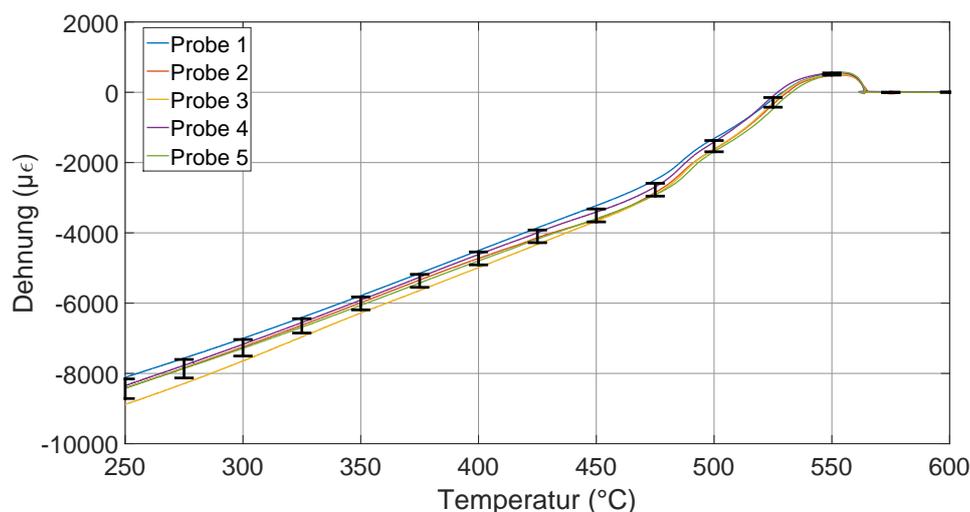


Abbildung 4.13: Dehnungen in Abhängigkeit von der Temperatur. Startpunkt der Messung ist bei 600 °C. Neben den Kennlinien sind zudem die Fehlerbalken eingetragen.

Für die Anfertigung von Zugstäben ist es entscheidend, dass die FBGs in der gewählten Position nicht nur die Abkühlung bis zu einem Bereich von 250 °C aushalten, sondern sowohl die Abkühlung bis zur Raumtemperatur als auch den Vorgang des Lösens des Bauteils aus der Gussform ohne Schäden überstehen. Versuche bezüglich dieses Aspekts wurden bereits mit FS-FBGs durchgeführt.

4.2.2 Messergebnisse FS-FBGs

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Messung mittels FS-FBGs vorgestellt. Die Sensoren wurden von der Firma FemtoFiberTec bezogen und hierbei zwei unterschiedliche Fasertypen untersucht. Zum einen der selbe Fasertyp wie bei den Typ-I-FBGs, GF1B, und zum anderen die Standardfaser SMF 28. Zu Beginn wird

die Umrechnung von Temperatur und Dehnung wie bei Typ-I-Gittern durchgeführt. Im Anschluss wird auf die Ergebnisse die Umrechnung mittels der Temperatursensitivität aus den Kalibrierungsmessungen angewandt und verglichen. Für alle Versuche wurden Ölsandformen benutzt.

In Abbildung 4.14 und 4.15 sind die Eingussversuche mit zwei FS-FBGs, eingeschrieben in eine SMF 28 Faser und einer Polyimid-Beschichtung, gezeigt. Die Beschichtung wurde bei einer Probe entfernt und einmal mit Beschichtung installiert. Die Unterschiede der Dehnungen in Abbildung 4.14 sind wie bei den Typ-I-Gittern auf die Abkühlrate zurückzuführen. Die Differenz der Endwerte ist durch den unterschiedlichen Drift begründet. Die Kontraktionen entsprechen den Werten, die zuvor mit den Typ-I-Gittern aufgezeichnet wurden. Es ist jedoch deutlich zu erkennen, dass in dem Bereich von 250 °C bis Raumtemperatur noch weitere Effekte in der Probe auftreten, weswegen eine Überwachung auch über den Erstarrungszeitpunkt von Bedeutung ist.

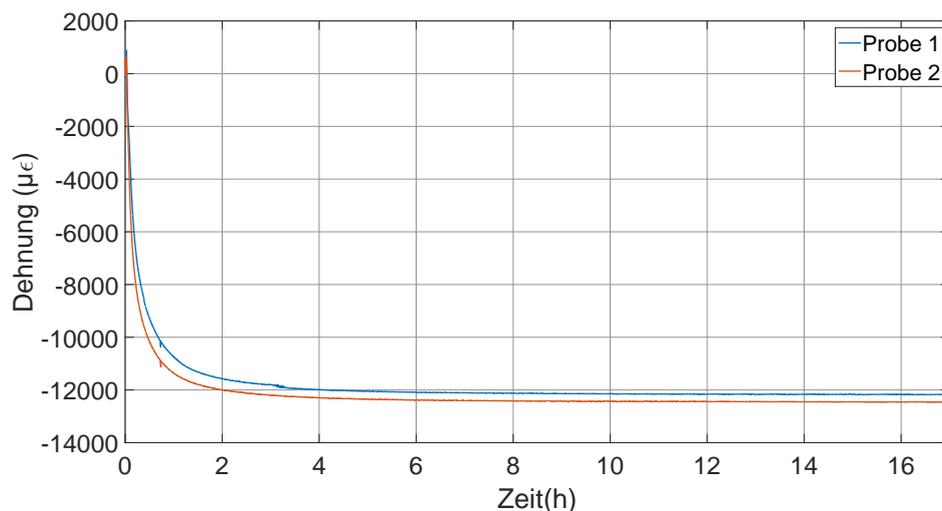


Abbildung 4.14: Erfasste Dehnungen in einer Probe bis zu Raumtemperatur mit FS-FBGs und einer Polyimid-Beschichtung.

Im Vergleich zu Glasfasern mit einer Acrylat-Beschichtung ist das Entfernen der Beschichtung bei Polyimid aufwendiger. Zwar zeigen die Dehnungen keinen signifikanten Unterschied, was auf einen Einfluss der Beschichtung auf die Messung deuten würde, jedoch werden durch das Verbrennen der Beschichtung Störstellen im Material induziert. Zu Beginn wurde bereits durch die Schlifffbilder gezeigt, dass Verunreinigungen zu Lunkern führen können und deswegen ein Filter notwendig

war. Wird nun eine Faser mit einer nicht thermisch resistenten Beschichtung eingebettet, so wird der Filter und dessen Wirkung umgangen.

Um die beiden Dehnungen zu vergleichen, wurde in Abbildung 4.15 die Dehnung in Abhängigkeit von der Temperatur aufgetragen. Hierbei ist zu sehen, dass die Dehnungen während des Abkühlvorgangs bis 200 °C fast identisch sind und unterhalb davon eine Differenz entwickeln, die aber einen konstanten Wert annimmt, was aus dem vorherigen Graphen entnommen werden kann. Bei Probe 1 ist bei ca. 100 °C und bei Probe 2 bei ungefähr 120 °C eine Unstetigkeit in der Kurve zu sehen. Diese kommt durch extrinsische Einflüsse, wie dem Bewegen der Gussform.

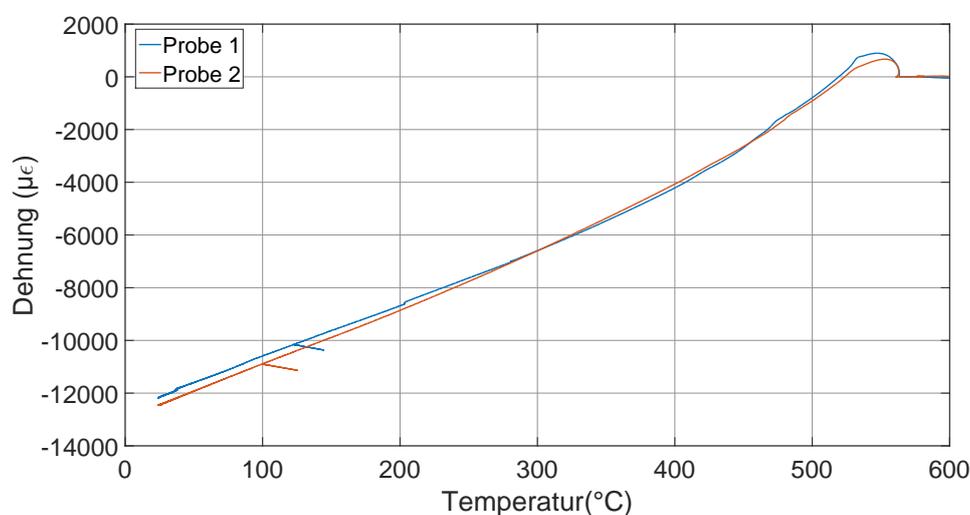


Abbildung 4.15: Die Dehnungen mit den FBGs in der Faser mit Polyimidbeschichtung sind bis 250 °C fast identisch und entwickeln darunter eine Differenz.

Die Messung mit den Polyimid-beschichteten Fasern hat gezeigt, dass eine Messung mit FS-FBGs bis zur Raumtemperatur möglich ist. Der Nachteil der aufwendigen Entfernung der Beschichtung führte aber dazu, dass weitere Fasern untersucht wurden. Nach den geschilderten Versuchen, wurde im Messaufbau eine geringfügige Änderung durchgeführt. Für die weitere Verarbeitung war die Fixierung der Faser in der oberen Metallkapillare hinderlich, da sich zeigte, dass sich hier vermehrt Brüche ergaben. Aus diesem Grund wurde für die nachfolgenden Versuche eine Befestigung mit Klebeband im oberen Bereich getestet, die nach der Erstarrung entfernt wurde. Mit dieser Konfiguration wurden zum einen Gitter in einer GF1B-Faser und zum anderen in einer SMF 28 verwendet. Die Abbildungen 4.16 und 4.17 zeigen die Versuche mit der GF1B-Faser. Die Endwerte der Dehnungen

mit der flexiblen Befestigung entsprechen fast der Dehnung bei den vorherigen Versuchen. Die erfasste Kontraktion ist minimal geringer, was auf einen Einfluss der neuen Befestigung schließen lässt. Der Verlauf kurz nach Einguss entspricht dem bereits gezeigten Verhalten und wird hier und für weitere Auswertungen nicht genauer betrachtet.

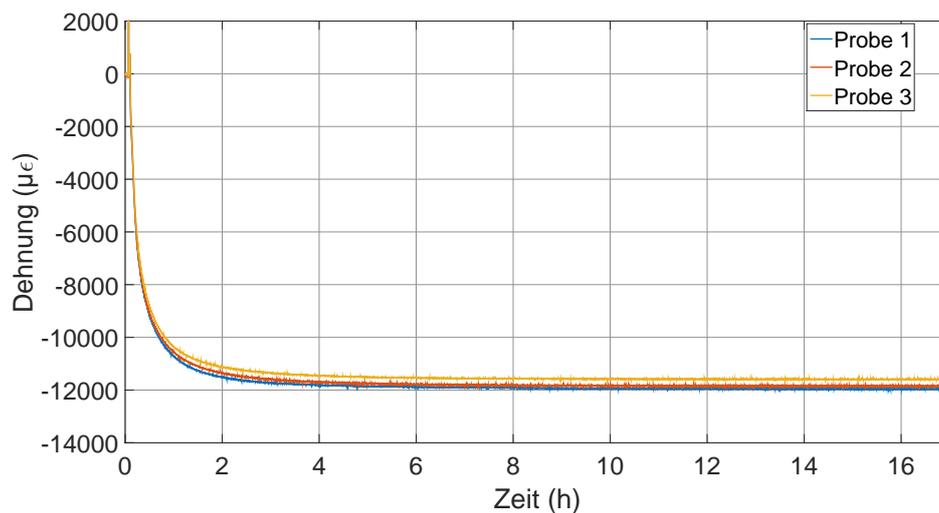


Abbildung 4.16: Die Extremwerte der Dehnungen in der GF1B-Faser weichen von den vorherigen leicht ab, was durch die Fixierung der Faser bedingt ist.

Abbildung 4.17 stellt die Abhängigkeit der Dehnung von der Temperatur dar. Die Werte verhalten sich wie bei den vorherigen Proben. Bereits kurz nach dem Einguss zeigt sich eine Abweichung der Werte für die Dehnungen. Da in dem Temperaturbereich über 540 °C die Fasern schwimmend gelagert sind und damit keine Dehnungen durch die Erstarrung auftreten kann, ist in Abbildung 4.18 die Differenz, die bereits bei 540 °C vorliegt, ausgeglichen. Durch die Anpassung der Dehnungen bei 540 °C ergibt sich in Abbildung 4.18 eine Überlappung der Kennlinien. Werden die Fehlerbalken in den Abbildungen 4.17 und 4.18 verglichen, so wird deutlich, dass mittels der Anpassung bei 540 °C die Abweichung der Kennlinien untereinander im relevanten Bereich verringert wird und bei Raumtemperatur annähernd gleich ist. Gründe für die anfänglichen Abweichungen nach Einguss ist eine Beeinflussung der Vorspannung durch unterschiedliche Fließgeschwindigkeiten oder Abweichungen der Füllmenge.

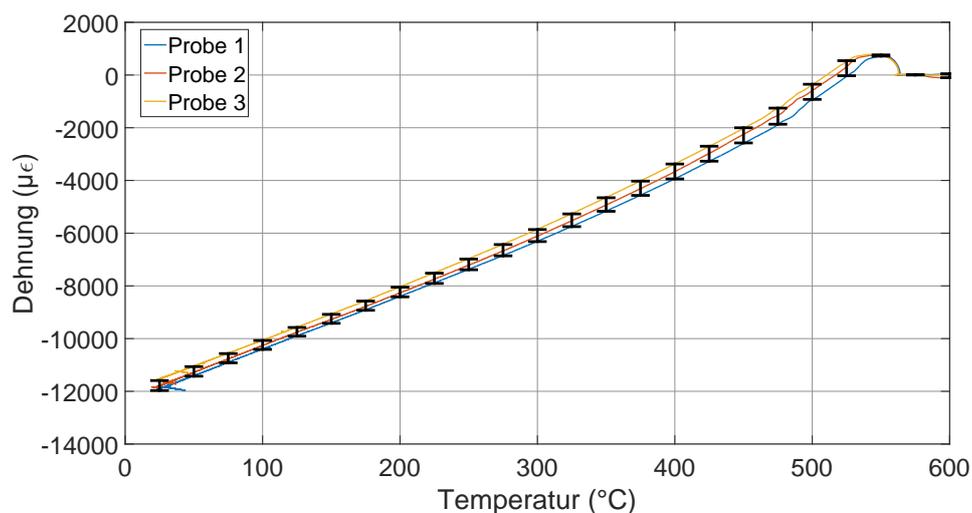


Abbildung 4.17: Die erfassten Dehnungen weichen bereits bei Einguss der Schmelze signifikant voneinander ab. Neben den Kennlinien sind zudem die Fehlerbalken eingetragen.

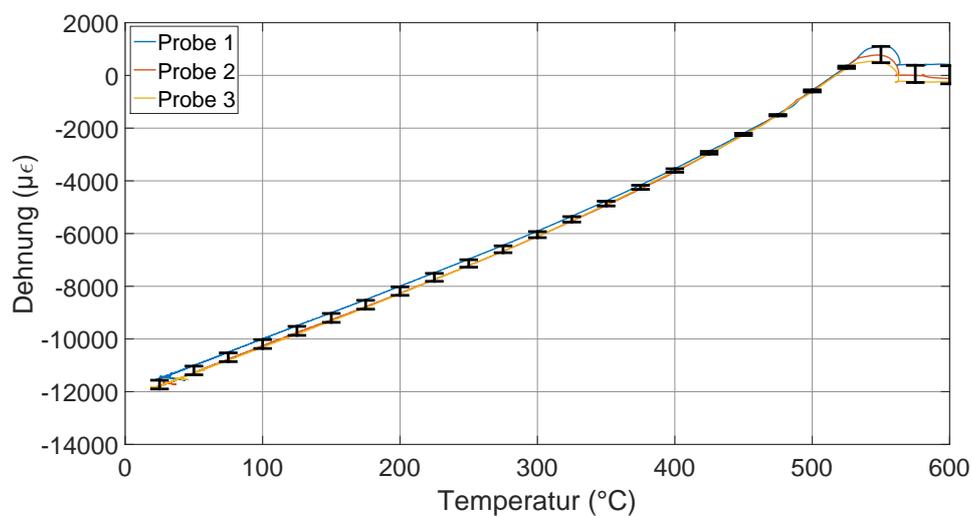


Abbildung 4.18: Anpassung der Messkurven durch Angleichen der Dehnungen bei 540 $^{\circ}\text{C}$. Neben den Kennlinien sind zudem die Fehlerbalken eingetragen.

Für die letzten Messreihen wurden FS-Gitter, eingeschrieben in die Standardfaser SMF 28 und einer Acrylatbeschichtung, verwendet. Auch hier wurde die Beschichtung entfernt. In Abbildung 4.19 ist der zeitliche Dehnungsverlauf gezeigt. Wie zuvor ergeben sich durch die Änderung der Befestigung geringere Beträge der Extremwerte. Der Verlauf und die ermittelten Extremwerte unterscheiden sich bei

den verschiedenen Fasern so gering, dass von identischem Verhalten gesprochen werden kann. Wird die Dehnung auf die vorherrschende Temperatur bezogen, so ergibt sich Abbildung 4.20. Die Kontraktionen zeigen wie bei den vorherigen Auswertungen ähnliches Verhalten. Die Werte direkt nach dem Einguss besitzen einen geringeren Unterschied als bei den GF1B-Fasern. Dieser Effekt ist jedoch prozessbedingt und somit hat der Fasertyp keinen Einfluss auf die anfänglichen Unterschiede. Die eingetragenen Fehlerbalken in Abbildung 4.20 zeigen, dass sich die Abweichungen der Messwerte zu niederen Temperaturen hin stabilisieren.

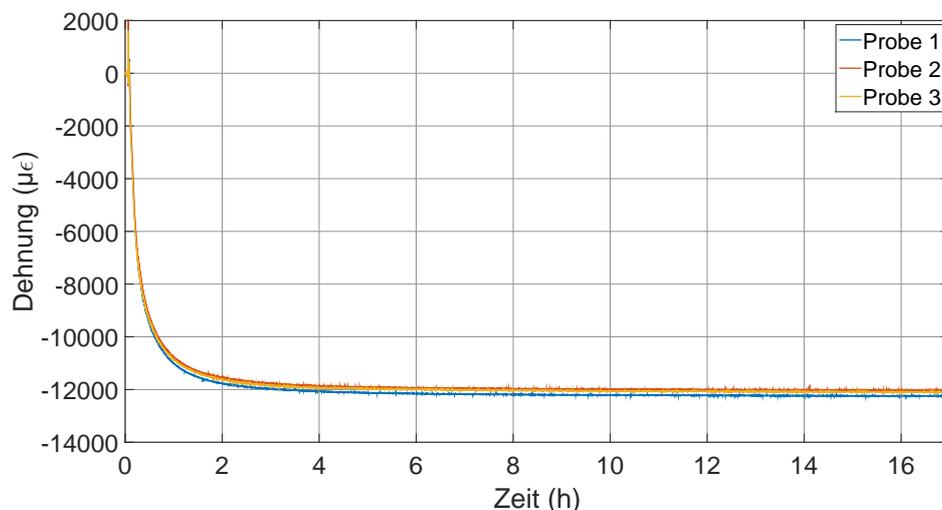


Abbildung 4.19: Zeitlicher Verlauf der Dehnungen bei FS-FBGs eingeschrieben in die Standardfaser SMF 28.

Auf Grund der Notwendigkeit die Proben nach Erreichen der Raumtemperatur weiter zu verarbeiten, wurde für die weiteren Beobachtungen die flexible Befestigung verwendet. Da die Standardfasern in Vergleich zu den GF1B vergleichbare Werte geliefert haben und in der Produktion kostengünstiger sind, wird sich auf diesen Typ festgelegt. Nachfolgend wird die Kalibrierfunktion für die FS-Gitter auf die Proben aus Abbildung 4.19 angewandt werden. Abbildung 4.21 zeigt den Verlauf der Dehnungen, bei denen zur Kompensation des Temperatureinflusses die Kalibrierfunktion der FS-Gitter angewandt wurde. Es ist zu erkennen, dass der Endwert identisch mit der in Abbildung 4.19 ist. Die modifizierte Kalibrierfunktion hat somit keine entscheidende Auswirkung auf den Endwert der Messung.

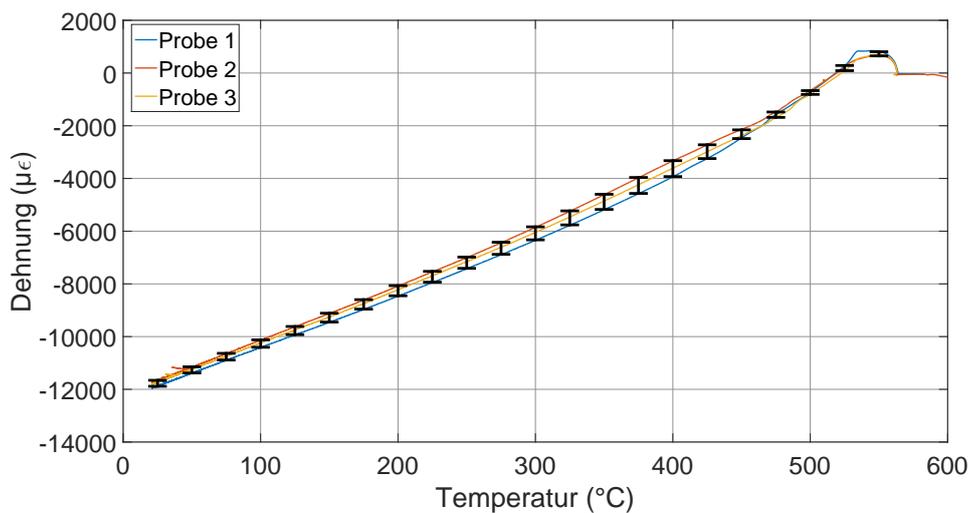


Abbildung 4.20: Dehnungen der FS-FBGs in SMF-Fasern in Abhängigkeit von der Temperatur aufgetragen.

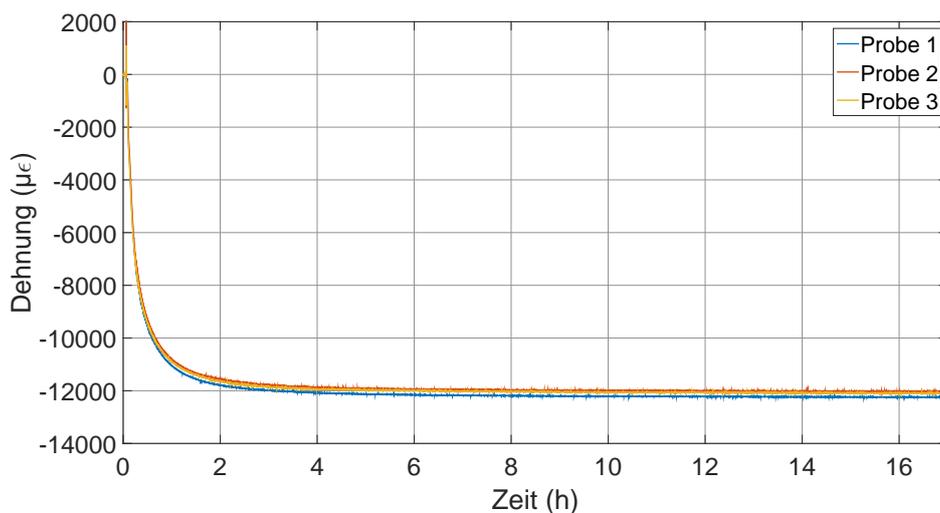


Abbildung 4.21: Zeitlicher Verlauf der Dehnungen bei denen zur Temperaturkompensation die Kalibrierfunktion der FS-FBGs verwendet wurde.

Um die anfänglichen Dehnungen zu vergleichen wurde, in Abbildung 4.22 das Verhalten innerhalb der ersten 30 Minuten aufgetragen. Hier zeigen sich kurz nach Einguss erhebliche Differenzen, die durch Abbildung 4.8 erläutert werden kann. Bei der modifizierten Kalibrierfunktion entsprechen die berechneten Temperaturen exakter den realen Werten. Aus diesem Grund wird bei der Kompensation ein geringerer Anteil der Wellenlängenverschiebung auf den Temperatureinfluss gewichtet,

wodurch der Dehnungsanteil einen stärkeren Einfluss hat. Bei niedrigeren Temperaturen überlappen die Kennlinien aus Abbildung 4.22 wieder, da zum einen der Fehler durch die Kalibrierung geringer wird und zum anderen durch die niedrigeren Temperaturen der Einfluss der Temperatur generell geringer gewichtet wurde.

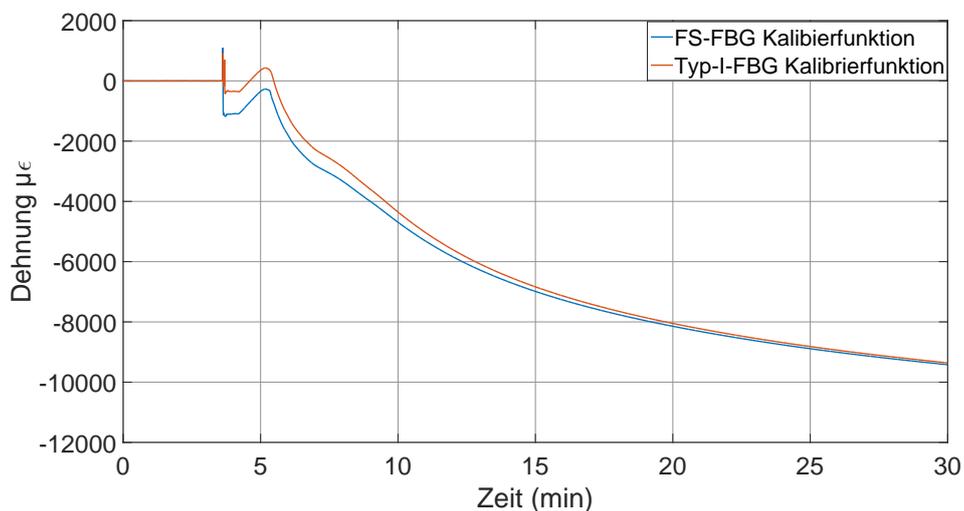


Abbildung 4.22: Vergleich der Dehnung berechnet mit unterschiedlichen Kalibrierfunktionen.

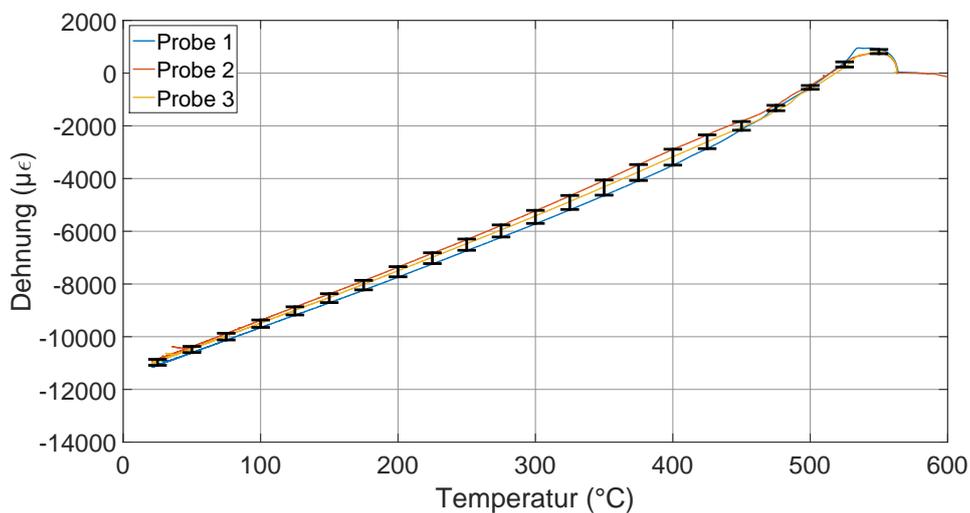


Abbildung 4.23: Dehnungen der FS-FBGs in SMF-Fasern in Abhängigkeit von der Temperatur aufgetragen. Zur Kompensation der Temperatur wurde hierbei die angepasste Kalibrierfunktion verwendet.

Abschließend ist in Abbildung 4.23 noch die Dehnung, mit der modifizierten Kalibrierfunktion, in Abhängigkeit von der Temperatur gezeigt. Im Vergleich zu Abbildung 4.20 ist der Endwert bei Raumtemperatur betragsmäßig geringer. Dies ist bedingt durch die Anpassung der Dehnung bei Erreichen der Erstarrungstemperatur. Zuvor wurde dargelegt, dass sich die Dehnungen zu Beginn erheblich durch die unterschiedliche Temperaturkompensation differenzieren. Bei Anwendung der Kalibrierfunktion der FS-FBGs ist dieser anfängliche Offset größer, weswegen der Endwert in Abbildung 4.23 über dem des erwarteten Werts liegt.

4.2.3 Diskussion

Bei den Untersuchungen zu Anwendbarkeit von FBGs im Bereich von Legierungen wurden Standard-FBGs, die von der Fakultät für angewandte Naturwissenschaften und Mechatronik der Hochschule München hergestellt wurden, und FS-FBGs der Firma FemtoFiberTec in die Schmelzen eingebettet. Bei beiden Gittern konnte gezeigt werden, dass die gewählte Positionierung entlang der Flussrichtung der Schmelze einen Einsatz bis Raumtemperatur ermöglichen. Mittels Versuchen bezüglich des Temperaturverhaltens konnte gezeigt werden, dass die FS-FBGs ein temperaturstabileres Verhalten aufzeigen als die Typ-I-Gitter. Bei zweiteren ergibt sich durch den Drift, bedingt durch die Exposition gegenüber hohen Temperaturen, ein größerer Fehler als bei den FS-FBGs. Deren geringer Drift könnte zusätzlich durch einen Annealing-Prozess vor dem Einguss minimiert werden. Dies hat jedoch zwei entscheidende Nachteile zur Folge. Zum einen den erheblichen Mehraufwand durch den zusätzlichen Arbeitsschritt und zum anderen werden Glasfasern, die über einen längeren Zeitraum hohen Temperaturen ausgesetzt werden, spröde. Diese Sprödigkeit senkt sowohl die Widerstandsfähigkeit während des Erstarrungsprozess als auch die Wahrscheinlichkeit, dass die Messproben den abschließenden Arbeitsschritt des Fertigers von Zugstabproben überstehen.

Die Problematik der Sprödigkeit konnte bei Messungen mit regenerierten FBGs (RFBGs) beobachtet werden. Diese entstehen aus Typ-I-Gittern, die in wasserstoffbeladene Fasern eingeschrieben und im Hochtemperaturofen einem Annealingzyklus ausgesetzt wurden. Diese RFBGs besitzen zwar eine bessere Temperaturstabilität als die untersuchten Sensoren, konnten jedoch zur Dehnungsmessung zum Teil nicht in die Gussform eingebracht werden, da sie bei diesem Arbeitsschritt zerbrachen. Der Teil der Sensoren, der diesen Schritt überstand, erlitt einen Faserbruch

kurz nach Einguss oder zu Beginn der Erstarrung. Aus diesem Grund konnten keine Ergebnisse zur Dehnungsmessung mit RFBGs produziert werden. Ob sich dieser Typ der FBGs für den Einsatz in der Schmelze zu einem späteren Zeitpunkt eignen wird, muss noch untersucht werden.

Durch die Beobachtung des Verhaltens der FS-FBGs im Hochtemperaturofen konnte eine Kalibrierfunktion generiert werden, die für den Einsatz in der Schmelze optimiert wurde. Für Temperaturen oberhalb der Erstarrungstemperatur kann diese jedoch nicht angewandt werden.

Bei der Analyse der Messdaten wurde davon ausgegangen, dass keine zusätzlichen Belastungen in radialer Richtung auf die Faser wirken. Bei Betrachtung der Schlibilder, die im Zuge der Optimierung der Anbindung der Faser erstellt wurden, kann gesehen werden, dass ein Einfluss der radialen Belastung sehr wahrscheinlich ist. Für die Modellierung eines Sensormodells unter Einbezug der Querbelastung sind jedoch weitere Untersuchungen notwendig, wie Messungen mittels Neutronendiffraktometrie. Zusätzlich werden detaillierte Modelle für das Verhalten der Schmelze während des Abkühlvorgangs benötigt, durch die auf die Magnitude der auftretenden Radialbelastungen geschlossen werden kann. Die Modifikation des Messaufbaus durch die variable Fixierung der Faser bewirkte eine geringe Abnahme der erfassten Kontraktion. Da sich aber die weitere Verarbeitung der Proben durch diese Fixierung erleichtert und einen größeren Durchsatz garantiert, wird diese Differenz nicht weiter gewichtet, zumal sich diese auch in einem geringen Bereich bewegt. Mit Hilfe von Messungen bezüglich der Effekte in der Schmelze ohne Faser kann darauf geschlossen werden, dass die FS-FBGs in der gewählten Position das Dehnungsverhalten trotz der angenommenen Vereinfachungen wiedergeben. Somit konnte gezeigt werden, dass FBGs im Bereich des Gießereiwesens einen neuen Einsatzbereich bilden und mit Hilfe weiterer Untersuchungen das Potenzial bieten, alternative Sensorik wie die Neutronendiffraktometrie, die auf Grund der hohen Kosten nicht beliebig anwendbar ist, zu ersetzen.

4.3 Dehnungen bei Belastung von Sandstein

In diesem Abschnitt werden mögliche Einflussfaktoren, die an der Lorenzkirche in Nürnberg vorliegen können, separiert untersucht. Zu Beginn wurde der Sensor bezüglich der Empfindlichkeit auf Dehnung und Temperatur kalibriert. Hierbei galt

es zu zeigen, dass durch die Klebung in der Glaskapillare die FBGs zur Messung der Temperatur komplett von Dehnungen kompensiert sind. Zudem muss sichergestellt werden, dass die Dehnung auf das FBG zur Dehnungsmessung so übertragen wird, als ob es sich um eine reine Faser handeln würde. Im Anschluss hieran wird das Verhalten unter thermischer Belastung in einer Klimakammer untersucht. Die mechanische Belastung wird mittels eines 3-Punkt-Biegeversuchs bei trockenen als auch feuchten Proben untersucht. Im Abschluss werden die Ergebnisse zur Ermittlung der Dehnung bedingt durch einen höheren Feuchtegehalt im Sandstein gezeigt.

4.3.1 Kalibrierung des Sensors unter thermischer und mechanischer Belastung

Vor Einsatz der Sensoren mussten diese noch bezüglich Dehnungs- und Temperatursensitivität kalibriert werden. Für die Ermittlung der Dehnungssensitivität wurde der Aufbau aus Abbildung 4.24 verwendet. Eine der Glaskapillaren wurde fixiert und die zweite durch Führungsschienen mit Kugellagern gleitend befestigt. Auf der Seite mit den Führungsschienen wurde in 0,1 Newton-Schritten eine Kraft bis zu 2 Newton aufgetragen und die Verschiebung der Wellenlänge des Dehnungssensors aufgezeichnet. Eine Kompensation der Temperatur wurde nicht vorgenommen, da bei der kurzen Dauer der Versuchsdurchführung eine konstante Temperatur angenommen werden konnte. In Abbildung 4.25 ist die Auswertung der Kalibrierungsmessungen gezeigt. Die Umrechnung von Änderung der Wellenlänge zu Dehnung kann laut Herstellerangaben von FBGS mit der Sensitivität von $\lambda_0 \cdot 7,8 \cdot 10^{-7} \mu\epsilon^{-1}$ berechnet werden zu:

$$\epsilon = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0 \cdot 7,8 \cdot 10^{-7} \mu\epsilon^{-1}} \quad (4.5)$$

Um das Verhalten der Sensoren zu vergleichen wird die Dehnung berechnet, die sich ergibt, wenn eine blanke Faser ohne Kapillaren gedehnt wird. Diese ergibt sich mittels Gleichung 4.6 [132].

$$\epsilon = \frac{F}{74GPa \cdot \pi \cdot (62,5\mu m)^2} \quad (4.6)$$

Mit 74 GPa wird das E-Modul der Faser angegeben und 62,5 μm ist der Radius der Faser. Ziel der Sensoranordnung ist, dass die FBGs in den Kapillaren von jeglicher Dehnung entkoppelt sind und die Übertragung der Kraft auf das mittlere FBG ohne Dämpfung stattfindet.

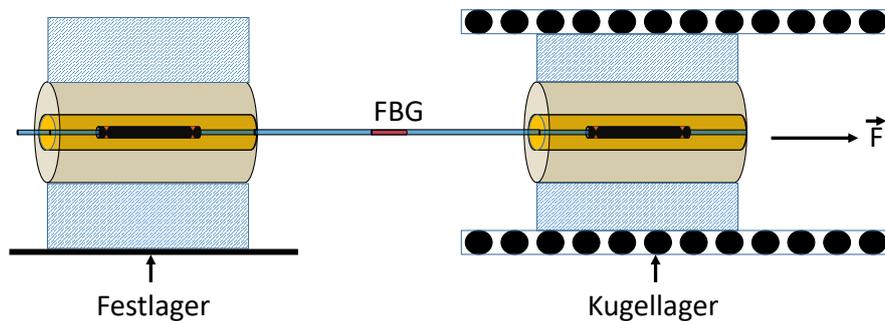


Abbildung 4.24: Aufbau zur Ermittlung der Dehnungssensitivität. An einer Seite des Sensoraufbaus wird eine Kraft aufgetragen und die Verschiebung der reflektierten Wellenlänge ermittelt

Wird die theoretische Dehnung mit den ermittelten Daten in Abbildung 4.25 verglichen, so ist zu erkennen, dass im Bereich bis 0,5 N die Datenpunkte nahe an den erwarteten Werten liegen. Bei höheren Belastungen ergeben sich bei der Umrechnung der Messpunkte geringere Dehnungen als vorgegeben. Ursache für diese Differenz kann eine Dämpfung durch die Klebung und somit ein Transfer der Dehnung auf die Temperatursensoren sein. Daneben können aber auch systembedingte Parameter die Messung beeinflussen. Der Prüfstand selbst besitzt eine Dämpfung, da nie eine reibungslose Übertragung der Kraft stattfindet. Um dies genauer zu betrachten wurden die Bragg-Wellenlängen der Temperatursensoren in Betracht gezogen. Diese zeigten keinerlei Änderung der Wellenlänge bei Erhöhung der Belastung auf den Sensoraufbau.

Die Dehnungskalibrierung hat somit gezeigt, dass Dehnungen nur durch das FBG in der Mitte des Aufbaus erfasst werden und die Temperatursensoren komplett von Dehnungen entlastet sind. Neben der Evaluierung der Dehnungsempfindlichkeit wurde der Einfluss der Temperatur auf alle Sensoren überprüft. Da die Integration der FBGs in die Metallkanüle und nachfolgend in die Glaskapillare manuell erfolgt, gibt es Variationen bei der Anfertigung. Dies betrifft zum einen die Menge des Klebers und die Klebepunkte, zum anderen die Pressung der Metallkanüle

auf die Glasfaser. Für die Untersuchung des Temperaturverhaltens der Sensoren wurden diese in der Klimakammer positioniert und der Zyklus in Abbildung 4.26 eingestellt.

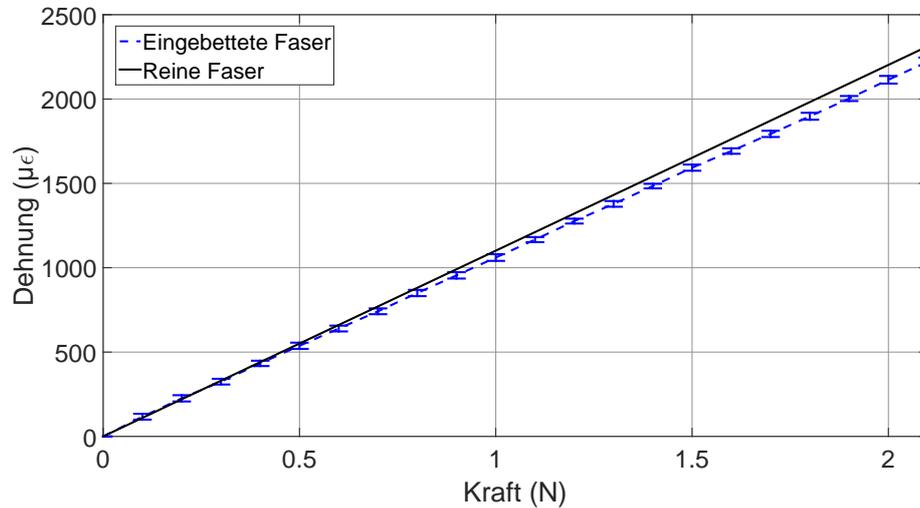


Abbildung 4.25: Die Werte der erfassten Dehnungen entsprechen im relevanten Bereich von 0 N bis 0,5 N den berechneten idealen Werten.

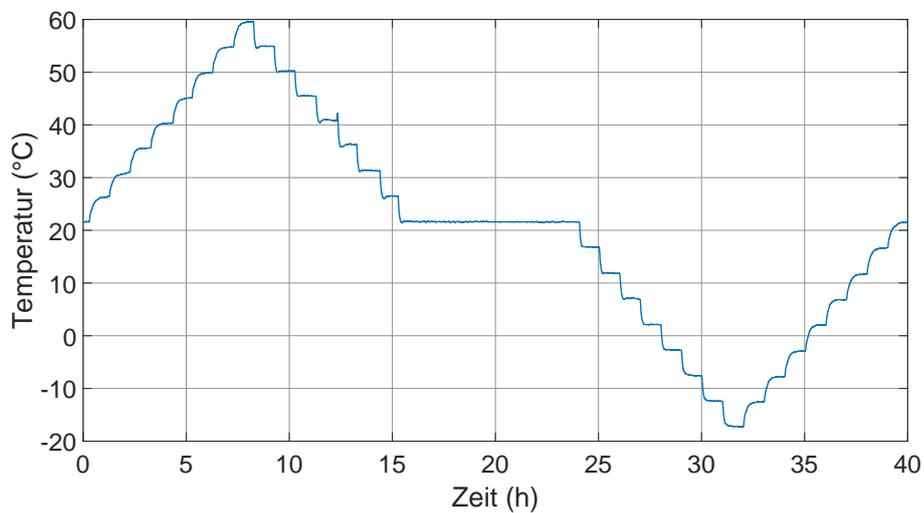


Abbildung 4.26: Temperaturzyklus zur Kalibrierung der Temperaturempfindlichkeit der Sensoren.

Als Extremwerte wurden +60 °C und -20 °C gewählt, da diese den späteren Bereich abdecken. Die Temperatur wurde von Raumtemperatur aus um 5 °C pro

Stunde verändert und nach 15 Stunden für ungefähr 9 Stunden konstant auf Raumtemperatur gehalten. Der komplette Temperaturzyklus dauerte 40 Stunden und ermöglicht eine Überwachung von 4 Sensoren mit jeweils drei FBGs. Nachfolgend werden die Ergebnisse exemplarisch aus einem Zyklus vorgestellt. Die Abbildungen 4.27 und 4.28 zeigen die Wellenlängenverschiebungen von zwei Sensoren. Bei beiden Sensoren kann gesehen werden, dass der Dehnungssensor die geringste Verschiebung aufweist und sich die Temperatursensoren in der Magnitude klar unterscheiden. Dies zeigt, dass trotz der Entkopplung von Dehnung die FBGs zur Temperaturmessung Dehnungen durch unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten der Einbettungsmaterialien erfahren. Dieser Einfluss ist jedoch nicht bei allen Sensoren gleich, da es Variationen bei der Herstellung gibt. So zeigen die Temperatursensoren in Abbildung 4.27 ähnliches Verhalten, wobei sich diese in Abbildung 4.28 klar unterscheiden.

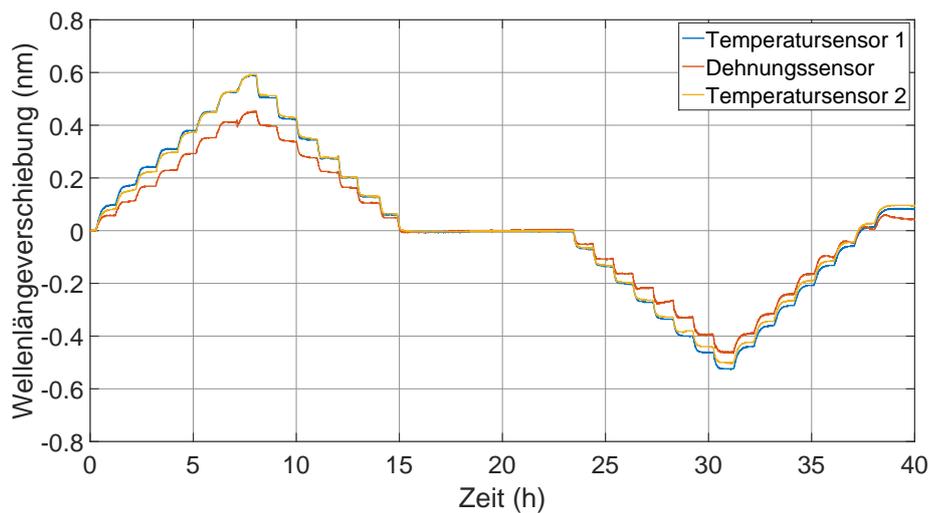


Abbildung 4.27: Verhalten der FBGs eines Sensors. Die Temperatursensoren besitzen durch die Klebung in die Kapillaren höhere Sensitivität als der Dehnungssensor.

Abbildung 4.29 beinhaltet die Wellenlängenverschiebung der Sensoren außerhalb der Kapillaren. Diese stimmen annähernd überein und es wird die Temperatursensitivität η von $10,07 \frac{nm}{K}$ laut Herstellerangaben von FBGS benutzt.

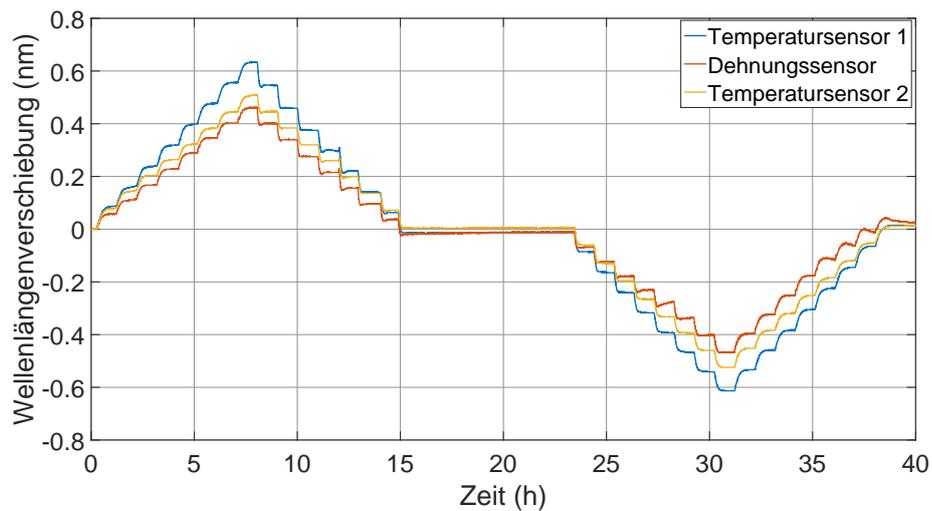


Abbildung 4.28: Verhalten der FBGs eines zweiten Sensors. Die Temperatursensoren weichen durch Variationen bei der Herstellung untereinander ab.

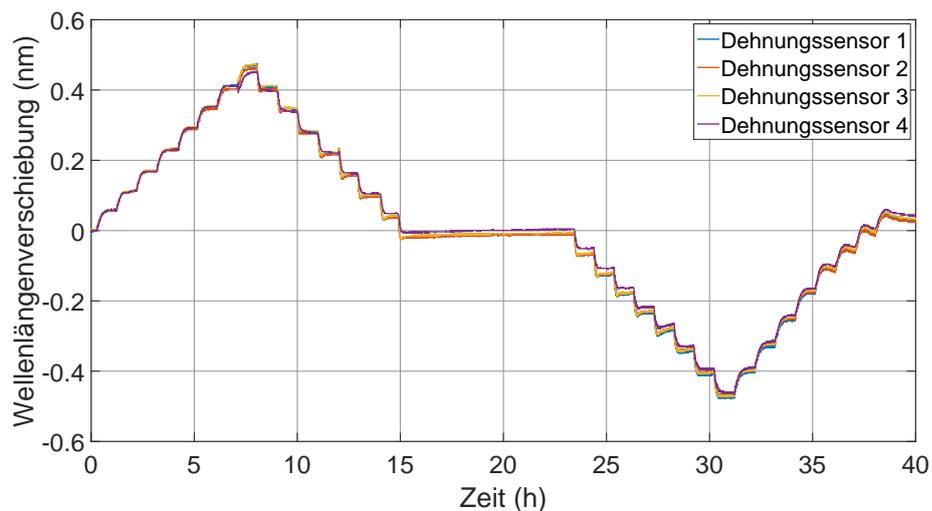


Abbildung 4.29: Veränderung der Wellenlänge der Dehnungssensoren bei Änderung der Temperatur. Die ermittelten Werte entsprechen den Herstellerangaben und zeigen lediglich geringe Abweichungen.

Wird der Mittelwert der 8 Temperatursensoren gebildet, so ergibt sich Abbildung 4.30, in der zusätzlich die Standardabweichung der Wellenlängenverschiebung aufgetragen ist. Hier wird nochmals deutlich wie wichtig eine Kalibrierung der Temperatursensitivität jedes einzelnen Temperatursensors ist, da die Standardabweichung Werte bis zu 70 pm annimmt, was bei einer Umrechnung in Dehnung zu einem

Fehler von $70 \mu\epsilon$ führen würde. Die Fehlerbalken verdeutlichen zudem, dass die Abweichung der Sensoren bei den Extremwerten am größten ist.

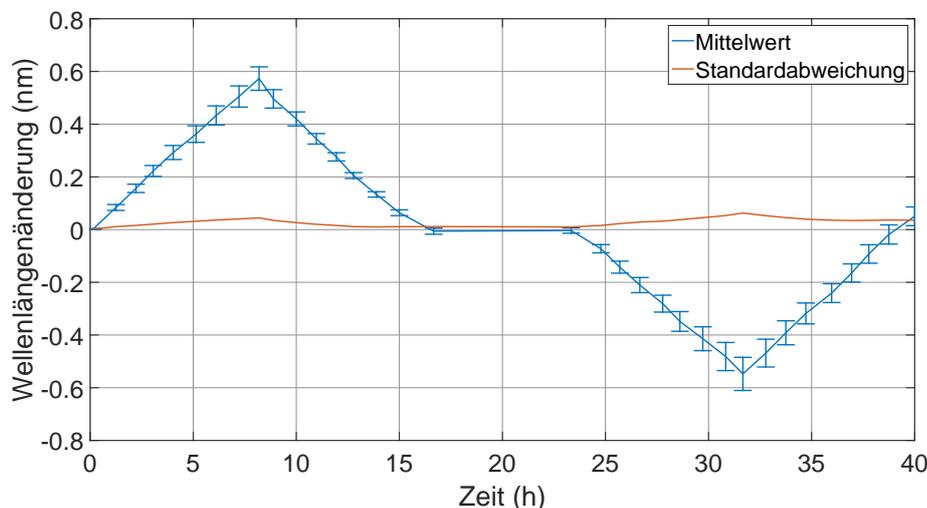


Abbildung 4.30: Mittelwert der 8 Temperatursensoren und deren Standardabweichung.

4.3.2 Erfassung thermischer Belastung

Für die Versuche unter thermischer Belastung wurden je vier Proben in einer Klimakammer auf Auflagern positioniert und zunächst für mindestens 2 Stunden konstant auf Raumtemperatur gehalten, damit alle Proben gleichen Ausgangsbedingungen ausgesetzt sind. Darauf wurde die Temperatur in $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ -Schritten pro Minute bis zu einer Temperatur von $60 \text{ }^\circ\text{C}$ erhöht. Nach einer mehrstündigen Verweildauer bei dieser Temperatur wurde die Temperatur in gleichen Schritten auf $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ erniedrigt und diese wiederum für mehrere Stunden konstant gehalten. Zuletzt wurde erneut auf Raumtemperatur gestellt. Bei der Anfertigung von acht Messproben konnten nur sechs verwendet werden, da zwei Sensoren bei der Klebung in den Stein beschädigt wurden und somit keine verlässlichen Daten mehr lieferten. Zunächst werden die Ergebnisse der Temperatursensoren vorgestellt, da diese die Grundlage für die Kompensation der Dehnungssensoren bilden. In Abbildung 4.31 sind die Temperaturen einer Sensoranordnung und die Referenzmessung mittels Thermoelement gezeigt. Das Thermoelement reagiert schneller auf die Änderung der Temperatur in der Klimakammer, da dieses an der Oberfläche der Messprobe gelagert ist.

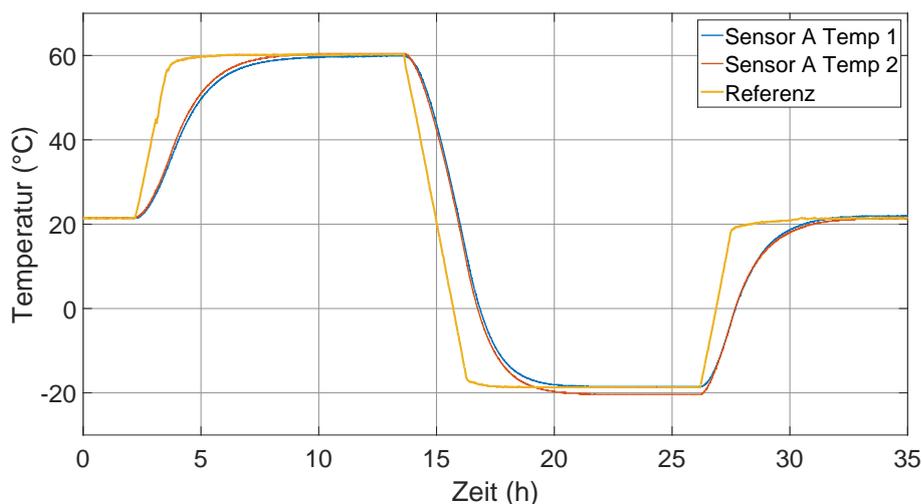


Abbildung 4.31: Umrechnung der Wellenlängenverschiebung in Temperatur bei einem Sensor.

Die FBGs befinden sich in den Messproben und folglich liegt im Inneren des Sandsteins die eingestellte Temperatur mit Verzögerung an. Dies verdeutlicht nochmals die Wichtigkeit einer Temperaturmessung möglichst nahe der Messstelle zur Dehnungsmessung. Bei einem raschen Temperaturanstieg, wie in Abbildung 4.31 gezeigt, führt eine Temperaturkompensation des Dehnungssensors mit Hilfe externer Sensoren zu Verfälschungen der Ergebnisse. Bei dem gezeigten Element nehmen die Werte der FBGs annähernd die Werte des Thermoelements an. Im negativen Temperaturbereich ergibt sich eine maximale Abweichung von lediglich 1,5 K, welche bereits durch die angegebenen Toleranzen des Referenzelements entstehen kann.

Die exakten Ergebnisse der Sensoren im positiven Temperaturbereich basieren darauf, dass bei der Kalibrierung besonders auf diesen Bereich geachtet wurde. Im Vergleich zu dem Sensor aus Abbildung 4.31 weicht der Sensor aus Abbildung 4.32 im Bereich von -20 °C um bis zu 6 °C vom erwarteten Wert ab. Zwar besitzen die übrigen Sensoren auch eine Abweichung im negativen Bereich, jedoch liegt deren Abweichung unter 6 °C . Da diese Abweichung vor allem im negativen Temperaturbereich auftritt, liegt es nahe, dass gefrierendes Wasser einen Einfluss auf die Anordnung besitzt. Da das Ziel dieser Arbeit jedoch lediglich eine Machbarkeitsstudie ist, wird auf diesen Fehler nicht genauer eingegangen und deren Untersuchung als Ausblick für folgende Arbeiten genannt. Hierfür muss der Fertigungsprozess

optimiert und vereinheitlicht werden, um mögliche Abweichungen in der Fertigung auszuschließen.

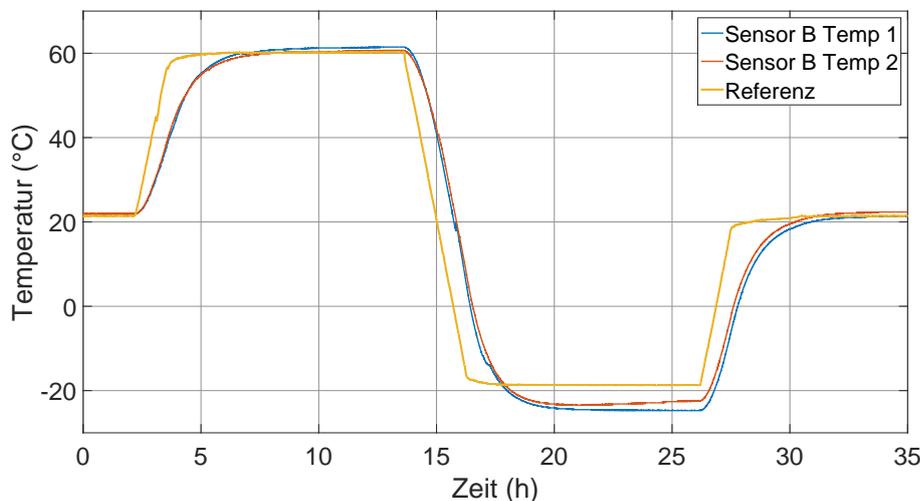


Abbildung 4.32: Bei der Umrechnung bei Temperaturen im Minusbereich kann es wegen Einflusses von Frost zu Abweichungen kommen.

Die Temperaturen in der Klimakammer können je nach Position variieren und somit können die Ergebnisse der Proben der gleichen Messreihe je nach Position voneinander abweichen. Aus diesem Grund wird auf einen direkten Vergleich aller Temperatursensoren verzichtet. In Abbildung 4.33 sind die ermittelten Dehnungen aus einer Versuchsreihe gezeigt. Die zu erwartenden Werte der Dehnungen ergeben sich mittels des Ausdehnungskoeffizienten von Quarz. Dieser liegt zwischen $6,99 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ und $13,24 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ und somit die zu erwartenden Dehnungen zwischen $280 \mu\epsilon$ und $530 \mu\epsilon$. Bei allen Proben ist zu erkennen, dass bei einer Temperaturerhöhung eine Dehnung und bei Senkung der Temperatur eine Kontraktion erfasst wird. Bei den Proben 1, 2 und 3 bleiben die Werte für Dehnung bzw. Kontraktion nach Erreichen des Extremwerts nahezu konstant. Eine geringe Abweichung bei hohen Temperaturen kann sich durch Verdunstung und somit einer Volumenänderung ergeben. Bei Probe 4 hingegen sinkt die Dehnung übermäßig, was auf einen Verlust der angebrachten Vorspannung schließen lässt. Die Klebung bei Probe 4 wies eine geringe Haftung auf. Bei allen Proben bleibt eine restliche Kontraktion auch bei Erreichen der Raumtemperatur zurück. Diese kann mehrere Ursachen haben, die zum einen auf dem Verhalten der Messproben beruhen und zum anderen auf einen Defekt des Sensors schließen lassen könnten.

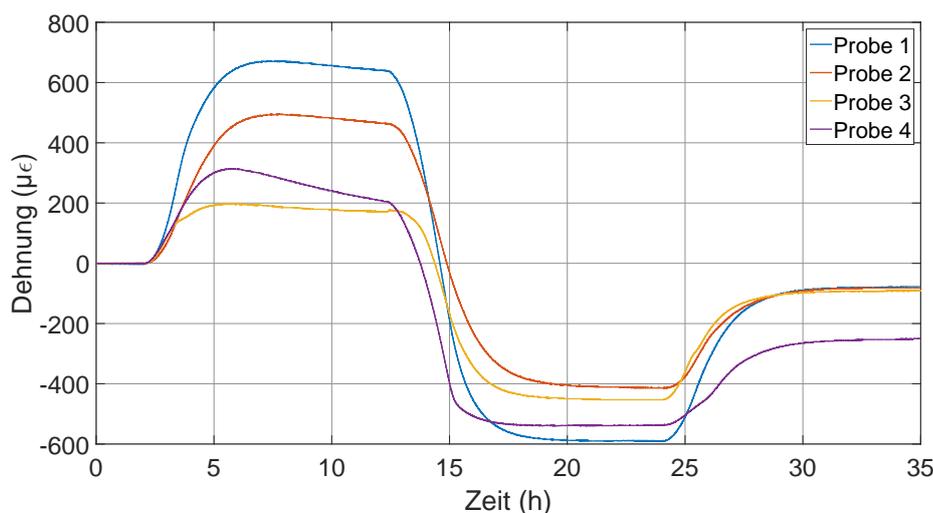


Abbildung 4.33: Dehnungen der Messproben aus der ersten Versuchsreihe.

Durch die thermische Belastung der Proben können sich interne Spannungen bilden, deren zeitliches Abklingen nicht der Temperatur folgt, sondern verzögert eintritt. Im Extremfall bleibt die residuale Spannung selbst nach einem längeren Zeitraum bestehen, da Schäden in den Messproben auftreten. Treten die geschilderten Fälle ein, so beschreiben die Messdaten der Sensoren das Materialverhalten sehr gut. Jedoch kann eine restliche Kontraktion auch ein Indikator für das Verschwinden der angebrachten Vorspannung sein. Lockert sich die Klebung einer oder beider Kapillaren so verringert sich die Vorspannung und es ergibt sich eine Verschiebung der Wellenlänge hin zu niedrigeren Werten. Diese wird bei der Berechnung der Dehnung als Kontraktion aufgefasst und somit würde sich eine verbleibende Kontraktion ergeben. Um mögliche Fehlerquellen auszuschließen müssen die Messproben einer größeren Anzahl von Temperaturzyklen ausgesetzt werden. Eine mangelhafte Klebung und somit ein Verlust der Vorspannung würde in nachfolgenden Zyklen geringere Dehnungswerte ergeben. In Abbildung 4.34 sind die Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe gezeigt. Die Ergebnisse der Proben 1, 3 und 4 spiegeln auch hier das Verhalten der Messproben gut wieder und die Magnitude der Dehnungen entspricht den Erwartungen. Lediglich der Sensor in Probe 2 liefert im negativen Temperaturbereich falsche Werte, da hier eine Kontraktion des Probenkörpers vorliegt. Wie bei der ersten Versuchsreihe ist auch hier zu sehen, dass auch bei Erreichen der Raumtemperatur die Kontraktion nicht auf den Anfangswert sinkt.

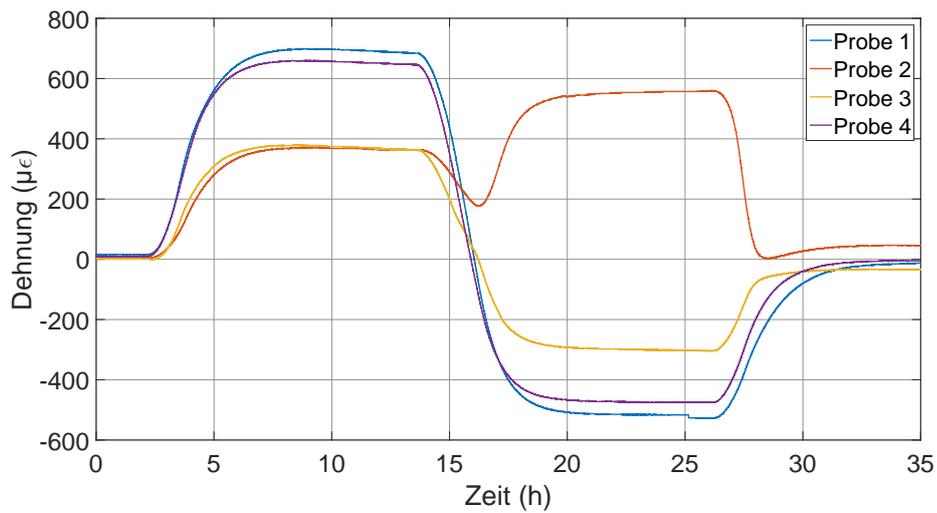


Abbildung 4.34: Dehnungen der Messproben aus der ersten Versuchsreihe.

Um zu überprüfen, wie sich die Dehnungssensoren über mehrere Zyklen verhalten, wurde die zweite Versuchsanordnung vier Zyklen unterzogen. In den Abbildungen 4.35, 4.36 und 4.37 sind die Ergebnisse dieser Messungen gezeigt.

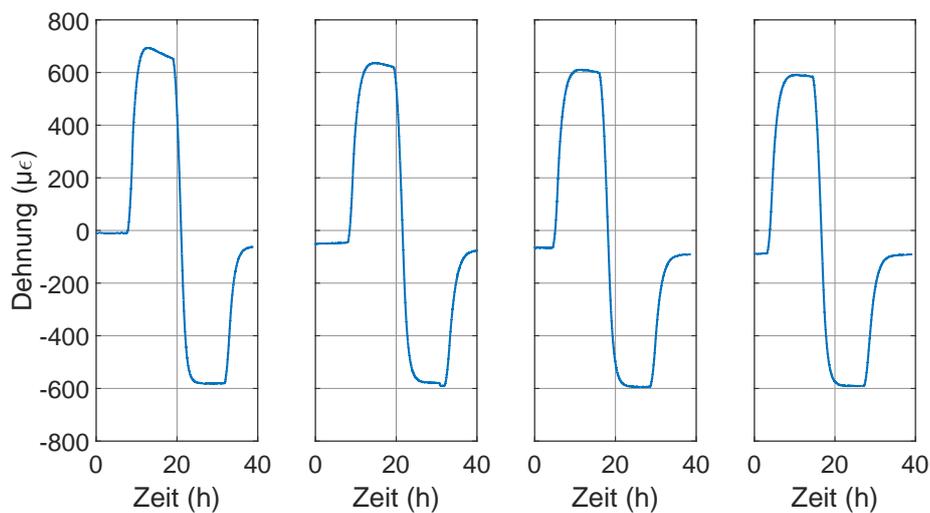


Abbildung 4.35: Vier Temperaturzyklen mit Probe 1 aus Abbildung 4.33

Es ist deutlich zu sehen, dass bei allen Proben im ersten Zyklus ein Teil der Dehnung verschwindet während die Temperatur konstant auf 60 °C gehalten wird. Da dieser Effekt in den folgenden drei Zyklen nicht auftritt, werden hierfür Materialeigenschaften in Betracht gezogen. Eine mögliche Erklärung ist das Verdunsten von

Wasser in den Proben während des ersten Zyklus und somit eine Volumenabnahme. Neben diesem Einfluss kann ein Teil der Vorspannung im ersten Zyklus verschwinden. Bei allen Proben bleibt ein Teil der Kontraktion zwischen den Zyklen bestehen, vor allem zwischen dem ersten und zweiten Zyklus.

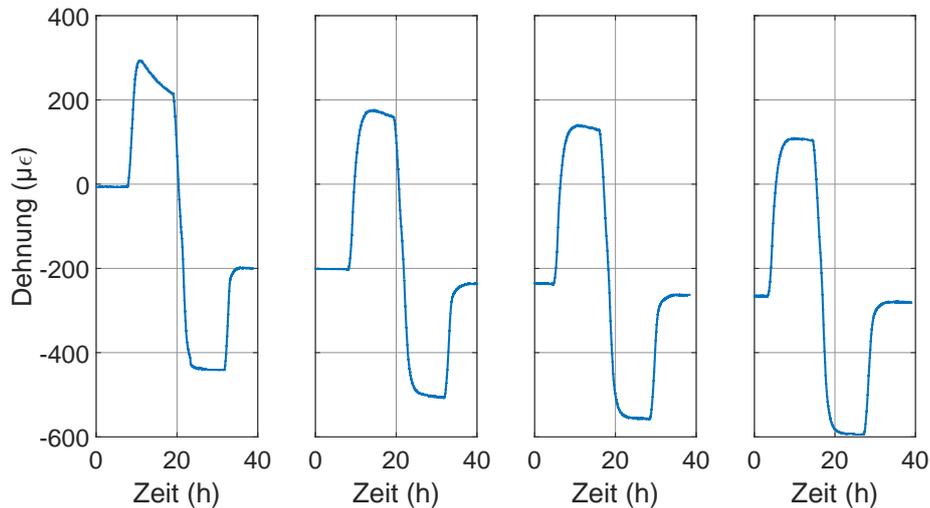


Abbildung 4.36: Vier Temperaturzyklen mit Probe 3 aus Abbildung 4.33

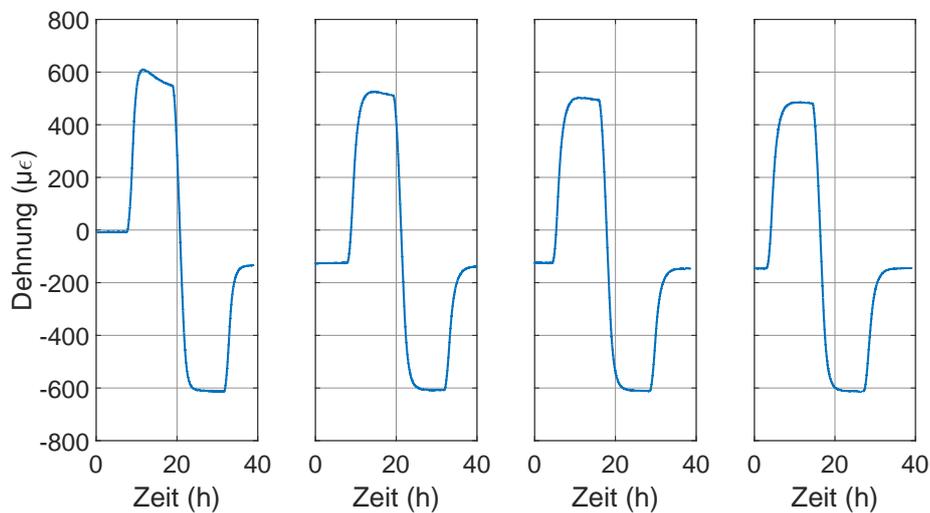


Abbildung 4.37: Vier Temperaturzyklen mit Probe 4 aus Abbildung 4.33

Zwischen den Zyklen 2,3 und 4 bleibt diese Kontraktion jedoch annähernd konstant. In diesen Zyklen tritt während des Verweilens bei 60 °C kein Schwinden auf, was die Theorie des Verdunstens von Wasser bekräftigt. Wird die Magnitude der

Dehnungen der einzelnen Zyklen jeweils auf den Anfangswert des Zyklus bezogen, so ergeben sich gleiche Werte für die separaten Zyklen. Die Werte der Dehnungen bei Temperaturerhöhung sind größer als bei -senkung. Dies gilt jedoch nicht für den ersten Zyklus in Abbildung 4.36, da hier während des ersten Aufheizvorgangs interne Prozesse stattfinden, die in einem kurzen Zeitraum die Dehnung senkt. Da jedoch die folgenden Zyklen Werte liefern, die das Verhalten der Proben wiedergeben, wurde dieses Verhalten nicht genauer untersucht.

4.3.3 Erfassung mechanischer Belastung

Für die Belastung der Messproben wurde der bereits beschriebene Biegeversuch verwendet. Für den ersten Versuch wurden vier Proben mit gleichen Maßen und trockenen Lagerungsbedingungen verwendet. Die Kraft wurde in 0.5 Nm-Schritten erhöht und jeweils für fünf Minuten konstant gehalten. Die Belastung wurde bis zum Bruch erhöht.

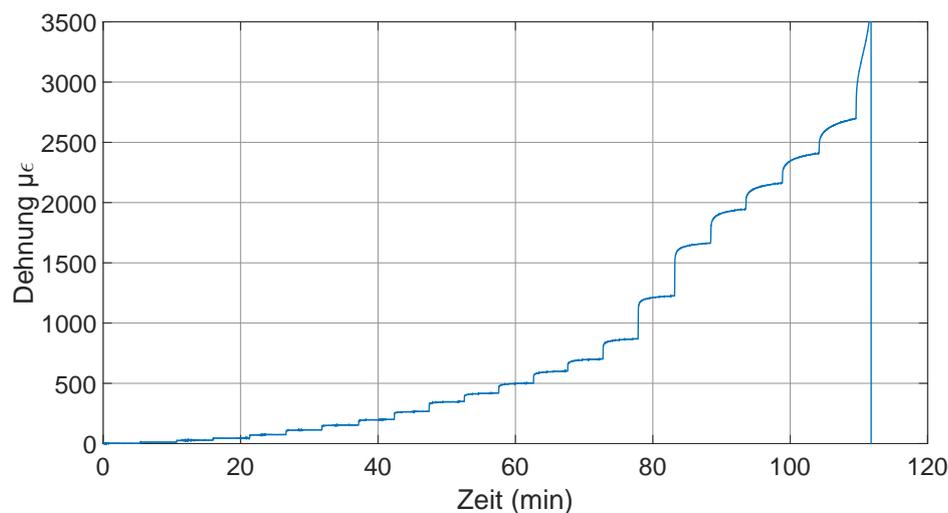


Abbildung 4.38: Gemessene Dehnung bei Erhöhung der Belastung in konstanten Schritten.

In Abbildung 4.38 ist exemplarisch der Dehnungsverlauf einer Messprobe bis hin zum Bruch gezeigt. Es ist deutlich zu sehen, dass der faseroptische Dehnungssensor die Dehnungen erfasst und bis zum Bruch der Messprobe verlässliche Daten liefert. Die Temperatur während des Versuchs wurde konstant gehalten und so konnte der Einfluss der Temperatur auf den Sensor ausgeschlossen werden. Abbildung

4.39 zeigt den zeitlichen Verlauf einer zweiten Messprobe. Im Vergleich zu der vorherigen Probe ist zu sehen, dass im ersten Abschnitt bei 20 min eine Kontraktion gemessen wird. Da diese Kontraktion nicht den Erwartungen entspricht, wurde dieses Verhalten genauer untersucht. Eine mögliche Störquelle ist die Klebung der Glaskapillaren, da durch eine Lösung der Klebung die angebrachte Vorspannung auf die Faser verschwinden kann. Dies resultiert in einer Verschiebung der Wellenlänge zu niedrigeren Werten und wird bei der Umrechnung in Dehnung als Kontraktion gewertet. Um dies auszuschließen wurde die gemessene Temperatur an der Oberfläche der Messprobe in Betracht gezogen, was in Abbildung 4.40 dargestellt ist. Entgegen der Erwartung einer konstanten Temperatur ist hier eine Abkühlung der Messprobe zu sehen. Da der verwendete Kleber für die oberflächliche Befestigung durch Wärme aushärtet, wurde die Messprobe hierfür an der Klebestelle erhitzt. Dies bewirkt eine Erhitzung der gesamten Probe und wie zu sehen ist, kühlt die Messprobe während des Versuch weiter ab.

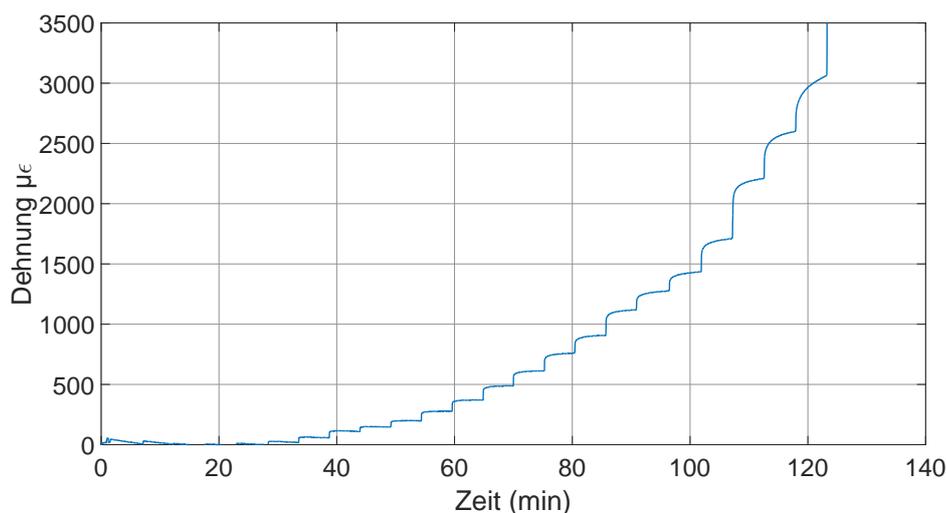


Abbildung 4.39: Gemessene Dehnung bei Erhöhung der Belastung in konstanten Schritten.

Wird der Einfluss der Temperatur auf die Messung kompensiert, zeigt sich weiterhin eine Kontraktion zu Beginn der Messung. Die Werte bei höheren Dehnungen und letztlich bei niedrigeren Temperatur zeigen eine konstante Dehnung, was ausschließen lässt, dass sich die Klebestelle löst. Somit kann die erfasste Kontraktion durch eine Kontraktion der Messprobe, bedingt durch die Abkühlung, begründet werden. Die Ergebnisse zeigen somit deutlich, dass das FBG sowohl die mechani-

sche als die thermische Belastung detektiert.

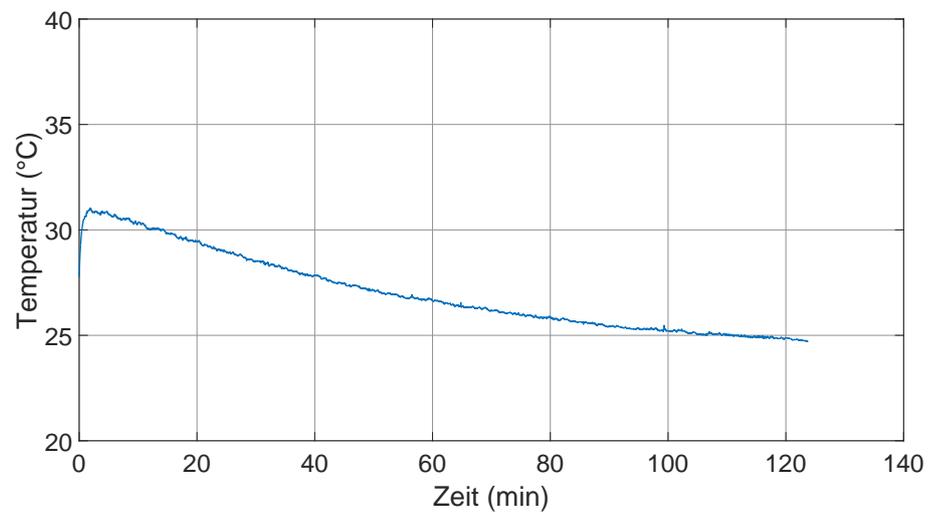


Abbildung 4.40: Temperaturverlauf an der Oberfläche des Probenkörpers. Das Abkühlen des Probenkörpers verursacht eine Kontraktion der Probe.

In Abbildung 4.41 sind die Mittelwerte der Dehnungen der jeweiligen Belastungsstufen aufgetragen. Zur bessern Veranschaulichung wurden die einzelnen Datenpunkte zu Geraden verbunden.

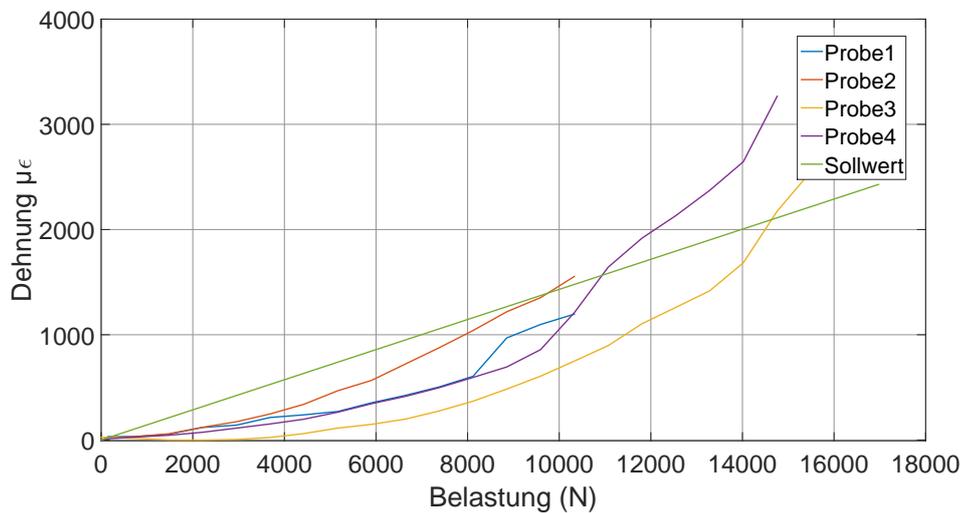


Abbildung 4.41: Dehnungsverlauf aller Proben und die theoretische Kennlinie eines idealen Probenkörpers mit einem E-Modul von 12 GPa.

Zusätzlich ist das Verhalten eines idealen Probenkörpers mit einem E-Modul von

12 GPa aufgetragen. Zu Beginn befinden sich die Dehnungen unter dem Wert des idealen Probenkörpers, was zu einem auf dem Materialverhalten der Proben und zum anderen auf den Reibungsverlusten des Messaufbaus beruhen kann. Kurz vor dem Bruch befinden sich die Dehnungen über den theoretischen Werten, was durch die plastische Verformung bedingt ist. Die Messungen an den trocken gelagerten Proben zeigen, dass die faseroptischen Sensoren die Dehnungen erfassen und bis zum Bruch der Proben deren Verhalten aufgezeichnet haben. Für den Einsatz der FBGs im Feld muss zudem untersucht werden, ob sie auch bei feuchten Proben eingesetzt werden können. Durch die poröse Struktur der Sandsteine kann eine feuchte Lagerung die Klebestelle lösen und somit eine Messung verhindern. Deswegen wurde der 3-Punkt-Biegeversuch bei den Proben des hygrischen Tests angewandt. Der Aufbau hierfür war der gleiche wie zuvor.

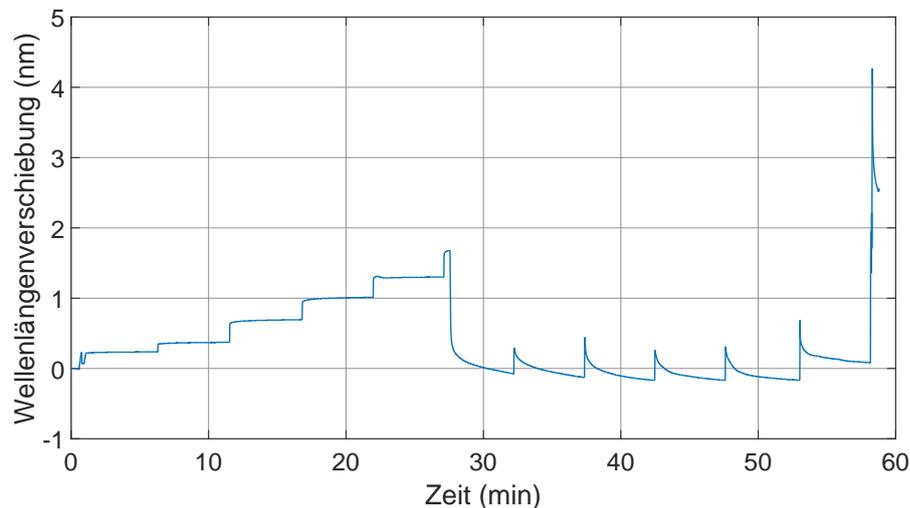


Abbildung 4.42: Durch die Lockerung der Klebung nach 28 Minuten konnten keine Aussagen bezüglich der Dehnungen getroffen werden.

Bei den vier Proben zeigte sich zunächst, dass die erhöhte Feuchtigkeit die Bruchdehnung erheblich herabsetzt und die Brüche bei einer Belastung von 4,5 Nm bis 6 Nm eintraten. Bei der Messung der Dehnung mittels der oberflächlich applizierten FBGs ergab eine Probe keine Ergebnisse, da sich die Klebung löste. Bei zwei Proben löste sich die Dehnung während des Bruchtests, da die Klebung auf der nassen Oberfläche keine ausreichende Anbindung liefert. Der Verlauf der Wellenlängenverschiebung einer Probe ist in Abbildung 4.42 gezeigt. Zu Beginn bilden sich Dehnungen in einer Wellenlängenverschiebung ab, bis sich nach 28 Minuten

die Klebung löst und auch bei erneuter Erhöhung der mechanischen Belastung nur kurzzeitig eine Erhöhung der Wellenlänge auftritt. Der Zeitraum bis zur Bruchgrenze konnte somit nicht observiert werden.

4.3.4 Erfassung hygrischer Belastung

Unter hygrischer Belastung wird das Quellen oder Schwinden durch die Veränderung des Wassergehalts bezeichnet [122]. Für die Überprüfung der Anwendbarkeit des geschilderten Aufbaus zur Überwachung der Feuchtigkeit in den Proben wurden Messproben für einen Zeitraum über 44 Stunden in Wasser gelagert. Da diese Proben in einem weiteren Schritt einem 3-Punkt-Biegetest unterzogen wurden, ist neben der Sensorik im Stein noch eine weitere Anordnung an der Oberfläche angebracht worden. Deren Aufbau entspricht dem aus Abbildung 3.17. Es war unabdingbar diese vor dem hygrischen Test zu installieren, da der Prozess der Kleberaushärtung mittels Temperatur die Feuchtigkeit des Steins massiv beeinflusst hätte und durch die induzierte lokale Trocknung voraussichtlich interne Materialspannungen entstanden wären. Abbildung 4.43 zeigt die Werte der FBGs, die auf der Oberfläche appliziert wurden. Die FBGs in Abbildung 4.44 befinden sich im Stein und hatten keinen direkten Kontakt zum Wasser.

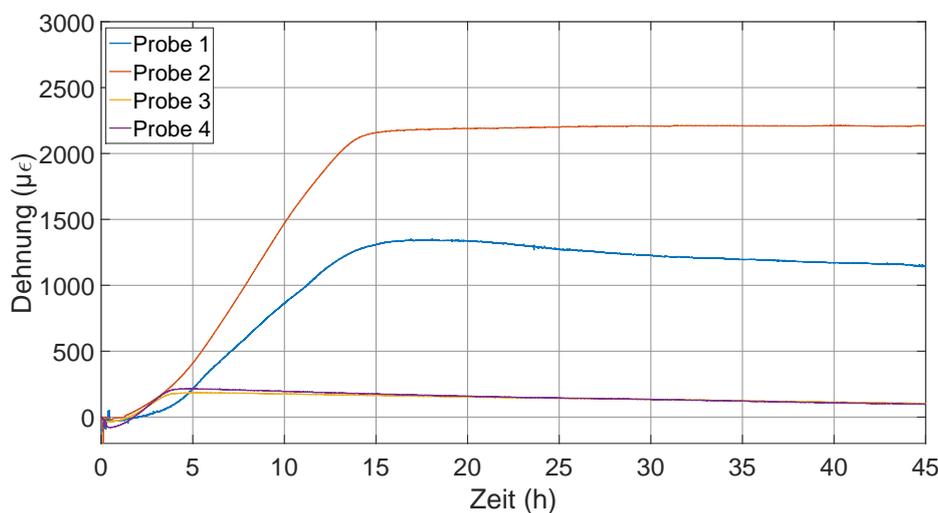


Abbildung 4.43: Dehnungen während des hygrischen Tests erfasst mit den oberflächlich angebrachten FBGs.

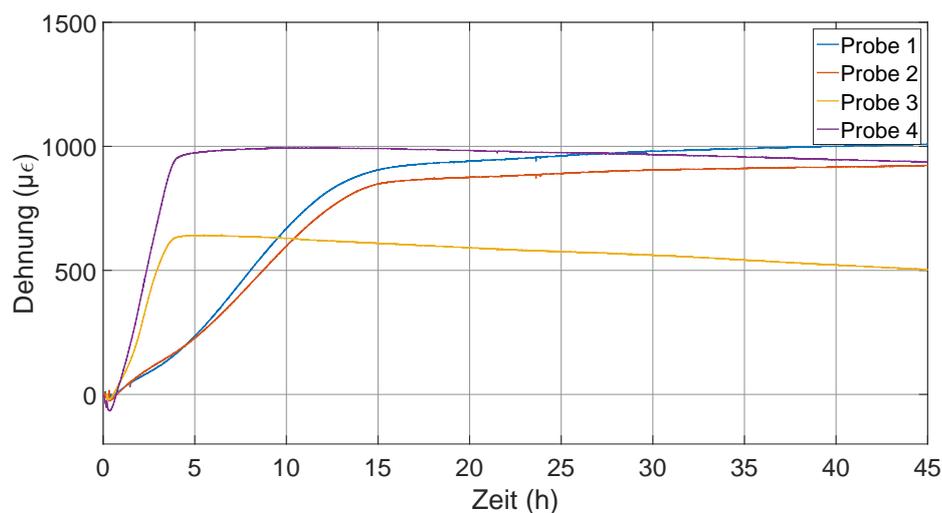


Abbildung 4.44: Dehnungen während des hygrischen Tests erfasst mit den integrierten FBGs.

Die Proben 1 und 2 weisen eine andere Zeitkonstante für die Sättigung auf als die Proben 3 und 4. Um dieses Verhalten zu analysieren muss deren Vorgeschichte betrachtet werden. Die Proben 3 und 4 wurden bedingt durch einen Wasserschaden bereits im Vorfeld Feuchtigkeit ausgesetzt. Hierdurch wurden Minerale aus den Proben geschwemmt und die Porenräume vergrößert. Diese Vergrößerung bewirkt im Versuch, dass die Probenkörper frühzeitig eine Feuchtigkeitssättigung erreichen. Bei der oberflächlichen Befestigung zeigen die Proben 1, 3 und 4 einen Abfall der Dehnung nach Erreichen der Sättigung. Dies ist gleichzusetzen mit einer Lockerung der Klebestelle. Dies beeinflusste auch die im Nachhinein durchgeführten Bruchtests. Bei den integrierten Sensoren zeigen die Probenkörper 3 und 4 ebenso einen Abfall der Dehnung auf. Inwiefern der zuvor aufgetretene Wasserschaden hierfür als Ursache in Betracht gezogen werden kann, muss separat untersucht werden. Mangels fehlender Referenzwerte für Dehnungen im Sandstein bedingt durch Quellung, können keine Aussagen bezüglich der Qualität der Messdaten getroffen werden. Es ist jedoch zu sehen, dass die Dehnung, die durch die Quellung verursacht wird, durch die faseroptischen Sensoren detektiert werden kann. Ferner werden die Glasfasern durch einen direkten Kontakt mit Wasser nicht geschädigt und besitzen hier einen immensen Vorteil gegenüber DMS.

4.3.5 Diskussion

Die Evaluierung der vier Methoden zur Anfertigung des Sensors mit zwei Temperaturmesspunkten und einer Dehnungsmessstelle hat gezeigt, dass zur vollständigen Entkopplung der FBGs in den Glaskapillaren der Silikonkleber nicht geeignet ist. Zudem ist eine komplette Klebung des FBGs in die Kapillare nicht möglich, da sich Inhomogenitäten bilden, die zu einer Doppelbrechung und somit Verfälschung der Daten führen. Durch die Kapillarwirkung wurden die FBGs bei der Zweipunkt-Klebung mit dem Kleber benetzt und sind somit für die Messung nicht geeignet. Eine zusätzliche Metallkapillare, die an den Enden auf die Faser gepresst wurde, verhinderte die Benetzung des FBGs. Ein Transfer von Dehnungen auf die Temperatursensoren konnte durch die Kalibrierungsmessung des Dehnungssensors ausgeschlossen werden. Jedoch zeigen die Temperatursensoren durch die geschilderte Fertigung eine weit höhere Temperatursensitivität. Dies ist zum einen bedingt durch den höheren thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Metallkapillare und zum anderen durch Variationen in der Fertigung. Zweiteres verursacht daneben noch eine größere Standardabweichung, welche eine Kalibrierung jedes Temperatursensors unumgänglich macht.

Die mechanischen Bruchversuche zeigten, dass faseroptische Sensoren das Verhalten der Sandsteine gut nachbilden können, solange eine sichere Befestigung gewährleistet ist. Bei trocken gelagerten Proben konnte mit der oberflächlichen Klebung jeweils bis zum Bruch der Proben gemessen werden und die einzelnen Belastungsstufen waren gut erkenntlich. Bei den Proben, die für die Untersuchung der hygrischen Quellung verwendet wurden, löste sich die oberflächliche Befestigung während oder bereits vor den mechanischen Tests. Welche Relevanz dieses Ergebnis jedoch für den Einsatz im Feld hat, muss noch überprüft werden. Die vollständige Exposition der Klebestelle über einen Zeitraum über 40 Stunden wird im späteren Einsatz nicht eintreten. Dennoch ist festzuhalten, dass die oberflächliche Klebung hier Schwächen aufzeigt.

In den thermischen Belastungsversuchen konnte mit den eingebetteten FBGs eine Dehnung erfasst werden, die den Materialparametern entsprechen. Die eingebetteten Sensoren lieferten auch über mehrere Temperaturzyklen verlässliche Werte. Durch die Temperatursensoren nahe der Messstelle zur Dehnungserfassung konnte der Einfluss der Temperatur auf die Dehnungsmessung kompensiert werden. Der Vergleich der Temperaturwerte im Stein mit denen außerhalb zeigte die Wichtigkeit

einer integrierten Temperaturerfassung. Die Abweichungen der Temperaturwerte bei negativen Temperaturen scheint durch einen Einfluss von gefrierendem Wasser bedingt und muss über diese Arbeit hinaus separiert betrachtet werden.

Die Werte für die Versuche zur Feuchtigkeitssättigung müssen mit Hilfe von alternativer Sensorik verifiziert werden. Es ist jedoch sicher zu sagen, dass eine oberflächliche Applikation nicht geeignet ist.

Kapitel 5

Zusammenfassung und Ausblick

Abschließend werden die Ergebnisse der beiden Projekte noch zusammengefasst und ein Ausblick auf weitere Forschungsfelder gegeben. Auch hier wird zwischen den beiden Bereichen Gießerei und Überwachung von Sandstein differenziert.

5.1 In-situ Dehnungsmessung beim Gießen von Aluminiumlegierungen

In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass sich FBGs eignen, um Dehnungen in der erstarrenden Legierung $AlSi_9Cu_3$ zu erfassen. Drei Typen von FBGs wurden hierfür eingebettet, wobei RFBGs bisher keine Erfassung von Dehnungen ermöglichen, da sie für den eingebetteten Gebrauch zu spröde sind. Ob dieser FBG-Typ zu einem späteren Zeitpunkt zur Dehnungsmessung verwendet werden kann, hängt davon ab, ob dieser stabiler hergestellt werden kann.

Anhand Typ-I-Gitter wurden zwei Positionen in der Schmelze und der Einfluss der Gitterlänge untersucht. Sowohl die Position quer zur Flussrichtung als auch längs zu dieser ergaben Dehnungen, die dem Materialschrumpf durch die Erstarrung der Schmelze entsprechen. Schliffbilder dieser Proben zeigten jedoch Fehlstellen in der Matrix-Faser-Schnittstelle. Mittels eines Filters im Einguss und einem kompletten Entfernen des Fasercoatings in dem Bereich, der mit der Schmelze in Kontakt steht, konnte diese verbessert werden. Schriffe dieser Konstellation lassen auf eine nahezu fehlerfreie Anbindung schließen. Auf Basis dieser Erkenntnisse wurden Messproben mit FS-FBGs mit einer Position entlang der Flussrichtung angefertigt. Diese Position hat den Vorteil, dass aus solchen Abgüssen Zugstäbe für weitere Unter-

suchungen hergestellt werden können. Messungen bis zum Erreichen der Raumtemperatur bewiesen, dass die kommerziell erhältlichen FS-FBGs für den Einsatz zur Strukturüberwachung in Gussbauteilen geeignet sind. Der geringere Drift der FS-FBGs im Vergleich zu Typ-I-FBGs, der durch die Exposition gegenüber der hohen Temperatur bedingt ist, bedeutet bei einer maximalen Kontraktion von 12000 $\mu\epsilon$ einen Fehler unter 1 % und bewegt sich in einem akzeptablen Vergleich. Es wurde eine Funktion zur Berechnung der Abhängigkeit der Wellenlängenverschiebung von der Temperatur bei den FS-Gittern entworfen. Diese gibt das Verhalten in dem signifikanten Bereich von Erstarrungstemperatur bis zu Raumtemperatur besser wieder als die zuvor verwendete Funktion, die bei den Typ-I-Gittern angewandt wurde.

Um die Messdaten zu evaluieren muss im Anschluss dieser Arbeit das Verhalten der Schmelze mit eingebetteter Faser betrachtet werden, beispielsweise in einem Neutronenreaktor. Neue Kenntnisse bezüglich Dehnungs- und Spannungszuständen während und nach dem Erstarrungsprozess ermöglichen eine genauere Modellbildung. Diese Modellbildung betrifft zum einen die Schmelze selbst und zum anderen die eingebettete Faser. Eine Kenntnis über Belastungen auf die Faser durch Dehnungen in radialer Richtung ermöglicht eine Differenzierung des Einflusses von radialer und axialer Belastung. Bei dem aktuellen Sensormodell wird davon ausgegangen, dass die Verschiebung der Wellenlänge rein durch Temperatur und Dehnung in axialer Richtung verursacht wird. Die Untersuchungen dieser Arbeit haben zwar gezeigt, dass keine Doppelbrechung und damit keine inhomogene Belastung im Bereich des Gitters vorliegt, jedoch konnte auch gesehen werden, dass durch die gute Anbindung radiale Dehnungen nicht auszuschließen sind. Kann dieser Anteil genauer bestimmt werden, verbessert dies auch die Aussagekraft der Messungen mittels FBGs in Bezug auf die Spannungen im Material. Neben den geschilderten Punkten muss für die Modellbildung der FBGs zudem der temperaturbedingte Drift der Sensoren untersucht werden. Hierfür können Methoden getestet und evaluiert werden, mit denen das Driftverhalten gesenkt oder aufgehoben werden kann. Eine Möglichkeit wäre ein modifizierter Annealingzyklus, durch den der Drift gesenkt wird, aber der zeitlich so angepasst wird, dass er dennoch wirtschaftlich ist. Eine zweite Möglichkeit wäre eine Beschichtung der Fasern mit Aluminium, die als Schutzschicht für das FBG fundiert.

Neben Optimierungen bezüglich der Modellierung muss das Verhalten der Sensoren

bei Zugversuchen betrachtet werden. Faktoren hierfür sind Genauigkeit, Reproduzierbarkeit und Qualität der Messdaten. Darüber hinaus muss die Anwendbarkeit der FBGs in anderen Geometrien, wie beispielsweise einem Zylinderkopf, untersucht werden.

5.2 Erfassung von Materialdegradation in Naturstein

In dieser Arbeit wurde ein Aufbau zur Überwachung von Sandstein vorgestellt. Die Messungen bezüglich thermischer Ausdehnung und mechanischer Belastung haben gezeigt, dass die FBGs Werte liefern, die das zu erwartenden Verhalten der Messproben wiedergeben. Bei den feuchten Proben zeigten die oberflächlich applizierten FBGs vermehrt Ausfälle und eine Lockerung der Klebung. Die in den Stein integrierten Sensoren wiesen zwar ebenfalls einen Verlust der Dehnung bei dauerhafter Lagerung unter vollständiger Sättigung auf, zeigten jedoch ein stabileres Verhalten. Ferner ist noch zu klären, ob eine dauerhafte Exposition bei vollständiger Feuchtigkeitssättigung im Feld auftritt. Die Temperaturmessung mittels integrierter FBGs lieferte im Bereich von positiven Temperaturen Werte mit geringer Abweichung. Bei negativen Temperaturen zeigten sich Abweichungen bei den Temperatursensoren im Stein, deren Auftreten noch genauer untersucht werden muss. Gefrierendes Wasser ist hierbei einer der signifikantesten Aspekte.

Die grundlegende Funktionalität der Sensoranordnung konnte somit in Laborversuchen dargelegt werden und in den nächsten Untersuchungen muss der Sensor im Feld getestet werden. Diese Versuche müssen wiederkehrende Vorgänge, wie Tag-Nacht-Zyklen, enthalten, um die Reproduzierbarkeit der Messdaten zu verifizieren. Neben Messungen im Feld muss das Packaging des Sensors optimiert werden, da mit der aktuellen Konstellation bei der Sensorbefestigung vermehrt Schäden aufgetreten sind. Neben dem Packaging des kompletten Sensors müssen die einzelnen Schritte, wie das Pressen der Metallkapillare auf die Glasfaser oder das Kleben der Faser in die Glaskapillare, optimiert und vereinheitlicht werden. Bereits geringe Unterschiede bei der Anfertigung können immense Auswirkungen auf die Empfindlichkeit haben. Eine reproduzierbare Anfertigung würde bei der Kalibrierung bezüglich der Temperaturempfindlichkeit geringere Abweichungen bedeuten. Mit dem optimierten Packaging kann auch die Erweiterung auf mehrere Messstellen betrachtet werden, da die Wahrscheinlichkeit eines Bruchs des Sensors minimiert

wird.

Neben dem betrachteten Sandstein bietet der vorgestellte Aufbau auch die Möglichkeit, in andere Baumaterialien integriert zu werden, da sich hier lediglich die Klebung der Kapillaren in der Messprobe ändert.

Anhang A

Anhang

Tabelle A.1: Linearer thermischer Längenausdehnungskoeffizient für verschiedene Gesteine nach [135]

		Thermischer Längen Ausdehnungskoeffizient	
		Min./ Max.	Mittelwert
	Temperatur- bereich	10^{-6} (1/K)	
	(°C)		
Quarzite, Kieselschiefer, Feuersteine	0 - 60	11,0 - 12,5	11,8
Quarzystisch gebundene Sandsteine	0 - 60	10,5 - 12,0	11,8
Sonstige Sandsteine	0 - 60	10,0 - 12,5	11,0
Glimmerschiefer, Phylilte, Tonschiefer	0 - 60	9,5 - 11,0	10,4
Chlorit-, Talkschiefer	0 - 60	7,0 - 8,0	7,5
Granite, Quarzporphyre	0 - 60	6,5 - 8,5	7,4
Diorite, Porphyrite	0 - 60	5,5 - 8,0	6,5
reiner Kalkspat	0 - 60	3,5 - 6,0	4,5
Marmore	0 - 60	4,0 - 7,0	4,5
Dolomite, Mangesite	0 - 60	7,0 - 10,0	8,5

Tabelle A.2: Kennwerte der Aluminiumlegierung $AlSi_9Cu_3$

Dichte (g/cm^3)	Spez. Gewicht (N/m^3)	Durchschn. thermischer Ausdehnungskoeff. 20 - 100 °C, ($10^{-6}K^{-1}$)	Schmelzbereich (°C)	Thermische Leitfähigkeit 25°C, (W/m K)	Spez. Wärmekapazität 20 °C, (J/kg °C)
2,71	2,71	21,8	540 - 595	96	963
Poissonzahl	Bruchgrenze (MPa)	Streckgrenze (MPa)	Längenausdehnung (%)	Schubfließgrenze (MPa)	Ermüdungsgrenzbelastung (Mpa)
0,33	325	160	3	185	140
Elastizitätsmodul (GPa)					
71					

Literaturverzeichnis

- [1] NÜRNBERG, Evangelische-Lutherische Kirchengemeinschaft St. L.: *Lorenzkirche*. <http://lorenzkirche.de/kirche-glaube-geschichte/lorenzkirche/>. Version: 2017
- [2] MACHERAUCH, E. ; WOHLFAHRT, H. ; WOLFSTIEG, U.: Zur zweckmäßigen Definition von Eigenspannungen. In: *HTM* 28 3 (1973)
- [3] KEIL, S.: Beanspruchungsermittlung mit Dehnungsmeßstreifen. In: *Bau-technik* 75 (1998), Nr. 3, S. 202–202
- [4] HUTCHINGS, M. T. ; WITHERS, P. J. ; HOLDEN, T. M. ; LORENTZEN, T.: *Introduction to the Characterization of Residual Stress by Neutron Diffraction*. CRC Press, 2005. – 420 S.
- [5] POESTE, T.: *Untersuchungen zu reibungsinduzierten Veränderungen der Mikrostruktur und Eigenspannungen im System Bremse*, Technische Universität Berlin, Dissertation, 2005. – 182 S.
- [6] REPPER, J. N.: *Einfluss mikroskopischer Eigenspannungen auf die makroskopische Eigenspannungsanalyse mittels Neutronenbeugung*, Technische Universität München, Dissertation, 2010. – 131 S.
- [7] WITHERS, P.J. ; BHADESHIA, H.K.D.H.: Residual stress. Part 1 Measurement techniques. In: *Materials Science and Technology* 17 (2001), Nr. 4, S. 355–365
- [8] WASMUT, U.: *Orts- und zeitabhängige Analyse von Eigenspannungen in Verbundguss*, Technische Universität München, Dissertation, 2009. – 124 S.

- [9] MRAZ, L. ; KARLSSON, L. ; MIKULA, P. ; VRÁNA, M.: Identification of Weld Residual Stresses Using Diffraction Methods and their Effect on Fatigue Strength of High Strength Steels Welds. In: *Materials Science Forum* 768 (2014), S. 668–674
- [10] OHMS, C.: *Residual Stresses in Thick Bi-metallic Fusion Welds: a Neutron Diffraction Study*, Technische Universität Delft, Dissertation, 2013. – 216 S.
- [11] ALTENBERGER, I. ; NIKITIN, I. ; JUIJERM, P. ; SCHOLTES, B.: Residual Stress Stability in High Temperature Fatigued Mechanically Surface Treated Metallic Materials. In: *Materials Science Forum* 524 (2006), S. 57–62
- [12] EGNER-WALTER, A.: *Simulation des Entstehens von Eigenspannungen in Gussteilen*. Shaker Verlag, 1998. – 148 S.
- [13] HOFER, P. ; KASCHNITZ, E. ; SCHUMACHER, P.: Messung und Simulation von Verzug und Eigenspannungen in Druckgussteilen. In: *Gießerei 99* (2012), S. 30–41
- [14] FENT, A.: *Einfluss der Wärmebehandlung auf den Eigenspannungszustand von Aluminiumgussteilen*, Technische Universität München, Dissertation, 2002. – 150 S.
- [15] WASMUTH, U. ; MEIER, L. ; HOFMANN, M. ; MÜHLBAUER, M. ; STEGE, V. ; HOFFMANN, H.: Optimisation of composite castings by means of neutron measurements. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 57 (2008), Nr. 1, S. 579–582
- [16] ERDOGAN, T. ; MIZRAHI, V. ; LEMAIRE, P. J. ; MONROE, D.: Decay of ultraviolet-induced fiber Bragg gratings. In: *Journal of Applied Physics* 76 (1994), Nr. 1, S. 73–80
- [17] CANNING, J.: Fibre gratings and devices for sensors and lasers. In: *Laser & Photonics Review* 2 (2008), Nr. 4, S. 275–289
- [18] CANNING, J. ; STEVENSON, M. ; BANDYOPADHYAY, S. ; COOK, K.: Extreme Silica Optical Fibre Gratings. In: *Sensors* 8 (2008), Nr. 10, S. 6448–6452

- [19] LINDNER, E. ; CHOJETZKI, C. ; BRUECKNER, S. ; BECKER, M. ; ROTH-HARDT, M. ; VLEKKEN, J. ; BARTELT, H.: Arrays of regenerated fiber bragg gratings in non-hydrogen-loaded photosensitive fibers for high-temperature sensor networks. In: *Sensors* 9 (2009), Nr. 10, S. 8377–8781
- [20] XIA, H.: Advanced fiber optical sensor and instrumentation for power generation industrial monitoring and diagnostics. In: *Fiber Optic Sensors and Applications IX*, 2012, S. 83700F–83700F–10
- [21] CANNING, J. ; COOK, K. ; SHAO, L. Y.: Helium and regeneration in optical fibres. In: *International Conference on Optical Fiber Sensors*, 2012, S. 8421CA–8421CA
- [22] HEIBERG, G. ; SKKAR, J. ; FOKINE, M. ; ARNBERG, L.: A new method for temperature measurement in solidifying aluminium alloys by use of optical fiber Bragg grating sensors. In: *Transaction of the American Foundry Society* 110 (2202), Nr. 1, S. 383 – 391
- [23] REDDY, P. S.: Encapsulated fiber Bragg grating sensor for high temperature measurements. In: *Optical Engineering* 50 (2011), Nr. 11, S. 114401–114401
- [24] REIHLE, M. ; HOFMANN, M. ; WASMUTH, U. ; VOLK, W. ; HOFFMANN, H. ; PETRY, W.: In Situ Strain Measurements during Casting Using Neutron Diffraction. In: *Materials Science Forum* 768 (2013), S. 484–491
- [25] BLÜMLHUBER, W.: *Eigenspannungen in druckgegossenen Aluminiumzylinderkurbelgehäusen*, Technische Universität München, Dissertation, 2011. – 178 S.
- [26] HANSS, T.: *Gusseigenspannungen und elastische Verformungen nach trennenden Fertigungsschritten*, Technische Universität München, Dissertation, 2005. – 151 S.
- [27] MOYO, P. ; BROWNJOHN, J. M W. ; SURESH, R. ; TJIN, S. C.: Development of fiber Bragg grating sensors for monitoring civil infrastructure. In: *Engineering Structures* 27 (2005), Nr. 12, S. 1828–1834

- [28] LIN, Y. ; PAN, C. L. ; KUO, Y. H. ; CHANG, K. C.: Online monitoring of highway bridge construction using fiber Bragg grating sensors. In: *Smart Materials and Structures* 14 (2005), Nr. 5, S. 1075–1082
- [29] LI, W. ; CHUN, S. ; HO, M. ; SONG, G.: Corrosion detection of steel reinforced concrete using combined carbon fiber and fiber Bragg grating active thermal probe. In: *Smart Materials and Structures* 24 (2016), Nr. 4, S. 045017
- [30] CHUNG, W. ; KANG, D.: Full-scale test of a concrete box girder using FBG sensing system. In: *Engineering Structures* 30 (2008), Nr. 3, S. 643–652
- [31] AURAS, M. ; MEINHARDT, J. ; SNETHLAGE, R.: *Leitfaden Naturstein-Monitoring*. Stuttgart : Fraunhofer IRB Verlag, 2010. – 301 S.
- [32] HASENSTAB, A. ; MAIERHOFER, C. ; ARNDT, R. ; BLUHM, J.: Praktische Untersuchungen an Kulturgütern und Verkehrsbauten in der Baudenkmalpflege. In: *Fachtagung Bauwerksdiagnose* (2010), S. 1–14
- [33] LEHMANN, F. ; KRÜGER, M.: Impedanzmessungen zum Monitoring von Feuchte und Salz an Bauwerken. In: *Fachtagung Bauwerksdiagnose* (2014), S. 1–8
- [34] KRÜGER, M. ; FRICK, J. ; DIERUFF, B. ; FIEDLER, K. ; SIMON, S. ; PAMPLONA, M. ; WILLEKE, J.: *Intelligente Bauwerksüberwachung von historischen Bauwerken Teilprojekt Zukunft Bau der deutschen Partner SMooHS*. Stuttgart : Fraunhofer IRB Verlag, 2013. – 56 S.
- [35] BALAGEAS, D.: Introduction to Structural Health Monitoring. In: *Structural Health Monitoring*. ISTE, 2006, S. 13–43
- [36] LI, X. ; WANG, H. ; SHEN, Y. ; FU, H.: Integrated vehicle health management in the aviation field. In: *Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Chengdu)*, 2016, S. 1–5
- [37] REVELEY, M. ; BRIGGS, J. ; EVANS, J. ; LEONE, K. ; SANDIFER, C. ; THOMAS, M.: Commercial Aircraft Integrated Vehicle Health Management Study / NASA. 2010. – Forschungsbericht. – 31 S.

- [38] WALSH, S.M.: Practical issue in the development and deployment of intelligent system and structures. In: *Structural Health Monitoring 2000*, (2000), S. 8–10
- [39] FRANGOPOL, D.M: New directions and research needs in life-cycle performance and cost of civil infrastructure. In: *Proceedings of 4th International Workshop on Structural Health Monitoring* (2003), S. 53–62
- [40] SOHN, Hoon ; FARRAR, Charles R. ; HEMEZ, Francois ; CZARNECKI, Jerry: A Review of Structural Health Monitoring Literature 1996 to 2001. In: *Third World Conference on Structural Control*, Los Alamos National Laboratory, 2003
- [41] CAWLEY, P.: Long Range Inspection of Structures Using Low Frequency Ultrasound. In: *Structural Damage Assessment Using Advanced Signal Processing Procedures : Proceedings of DAMAS 97* (1997), S. 1–17
- [42] STASZEWSKI, W.J. ; BIEMANS, C. ; BOLLER, C. ; TOMLINSON, G.R.: Impact Damage Detection in Composite Structures-Recent Advances. In: *Structural Health Monitoring 2000* (2000), S. 754–763
- [43] SOHN, H.: Novelty Detection using Auto-Associative Neural Network. In: *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. New York, 2001
- [44] SOHN, H. ; FARRAR, Charles R. ; HUNTER, N. ; WORDEN, Keith: Applying the LANL Statistical Pattern Recognition Paradigm for Structural Health Monitoring to Data from a Surface Effect Fast Patrol Boat. In: *Los Alamos National Laboratory Report LA-13761-MS* (2001)
- [45] HERING, E. ; MARTIN, R.: *Photonik*. 1. Springer-Verlag, 2006. – 523 S.
- [46] FRANK, A.: *Dehnungs- und Temperaturmessung in Verbundwerkstoffen mit eingebetteten faseroptischen FBG*, Technische Hochschule Zürich, Dissertation, 2001. – 111 S.
- [47] AGRAWAL, C.: *Nonlinear Fiber Optics*. 5. Elsevier, 2012. – 648 S.

- [48] CVECEK, K.: *Phasenerhaltende , rein optische 2R-Regeneration phasenkodierter Datensignale*, Universität Erlangen-Nürnberg, Dissertation, 2009. – 172 S.
- [49] FIEBRANDT, Julia: *Eigenschaften von Faser-Bragg-Gittern in seltenerd-dotierten optischen Fasern*, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Dissertation, 2013. – 121 S.
- [50] BUCK, T. C. ; MULLER, M. S. ; KOCH, A. W.: Fiber Bragg grating (FBG) sensor systems for monitoring of dynamic structural loads. In: *International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices*, IEEE, 2012, S. 1–4
- [51] OTHONOS, A. ; KAILI, K.: *Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*. Artech House, 1999. – 422 S.
- [52] RÖSSNER, M. R. ; HESKE, A. ; KIN, Vi. ; KOCH, A. W.: Ein störgrößen-unterdrückendes optisches Messsystem auf Basis von Faser-Bragg-Gitter-Sensoren. In: *tm - Technisches Messen* 80 (2013), Nr. 4, S. 135–139
- [53] VENGHAUS, H.: *Wavelength Filters in Fibre Optics*. 1. Springer Verlag, 2006. – 456 S.
- [54] FERNANDEZ-VALLEJO, M. ; ROTA-RODRIGO, S. ; LOPEZ-AMO, M.: Remote (250 km) Fiber Bragg Grating Multiplexing System. In: *Sensors* 11 (2011), Nr. 9, S. 8711–8720
- [55] SCHMID, M. ; MÜLLER, M. ; KOCH, A. W.: Fiber Bragg grating measurement technology in industry. In: *Proceedings Sensor 2015*, 2015, S. 545–549
- [56] SCHREIER-ALT, T.: *Polymerverkapselung mechatronischer Systeme - Charakterisierung durch eingebettete Faser Bragg Gitter Sensoren*, Technische Universität Berlin, Dissertation, 2007. – 167 S.
- [57] ARORA, D. ; PRAKASH, J. ; SINGH, H. ; WASON, A.: Reflectivity and Bragg Wavelength in FBG. In: *International Journal of Engineering* 5 (2011), Nr. 5, S. 341–349

- [58] TAWFIK, N. I. ; ELDEEB, W. S. ; EL MASHADE, M. B. ; ABDELNAIEM, A. E.: Optimization of Uniform Fiber Bragg Grating Reflection Spectra for Maximum Reflectivity and Narrow Bandwidth. In: *International Journal of Computational Engineering Research* 5 (2015), Nr. 2, S. 2250–3005
- [59] YUEN, H. Y.: *Inscription and characterization of fiber Bragg gratings in multi-mode As₂S₃ optical fiber at 1550nm using interferometric and phase mask methods*, Iowa State University, Dissertation, 2006. – 110 S.
- [60] MELTZ, G. ; MOREY, W. W. ; GLENN, W. H.: Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method. In: *Optics Letters* 14 (1989), Nr. 15, S. 823
- [61] MALO, B. ; ALBERT, J. ; BILODEAU, F. ; KITAGAWA, T. ; JOHNSON, D. C. ; HILL, K. O. ; HATTORI, K. ; HIBINO, Y. ; GUJRATHI, S.: Photosensitivity in phosphorus-doped silica glass and optical waveguides. In: *Applied Physics Letters* 65 (1994), Nr. 4, S. 394–396
- [62] LAI, Y ; ZHOU, K ; SUGDEN, K ; BENNION, I: Point-by-point inscription of first-order fiber Bragg grating for C-band applications. In: *Optics Express* 15 (2007), Nr. 26, S. 18318–18325
- [63] LINDNER, E.: *Erzeugung und Eigenschaften hoch-temperaturstabiler Faser-Bragg-Gitter*, Friedrich Schiller Universität Jena, Dissertation, 2012
- [64] KASHYAP, R.: *Fiber Bragg Gratings*. 2. Academic Pr Inc, 2009. – 632 S.
- [65] WILLIAMS, R. ; VOIGTLÄNDER, C. ; MARSHALL, G. D. ; TÜNNERMANN, A. ; NOLTE, S. ; STEEL, M. J. ; WITHFORD, Michael J.: Point-by-point inscription of apodized fiber Bragg gratings. In: *Optics letters* 36 (2011), Nr. 15, S. 2988–2990
- [66] *Femtosecond-laser-written Fiber Bragg Gratings for Smart Sensing Solutions*. FemtoFiberTec, 2016. – 12 S.
- [67] MARSHALL, G. ; WILLIAMS, R. ; JOVANOVIC, N. ; STEEL, M. ; WITHFORD, M.: Point-by-point written fiber-Bragg gratings and their application in complex grating designs. In: *Optics Express* 18 (2010), Nr. 19, S. 19844–19859

- [68] LI, Y. ; YANG, M. ; WANG, D. N. ; LU, J. ; SUN, T. ; GRATTAN, K. T.: Fiber Bragg gratings with enhanced thermal stability by residual stress relaxation. In: *Optics Express* 17 (2009), Nr. 22, S. 19785–19790
- [69] ZHANG, C. ; YANG, Y. ; WANG, C. ; LIAO, C. ; WANG, Yi.: Femtosecond-laser-inscribed sampled fiber Bragg grating with ultrahigh thermal stability. In: *Optics Express* 24 (2016), Nr. 4, S. 3981–3988
- [70] MARTINEZ, A ; KHRUSHCHEV, I Y. ; BENNION, I: Thermal properties of fibre Bragg gratings inscribed point-by-point by infrared femtosecond laser. In: *Electronics Letters* 41 (2005), Nr. 4, S. 176–178
- [71] LI, Y. ; LIAO, C .. ; WANG, D. N. ; SUN, T. ; GRATTAN, K. T. V.: Study of spectral and annealing properties of fiber Bragg gratings written in H₂-free and H₂-loaded fibers by use of femtosecond laser pulses. In: *Opt. Express* 16 (2008), Nr. 26, S. 21239–21247
- [72] VOIGT, S.: *Drucksensorkatheter auf Basis von Faser-Bragg-Gittern*, Technische Universität Chemnitz, Dissertation, 2011. – 132 S.
- [73] HILL, K. O. ; MALO, B. ; BILODEAU, F. ; JOHNSON, D. C. ; ALBERT, J.: Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask. In: *Applied Physics Letters* 62 (1993), Nr. 10, S. 1035–1037
- [74] JÜLICH, F. ; KOCH, A. W. ; ROTHS, J.: Fabrication of Fibre-Bragg-Gratings in High Birefringent Optical Fibres. In: *tm - Technisches Messen* 79 (2012), Nr. 1, S. 52–59
- [75] ANDERSON, D.Z. ; MIZRAHI, V. ; ERDOGAN, T. ; WHITE, A.E.: Production of in-fibre gratings using a diffractive optical element. In: *Electronics Letters* 29 (1993), Nr. 6, S. 566–568
- [76] PATRICK, H. ; GILBERT, S. L. ; LIDGARD, A. ; GALLAGHER, M. D.: Annealing of Bragg gratings in hydrogen-loaded optical fiber. In: *Journal of Applied Physics* 78 (1995), Nr. 5, S. 2940–2945

- [77] BAKER, S.R. ; ROURKE, H.N. ; BAKER, V. ; GOODCHILD, D.: Thermal decay of fiber Bragg gratings written in boron and germanium codoped silica fiber. In: *Journal of Lightwave Technology* 15 (1997), Nr. 8, S. 1470–1477
- [78] JOOSTEN, S. M.: *Piezoelektrische Transducer zur elastooptischen Modulation in Glasfasern*, Universität Bayreuth, Dissertation, 2007. – 147 S.
- [79] BECKMANN, D.: *Spannungsinduzierte Volumenwellenleiter in Kristallen mittels Femtosekunden-Laserstrahlung*, Technische Hochschule Aachen, Dissertation, 2011. – 125 S.
- [80] MASTRO, S.: *Optomechanical behavior of embedded fiber Bragg grating strain sensors*, Drexel University, Dissertation, 2005. – 146 S.
- [81] GAMALATH, K. A. I. L. ; JAYAWARDENA, G. L. A. U.: Diffraction of light by acoustic waves in liquids. In: *International Letters of Chemistry, Physics and Astronomy* 4 (2012), S. 39–57
- [82] MÜLLER, Mattias S.: *Untersuchungen zu Kraft-Momenten-Sensoren auf Basis von Faser-Bragg-Gittern*, Technische Universität München, Dissertation, 2009. – 128 S.
- [83] NARASIMHAMURTY, T. S.: *Photoelastic and Electro-Optic Properties of Crystals*. 1. Springer US, 1981. – 544 S.
- [84] BERTHOLDS, A. ; DÄNDLIKER, R.: Determination of the Individual Strain-Optic Coefficients in Single-Mode Optical Fibers. In: *Journal of Lightwave Technology* 6 (1988), Nr. 1, S. 17–20
- [85] MÜLLER, M. ; HOFFMANN, L. ; KOCH, A. W.: Full strain tensor treatment of fiber Bragg grating sensors. In: *IEEE Journal of Quantum Electronics* 45 (2009), Nr. 5, S. 547–553
- [86] LEBID, S.: *Störungen in der Charakteristik von Faser-Bragg-Gitter-Sensoren durch lokale thermische und mechanische Einflüsse*, Technische Universität Dresden, Dissertation, 2004. – 170 S.
- [87] ZEH, T.: *Optical Fiber Bragg Sensors*, Technische Universität München, Dissertation, 2004. – 163 S.

- [88] HABEL, W.: Faseroptische Sensoren für hochaufgelöste Verformungsmessung in der Zementsteinmatrix / Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. Bremerhaven, 2004. – Forschungsbericht. – 204 S.
- [89] MENENDEZ, J M. ; GUEMES, J A.: Response of fiber optic Bragg grating sensors to biaxial strain fields , and to step strain. In: *European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering* (2000)
- [90] ZHAO, L ; PAUL, J ; FANG, ZP: Study of the spectral response of polymer coated Fiber Bragg Gratings under lateral pressure. In: *Citeseer*
- [91] HOFFMANN, L.: *Spektroskopische Instrumente zur Demodulation von Faser-Bragg-Gitter-Sensorsignalen*, Technische Universität München, Dissertation, 2008. – 167 S.
- [92] WERANECK, Klaus ; HEILMEIER, Florian ; LINDNER, Markus ; GRAF, Moritz ; JAKOBI, Martin ; VOLK, Wolfram ; ROTHS, Johannes ; KOCH, Alexander W.: Strain Measurement in Aluminium Alloy during the Solidification Process Using Embedded Fibre Bragg Gratings. In: *Sensors* 16 (2016), Nr. 11, S. 1853
- [93] LAI, M. ; KARALEKAS, D. ; BOTSIS, J.: On the Effects of the Lateral Strains on the Fiber Bragg Grating Response. In: *Sensors* 13 (2013), Nr. 2, S. 2631–2644
- [94] SHEASBY, P. G. ; PINNER, R.: *The Surface Treatment and Finishing of Aluminium and its Alloys*. 6. Finishing Publications Ltd. and ASM International, 2001. – 1387 S.
- [95] COBDEN, R. ; BANBURY, A.: Aluminium: Physical Properties, Characteristics and Alloys. In: *Talat* 1501 (1994), Nr. 11, S. 144–155
- [96] KAUFMAN, John G. ; ROOY, Elwin L.: *Aluminium Alloy Castings*. Cambridge : ASM International, 2004. – 321 S.
- [97] BRANDENBERGER, U. ; FEIKUS, F. ; JUST, M. ; KADNER, M. ; KLEEMANN, M. ; KOCH, H. ; SCHROTH, A. ; SIMMAK, A. ; STEINKÜLLER, P. ; STUHLREIER, O.: *Sand- und -Kokillenguss aus Aluminium*. Bd. Februar. Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie, 2010. – 82 S.

- [98] SPUR, G. ; MICHAELI, W. ; BÜHRIG-POLACZEK, A.: *Handbuch Urformen*. 2. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2013. – 968 S.
- [99] SCHULTE-VORWICK, L.: *Konstruktion und Fertigung eines Kernkastens für die Herstellung anorganisch gebundener Kerne*, Technische Universität München, Semesterarbeit, 2011. – 117 S.
- [100] BASCHIN, E. ; BUCK, V. ; DOBLER, H. ; MELLERT, B. ; PRÖM, M. ; RÖDTER, H.: *Fachkunde für gießereitechnische Berufe: Technologie des Formens und Gießens*. 6. Europa-Lehrmittel, 2009. – 416 S.
- [101] HASSE, S.: *Gießerei Lexikon*. 19. Schiele & Schön, 2008. – 1460 S.
- [102] AMERICAN FOUNDRYMEN'S SOCIETY: *Aluminium Casting Technology*. 2. American Foundrymen's Society, 1986. – 280 S.
- [103] SCHIEBOLD, K.: *Oberflächen- und Volumenprüfung an Gussstücken*. LVQ-WP. – 22 S.
- [104] KRAMER, J.: *Gesammelte Erfahrung - Speiser im Wandel der Zeit, Teil 1*. In: *Giesserei-Erfahrungsaustausch 5* (2007), S. 56–59
- [105] CABANNES, P.M. ; FORREST, R. ; MURATORE, G. ; RÖDTER, H. ; GAGNÉ, M.: *Gusseisen mit Kugelgraphit*. Rio Tinto iron & Titanium Inc., 2002. – 44 S.
- [106] GOBRECHT, J.: *Werkstofftechnik - Metalle*. 3. Oldenburg Verlag München, 2009. – 382 S.
- [107] WEISSBACH, W. ; DAHMS, M.: *Werkstoffkunde: Strukturen, Eigenschaften, Prüfung*. 16. Vieweg+Teubner, 2007. – 442 S.
- [108] KLEINE, A. ; KOCH, H. ; GARTHOFF, C. ; PRIES, H. ; DELLEMANN, J. ; HOFFMANN, F.: *Eigenschaftscharakterisierung der Legierung En AC-AlSi9Cu3(Fe)*. In: *Gießerei 99* (2012), Nr. 6, S. 32–39
- [109] ARNBERG, L. ; BÄCKERUD, L.: *Solidification Characteristics of Aluminium Alloys Volume 3: Dendrite Coherency*. American Foundrymen's Society, 1196. – 259 S.

- [110] RATH, J.: *Maximierung der randnahen Druckeigenstressungen von Stählen mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeits - Abschreckanlage*, Universität Bremen, Dissertation, 2012. – 153 S.
- [111] PEITER, A.: *Eigenstressungen I. Art. 1*. Michael Triltsch Verlag, 1966. – 200 S.
- [112] WOLFSTIEG, U.: *Berechnung von Temperatur- und Spannungsverteilungen in Stahlkörpern*. 1969
- [113] KÖLBL-EBERT, M.: *Gesteinskunde - Skript für die Übungen zur Dynamik der Erde. 5*. Institut für Geowissenschaften, 2010. – 104 S.
- [114] HUSTER, U.: *Tragverhalten von einschaligem Natursteinmauerwerk unter zentrischer Druckbeanspruchung*, Universität Gesamthochschule Kassel, Dissertation, 2000. – 197 S
- [115] KOTAN, E.: *Ein Prognosemodell für die Verwitterung von Sandstein*, Technische Hochschule Karlsruhe, Dissertation, 2011. – 184 S.
- [116] MÜLLER, H. ; LUCKERT, J. ; RÖPER, D.: Sandsteinverwitterung durch bauschädliche Salze-Ergebnisse der Säulensanierung des Belvedere auf dem Pfingstberg/Potsdam. In: *Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge 1/2 -2002* 1 (2002), S. 1–15
- [117] ALI, S. ; CLARK, W. ; MOORE, W. ; DRIBUS, J. R.: Diagenesis and Reservoir Quality. In: *Oilfield Review* 22 (2010), Nr. 2, Summer, S. 14–27
- [118] MURR, A.: *Geologie für Bauingenieure*. Universität der Bundeswehr, 2017. – 145 S.
- [119] ALFES, C.: *Bruchmechanisches Werkstoffverhalten von Sandsteinen unter Zugbeanspruchung*, Technische Hochschule Aachen, Dissertation, 1992. – 246 S.
- [120] PETTIJOHN, F. J. ; POTTER, P. E. ; SIEVER, R.: *Sand and Sandstone. 2*. Springer New York, 1987. – 553 S.

- [121] FILOMENA, C. M.: *High-Resolution Ultrasonic Logging of Sandstones Applications to Stratigraphy, Reservoir Characterization, and Dimension Stone Quality Evaluation*, Universität Erlangen-Nürnberg, Dissertation, 2012. – 119 S.
- [122] FLATT, R. J.: *Werkstoffe I (Materialeigenschaften)*. Zürich : ETH Zürich, 2002. – 72 S.
- [123] HEUBECK, C.: Porosität und Permeabilität in natürlichen Gesteinen. In: *Der belebte Planet* (2007), S. 36–44
- [124] KOCHER, M.: *Quelldruckmessungen und thermische Druckmessungen an ausgewählten Sandsteinen*, Ludwig-Maximilians-Universität München, Dissertation, 2005. – 135 S.
- [125] DEMTRÖDER, W.: *Experimentalphysik I. 7.* Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2015 (Springer-Lehrbuch). – 472 S.
- [126] HUOTARI, T. ; KUKKONEN, I.: *Thermal Expansion Properties of Rocks : Literature Survey and Estimation of Thermal Expansion Coefficient for Olkiluoto Mica Gneiss*. Olkiluoto, 2004
- [127] CORRENS, C. W.: *Einführung in die Mineralogie*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1968. – 458 S.
- [128] HÖRENBAUM, W.: *Verwitterungsmechanismen und Dauerhaftigkeit von Sandsteinsichtmauerwerk*, Technische Hochschule Karlsruhe, Dissertation, 2005. – 357 S.
- [129] SCHÜRGER, U.: Feuchtemessung zur Beurteilung eines Schimmelpilzrisikos, Bewertung erhöhter Feuchtegehalte. In: *Tagungsband der Aachener Bausachverständigentage 2013 97* (2014), S. 11
- [130] DO, J.: *Untersuchung der Verwitterung von Fassaden aus Naturstein*, Technische Universität Berlin, Dissertation, 2000. – 159 S.
- [131] MARTINOLA, G.: *Rissbildung und Ablösung zementgebundener Beschichtungen auf Beton*, ETH Zürich, Dissertation, 2000. – 497 S.

- [132] WERANECK, K. ; GRAF, M. ; VOIGTLÄNDER, A. ; MICHAEL, K. ; KOCH, A.: Entwurf eines Sensors zur Ermittlung thermischer Ausdehnung in Sandstein mittels Faser-Bragg-Gitter. In: *Tagungsband des 5. Kolloquiums zur Erhaltung von Bauwerken* Bd. 5. Esslingen : Technische Akademie Esslingen, 2017
- [133] HEURICH, E.: *Materialprüfung*, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Skript zur Vorlesung Materialprüfung, 2015. – 119 S.
- [134] SPANGENBERGER: *Drehmomentberechnung*. <http://www.hspangenberger.de/d/Drehmoment.pdf>; Zugriff: 09.06.2017
- [135] MÖLLER, U.: *Thermo-hygrische Formänderungen und Eigenspannungen von natürlichen und künstlichen Mauersteinen*, Universität Stuttgart, Dissertation, 1993. – 85 S.